

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Черепнін Гліб Сергійович

УДК 621.396.96

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ТЛІ НЕБА
ЗА ЇХ РАДІОТЕПЛОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ**

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Гліб ЧЕРЕПНІН

(підпис)

Науковий керівник

Руженцев Микола Вікторович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Черепнін Гліб Сергійович. Виявлення безпілотних літальних апаратів на тлі неба за їх радіотепловим випромінюванням. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. – Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2024.

Робота містить теоретичні основи побудови багаточастотних радіометричних комплексів виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери. Синтезовано і досліджено метод обробки сигналів власного радіотеплового випромінювання в радіометричному комплексі, що працює у X , Ka та W діапазонах хвиль. Структура та складові проведення роботи були спрямовані на отримання сукупності теоретичних результатів з їх підтвердженням експериментальними вимірюваннями. При цьому теоретичне обґрунтування основ побудови багаточастотного радіометричного комплексу виявлення БПЛА було ґрунтоване на конструктивному поєднанні математичних методів статистичної теорії синтезу радіосистем та практичного досвіду побудови радіометричних систем. Запропоновані технічні рішення до побудови перспективних комплексів контролю повітряного простору були отримані на базі використання точних методів вирішення оптимізаційних задач статистичного синтезу з застосуванням досягнень функціонального аналізу, теорії оптимальних рішень та оцінки параметрів ймовірнісних розподілів.

Отримано та проаналізовано аналітичні вирази для потенційних характеристик якості роботи радіометричних комплексів та розраховані граничні дальності виявлення для БПЛА, що спостерігаються на тлі неба. На основі отриманих методів розроблена структурна схема радіометричного комплексу, та отримана у широкому діапазоні хвиль база радіометричних контрастів різних типів

та класів БПЛА, які спостерігаються в статистиці при різних тактичних та погодних умовах, проведені натурні експерименти виявлення БПЛА.

Практично-методичні напрацювання з побудови радіометричних комплексів, проведення експериментальних досліджень, вибору частотних діапазонів з метою підвищення точності радіометричних вимірювань одержані з урахуванням метеорологічних станів атмосфери.

Експериментально та теоретично продемонстровано результативність дослідженого в роботі підходу для вирішення завдання виявлення БПЛА на тлі неба, а також працездатність запропонованих технічних рішень при його практичній реалізації. Структура та складові проведення дисертаційного дослідження спрямовані на отримання теоретичних результатів та їх підтвердження експериментальними вимірюваннями. База отриманих радіометричних контрастів БПЛА на тлі безхмарної і хмарної атмосфери, дощу стане основою для прогнозування ефективності та розробки нових технічних рішень щодо підвищення можливостей засобів моніторингу повітряного простору із виявлення БПЛА, які створюються для потреб захисту критичної інфраструктури України.

Теоретично показано, що при розробці радіометричного комплексу з використанням вітчизняних компонентів міліметрового та сантиметрового діапазонів хвиль максимальні дальності виявлення знаходяться у межах від 1 до 3 км, а при застосуванні найкращих НВЧ елементів світових компаній GmbH (RPG), Pasternack Company, Millimeter Wave Products Inc. граничні дистанції виявлення БПЛА можуть досягати 6 - 8 км.

Мета дослідження полягає у підвищенні ймовірності виявлення БПЛА в будь-яких погодних та тактичних умовах проведення вимірювань за рахунок експериментального дослідження макету радіометричного комплексу X, Ka та W діапазонів хвиль.

Об'єктом дослідження є власне радіотеплове випромінювання БПЛА та прийняті сигнали радіометричним комплексом у X, Ka та W діапазонах хвиль.

Предметом дослідження є статистично оптимальні методи, алгоритми і пристрої обробки власного радіотеплового випромінювання БПЛА в різних тактичних та погодних умовах.

Ключові слова: дистанційне зондування, радіотеплове випромінювання, яскравісна температура, пасивні системи, роздільна здатність, радіометричні системи, виявлення БПЛА, оптимальна обробка сигналів, ймовірнісні характеристики, експериментальне дослідження, міліметровий діапазон, хаотичний сигнал.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. N. V. Ruzhentsev, S. S. Zhyla, V. V. Pavlikov, V. V. Kosharsky, і G. S. Cherepnin, Cost effective meter of moisture integral parameters of the atmospheric column, Ukrainian hydrometeorological journal, vol. 27, 2021, pp. 24-33, doi: 10.31481/uhmj.27.2021.03.

2. Ruzhentsev, N., et al. Block diagram of a multi-frequency radiometric complex for UAV detection in different meteorological conditions. Information and telecommunication sciences, 2021, no. 2, pp. 50–57. DOI: 10.20535/2411-2976.22021.50-57

3. Руженцев М. В., Жила С. С., Павліков В. В., Черепнін Г. С., Попов А. В., Кошарський В. В., Церне Е. О., Власенко Д. С. Теоретичні основи побудови багаточастотних радіометричних комплексів для виявлення БПЛА на тлі атмосферного випромінювання // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2021., № 6., - с. 74-82. doi:10.32620/aktt.2021.6.08

4. N. Ruzhentsev, O Gribsky, S. Maltsev, S. Shevchuk, V. Pavlikov, G. Cherepnin, S. Zhyla, E. Tserne, "Active-passive pulse noise radar of the 3mm range and the results of preliminary tests", Radioelectronic and computer systems, Kharkiv, № 3 2023, pp. 27-47 doi: 10.32620/reks.2023.3.04.

5. N. Ruzhentsev, S. Zhyla, V. Pavlikov, G. Cherepnin, T. Eduard and V. Kosharskyi, "Theoretical Bases of Multi frequency Radiometric Systems Development for UAV Detection Against The Background of Atmospheric Radiation," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2022, pp. 20-24, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766843.

6. N. Ruzhentsev, S. Zhyla, V. Pavlikov, V. Volosyuk, G. Cherepnin and V. Kosharskyi, "UAV Radio Thermal Contrasts in MM and CM Wavelength Ranges," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 711-715, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037002.

7. Nezhalska, K.; Volosyuk, V.; Bilousov, K.; Kolesnikov, D.; Cherepnin, G. Relation Models of Surface Parameters and Backscattering (or Radiation) Fields as a Tool for Solving Remote Sensing Problems. *Computation* 2024, 12(5), 104; <https://doi.org/10.3390/computation12050104>.

8. Nezhalskaya, K., Volosyuk, V., Bilousov, K., Kolesnikov, D., & Cherepnin, G. (2024). Study on potential application of brightness temperature models in passive remote sensing. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024(1), 55–64. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.05>.

ABSTRACT

Cherepnin Hlib Serhiyovych. Detection of unmanned aerial vehicles against the background of the sky by their radio thermal radiation. - Qualifying scientific work on rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the field of knowledge 17 Electronics and Telecommunications, specialty 172 Telecommunications and Radio Engineering. – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, 2024.

The work contains the theoretical foundations of the construction of multi-frequency radiometric complexes for the detection of UAVs against the background of atmospheric radiation. The method of processing signals of own radiothermal radiation in a radiometric complex operating in the X, Ka and W wave ranges has been synthesized and investigated. The structure and components of the work were aimed at obtaining a set of theoretical results with their confirmation by experimental measurements. At the same time, the theoretical substantiation of the foundations of the construction of a multi-frequency radiometric complex of UAV detection was based on a constructive combination of mathematical methods of the statistical theory of the synthesis of radio systems and practical experience in the construction of radiometric systems. The proposed technical solutions for the construction of promising airspace control complexes were obtained on the basis of the use of precise methods of solving optimization problems of statistical synthesis using the achievements of functional analysis, the theory of optimal solutions and estimation of the parameters of probability distributions.

Analytical expressions for potential performance characteristics of radiometric complexes and calculated limit detection ranges for UAVs observed against the sky background were obtained and analyzed. On the basis of the obtained methods, a structural diagram of the radiometric complex was developed, and a database of radiometric contrasts of various types and classes of UAVs observed statically under various tactical and weather conditions was obtained in a wide range of waves, and full-scale UAV detection experiments were conducted.

Practical and methodological developments in the construction of radiometric complexes, conducting experimental studies, selecting frequency ranges in order to increase the accuracy of radiometric measurements were obtained taking into account the meteorological conditions of the atmosphere.

The effectiveness of the approach investigated in the work for solving the task of detecting UAVs against the sky, as well as the efficiency of the proposed technical solutions in its practical implementation, has been demonstrated experimentally and theoretically. The structure and components of the dissertation research are aimed at obtaining theoretical results and their confirmation by experimental measurements. The database of obtained radiometric contrasts of UAVs against the background of cloudless and cloudy atmosphere, rain will be the basis for forecasting the effectiveness and development of new technical solutions to increase the capabilities of airspace monitoring tools for detecting UAVs, which are created for the needs of protecting the critical infrastructure of Ukraine. It is theoretically shown that when developing a radiometric complex using domestic components of the millimeter and centimeter wave ranges, the maximum detection ranges are within the range from 1 to 3 km, and when using the best UHF elements of the world companies GmbH (RPG), Pasternack Company, Millimeter Wave Products Inc. the maximum detection distances of UAVs can reach 6 - 8 km.

The purpose of the study is to increase the probability of UAV detection in any weather and tactical conditions of measurement due to experimental research of the layout of the X, Ka and W waveband radiometric complex.

The object of the study is the UAV's own radio-thermal radiation and the signals received by the radiometric complex in the X, Ka and W wave ranges.

The subject of the research is statistically optimal methods, algorithms and devices for processing the own radio-thermal radiation of UAVs in various tactical and weather conditions.

Keywords: remote sensing, radio thermal radiation, brightness temperature, passive systems, resolution, radiometric systems, UAV detection, optimal signal processing, probabilistic characteristics, experimental research, millimeter range, chaotic signal.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| АНОТАЦІЯ | 2 |
| АВСТАСТ | 7 |
| ЗМІСТ | 9 |
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ | 11 |
| ВСТУП | 12 |
| 1. МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ БПЛА | 21 |
| 1.1. Огляд існуючих систем виявлення БПЛА | 21 |
| 1.2. Огляд існуючих схем побудови радіометрів | 42 |
| 1.3. Теоретичні основи синтезу оптимальних методів обробки сигналів радіотеплового випромінювання | 47 |
| 1.4. Постановка задачі | 63 |
| Висновки до розділу | 64 |
| 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ БАГАТОЧАСТОТНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА ТЛІ АТМОСФЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ | 65 |
| 2.1. Рівняння спостереження | 65 |
| 2.2. Вирішення оптимізаційної задачі | 67 |
| Висновки до розділу | 73 |
| 3. РАДІОМЕТРИЧНІ КОНТРАСТИ РІЗНИХ ТИПІВ БПЛА ТА НАТУРНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ | 74 |
| 3.1. Методологія проведення натурального експерименту | 75 |
| 3.2. Результати вимірювань | 83 |
| Висновки до розділу. | 100 |
| 4. УЗАГАЛЬНЕНА СХЕМА РАДІОМЕТРИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ТА АНАЛІЗ ЇЇ ПОТЕНЦІАЛЬНОЇ МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА, ЩО СПОСТЕРІГАЮТЬСЯ НА ТЛІ НЕБА У РІЗНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ І | |

| | |
|---|-----|
| | 10 |
| ТАКТИЧНИХ УМОВАХ | 101 |
| 4.1. Структурна схема радіометричного комплексу | 102 |
| 4.2. Розрахунок потенційних можливостей правильного виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери | 105 |
| Висновки до розділу | 120 |
| ВИСНОВКИ | 121 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 123 |
| ДОДАТОК А | 131 |
| ДОДАТОК Б | 157 |
| ДОДАТОК В | 200 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат;
СМ діапазон – сантиметровий діапазон;
ММ діапазон – міліметровий діапазон;
РТВ – радіотеплове випромінювання;
АЧТ – абсолютно чорне тіло;
НВЧ – надвисокочастотний;
ЛЧП – лінійна частини приймача;
СЩП – спектральна щільність потужності;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ФНЧ – фільтр нижніх частот;
СКО – середньоквадратична помилка;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ДС – діаграма спрямованості;
ДХ – діапазон хвиль;
ППЧ – підсилювач проміжної частоти;
КД – квадратичний детектор;
МШП – малошумлячий підсилювач;
ПК – персональний комп'ютер;
ОПП – опорно-поворотний пристрій
АС – антенна система;
ЛА – літальний апарат;
ВП – вертикальна поляризація;
ГП – горизонтальна поляризація;

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток безпілотної авіації та її широке застосування у військових конфліктах, зокрема під час повномасштабного вторгнення РФ, та несанкціонованому використанні у цивільному житті висувають нові вимоги до розвитку методів протидії, удосконалення існуючих та створення нових зразків озброєння і військової техніки силових відомств України. Існуючі випадки безконтрольного перетину кордонів, тактичної розвідки, цільових ударів по найважливішим об'єктам БПЛА терористів ставлять під загрозу національну безпеку та обороноздатність України. Як наслідок потребують розвитку методи та засоби завчасного виявлення, оцінки просторового положення, супроводження та знищення незареєстрованих БПЛА.

При розробці та модернізації сучасних засобів протиповітряної оборони основна увага приділяється розвитку акустичних [1-4], оптичних з застосуванням нейромереж [5, 6], інфрачервоних [7] та радіолокаційних [8, 9] методів зондування повітряного простору. Кожний метод має свої переваги і недоліки, проте об'єднує їх той факт, що одночасно ведуться дослідження з розроблення методів і засобів зниження помітності БПЛА у зазначених діапазонах.

Як наслідок виникає протиріччя: з одного боку розробники засобів виявлення та боротьби з БПЛА постійно підвищують точність та надійність вимірювань, а з іншого боку – на момент отримання результатів вони вже є застарілими та не актуальними по відношенню до розвинутих засобів зниження помітності. Понизити рівень цього протиріччя можливо за рахунок застосування пристроїв та систем пасивної радіолокації [10-12]. Такі системи мають бути скритними та здатні реєструвати власне радіотеплове випромінювання літальних апаратів, в тому числі виконаних з композитних матеріалів, в широкому спектрі частот на тлі випромінювання атмосфери в будь-яку погоду, вдень та вночі.

Використання власного радіотеплового випромінювання безпілотної літальних апаратів (БПЛА) в сантиметровому і міліметровому діапазоні хвиль (ДХ) для їх виявлення на фоні неба є плідним підходом в силу забезпечення скритності

і відносно всепогодної роботи таких вимірювальних комплексів. Однак створення дієвої апаратури для виявлення малорозмірних цілей потребує досліджень радіотеплових контрастів передбачуваних об'єктів виявлення в зв'язку з відсутністю цих даних в літературі. Для вирішення цієї проблеми також необхідно розробити нові оптимізовані методи та аналітичні вирази для визначення точності виявлення БПЛА, що спостерігаються на тлі неба.

Оперативне, незалежне від часу доби і метеоумов та, водночас, скритне спостереження за появою об'єктів в повітряному просторі при виконанні цивільних або військових завдань є запорукою швидкого прийняття рішень і, відповідно, формування правильної стратегії протидії незаконним і несанкціонованим БПЛА.

Актуальність цих досліджень пов'язана зі станом досліджень даної проблематики, який демонструє недостатню ефективність існуючих засобів протидії БПЛА [13], та потребує новітніх підходів та науково-технічних рішень. Добре відомі оптичні, інфрачервоні [7, 14] радіолокаційні та акустичні системи виявлення БПЛА мають кожна свої обмеження і їх доцільно було б доповнити запропонованим радіометричним комплексом.

У даній роботі проводиться дослідження альтернативного апаратного комплексу з використанням методів радіометрії для виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів на основі обробки радіотеплових сигналів в трьох різних точках СМ та ММ діапазонів хвиль. Комплексне вирішення завдань роботи повинно забезпечити створення бази радіометричних контрастів кількох типів БПЛА, які спостерігаються в статистиці при різних тактичних та погодних умовах наряду по результатам натурних експериментів виявлення БПЛА.

Особливістю даної роботи є сукупність наступних аспектів:

– теоретичне обґрунтування основ побудови діючого макету багаточастотного радіометричного комплексу виявлення БПЛА було основане на конструктивному поєднанні математичних методів статистичної теорії синтезу радіосистем та практичного досвіду побудови радіометричних систем;

– структура та складові проведення роботи були спрямовані на отримання сукупності теоретичних результатів з їх підтвердженням експериментальними вимірюваннями;

– запропоновані вимоги до перспективних комплексів контролю повітряного простору було отримано з використанням методів вирішення оптимізаційних задач статистичного синтезу з застосуванням досягнень функціонального аналізу, теорії оптимальних рішень та оцінки параметрів ймовірнісних розподілів;

– відсутність або нестача даних про контрастоутворюючі властивості БПЛА, що спостерігаються на тлі неба в різних погодних умовах, була усунена шляхом підготовки і проведення додаткових досліджень і експериментів;

– практично-методичні напрацювання з побудови радіометричних комплексів, проведення експериментальних досліджень, вибір частотних діапазонів з метою підвищення точності радіометричних вимірювань, враховували метеорологічні стани атмосфери.

Робота містить опис структурної схеми радіометричного т вимірювального комплексу з проведенням, за допомогою розроблених методів, моделювання його роботи. Метою моделювання також було визначення оптимальної структури та потенційних технічних характеристик комплексу, а саме: параметрів виявлення (достовірність правильного виявлення, достовірність помилкової тривоги) і передбачуваних відстаней виявлення літальних апаратів. Причому, отримані розрахунковим шляхом ймовірнісні дані, експериментально перевірені.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася у межах науково-дослідної роботи кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», №ДР 0121U109600 «Проектування та експериментальне дослідження радіометричного комплексу X, Ka та W діапазонів для всепогодного та високоточного виявлення БПЛА», яка виконувалася на кафедрі у 2021-2022 рр.

Мета і завдання дослідження.

Мета – підвищення ймовірності виявлення БПЛА в будь-яких погодних та тактичних умовах проведення вимірювань за рахунок експериментального дослідження макету радіометричного комплексу X , K та W діапазонів хвиль.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні взаємопов'язані часткові завдання:

- синтезувати метод оптимальної обробки стохастичних сигналів власного радіотеплового випромінювання БПЛА, що спостерігаються на тлі неба у складних метеорологічних умовах, у багаточастотному радіометричному комплексі;

- відповідно до синтезованого метода обґрунтувати структурну схему його технічної реалізації;

- провести експериментальні дослідження за допомогою макету радіометричного комплексу з розташованою антенною системою на антенно-поворотній платформі для забезпечення синхронних вимірювань у X , K та W діапазонах хвиль при скануванні заданої зони огляду;

- визначити контрасти різних типів та класів БПЛА, які спостерігаються в ретельно контрольованих умовах при різних тактичних та погодних умовах;

- створення бази даних радіометричних зображень та контрастів;

- провести натурні експерименти виявлення БПЛА в польоті на різній висоті;

- отримати аналітичні вирази для потенційних характеристик якості роботи радіометричних комплексів та розрахувати граничні дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9.

Об'єкт дослідження – власне радіотеплове випромінювання БПЛА та прийняті сигнали радіометричним комплексом у X , K та W діапазонах хвиль.

Предмет дослідження – статистично оптимальні методи, алгоритми і пристрої обробки власного радіотеплового випромінювання БПЛА в різних тактичних та погодних умовах.

Методи дослідження:

- методи оптимальних рішень при вирішенні задач статистичного синтезу структур надширококутних радіотехнічних комплексів;

- методи моделювання для підтвердження достовірності синтезованих алгоритмів обробки сигналів;
- проведення натурних експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів

– Вперше синтезовано та досліджено метод оптимальної обробки сигналів в багаточастотних радіометричних комплексах виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери, що на відміну від існуючих методів відповідає основним вимогам до радіотехнічних вимірювань – високій просторовій роздільній здатності та високій флюктуаційній чутливості (яка визначає дальність роботи радару) за умов всепогодності.

– Вперше у вигляді табличних даних узагальнено результати аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання дальностей виявлення БПЛА в багатоканальних радіометричних комплексах, що на відміну від існуючих охоплюють широке коло можливих погодних та тактичних умов проведення вимірювання, а також враховують багаторічні результати вимірювань параметрів приймачів та атмосфери у діапазонах частот 10-12 ГГц, 20-22 ГГц, 35-36 ГГц, 94-96 ГГц.

– Вперше в результаті експериментальних вимірювань у широкому діапазоні хвиль отримана база радіометричних зображень і контрастів різних типів та класів БПЛА, які спостерігаються при різних тактичних та погодних умовах. До цього більшість вимірювань проводились на тестових об'єктах простої форми, на кшталт куля, кутиковий відбивач, прямокутна пластинка.

– Отримали подальшого розвитку структури радіометричних комплексів формування радіометричних зображень, що на відміну від існуючих одразу у чотирьох діапазонах частот враховують в основних етапах обробки операції модуляції корисних сигналів, періодичне калібрування приймачів та термостабілізацію вхідних трактів.

Практичне значення одержаних результатів:

– узагальнення інформації про дальності виявлення БПЛА на тлі неба в багатоканальних радіометричних системах надає важливу інформацію для

потенційного удосконалення наявних систем, а також впровадження нових підходів до розробок нових комплексів.

– отримані результати спостережень доцільно використовувати при дослідженні локальних особливостей моделей атмосфери в Україні, що безумовно стане необхідним перед впровадженням 5G систем телекомунікацій;

– отримані на основі експериментальних даних модельні оцінки вірогідності виявлення різних об'єктів на тлі неба можуть бути використані при виборі апаратних параметрів радіометричних пристроїв і режимів їх роботи, наприклад, в завданнях охорони об'єктів критичної інфраструктури.

– наукові положення і результати дисертаційного дослідження були впроваджені у навчальному процесі кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем у вигляді практичного та теоретичного матеріалу у навчальних дисциплінах: «Сигнали і процеси», «Електродинаміка та пристрої мікрохвильового діапазону», «Антенні пристрої».

Особистий внесок здобувача. Усі роботи виконані у співавторстві.

Автору належать наступні результати, які полягають у:

– синтезі оптимального методу обробки сигналів в багаточастотних радіометричних комплексах виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери;

– створенні бази радіометричних контрастів різних типів та класів БПЛА в широкому діапазоні частот за різних погодних умов та тлі атмосфери;

– проведенні натурних експериментів виявлення мініатюрного БПЛА в польоті на різній висоті;

– розрахунку ймовірності правильного виявлення БПЛА в залежності від дальності, кута візування та їх розмірів та побудові графіків кривих виявлення.

Апробація результатів дисертації. результати дослідження апробовані на наступних міжнародних конференціях, праці яких індексуються у н.м.б.д. Scopus:

– 6th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022.

– 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2022.

Публікації. Основні результати дослідження опубліковані у статтях (3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті входять до м.н.б.д. Scopus, квартиль Q3, одна стаття до м.н.б.д. Scopus, квартиль Q2) та у двох збірниках доповідей у працях міжнародних конференцій, праці яких індексуються у н.м.б.д. Scopus. Загалом у н.м.б.д. Scopus відображено 9 робіт, а h-index=2 (сторінка у Scopus <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220835419>).

Структура і об'єм дисертаційної роботи. Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел. Повний об'єм дисертації 200 сторінок, у тому числі 69 сторінок додатків, 8 сторінок списку використаних джерел у кількості 66 найменувань.

Подяка. Автор висловлює глибоку вдячність науковому керівнику доктору технічних наук, головному науковому співробітнику Руженцеву Миколі Вікторовичу за допомогу під час роботи над дисертаційним дослідженням.

Автор щиро вдячний доктору технічних наук, професору Волосюку Валерію Костянтиновичу і доктору технічних наук Жилі Семену Сергійовичу за конструктивні зауваження і рекомендації, висловлені в процесі підготовки матеріалів дисертації, а також всім співробітникам кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті

N. V. Ruzhentsev, S. S. Zhyla, V. V. Pavlikov, V. V. Kosharsky, i G. S. Cherepnin, Cost effective meter of moisture integral parameters of the atmospheric column, Ukrainian hydrometeorological journal, vol. 27, 2021, pp. 24-33, doi: 10.31481/uhmj.27.2021.03

Ruzhentsev, N., Cherepnin, G., et al. Block diagram of a multi-frequency radiometric complex for UAV detection in different meteorological conditions. Information and telecommunication sciences, 2021, no. 2, pp. 50–57. DOI: 10.20535/2411-2976.22021.50-57

Руженцев М. В., Жила С. С., Павліков В. В., Черепнін Г. С., Попов А. В., Кошарський В. В., Церне Е. О., Власенко Д. С. Теоретичні основи побудови багаточастотних радіометричних комплексів для виявлення БПЛА на тлі атмосферного випромінювання // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2021., № 6., - с. 74-82. doi:10.32620/aktt.2021.6.08

N. Ruzhentsev, O Gribsky, S. Maltsev, S. Shevchuk, V. Pavlikov, G. Cherepnin, S. Zhyla, E. Tserne, "Active-passive pulse noise radar of the 3mm range and the results of preliminary tests", Radioelectronic and computer systems, Kharkiv, № 3 2023, pp. 27-47 doi: 10.32620/reks.2023.3.04.

Nezhalska, K.; Volosyuk, V.; Bilousov, K.; Kolesnikov, D.; Cherepnin, G. Relation Models of Surface Parameters and Backscattering (or Radiation) Fields as a Tool for Solving Remote Sensing Problems. Computation 2024, 12(5), 104; <https://doi.org/10.3390/computation12050104>.

Nezhalskaya, K., Volosyuk, V., Bilousov, K., Kolesnikov, D., & Cherepnin, G. (2024). Study on potential application of brightness temperature models in passive remote sensing. Radioelectronic and Computer Systems, 2024(1), 55–64. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.05>.

Матеріали міжнародних конференцій

N. Ruzhentsev, S. Zhyla, V. Pavlikov, G. Cherepnin, T. Eduard and V. Kosharskyi, "Theoretical Bases of Multi frequency Radiometric Systems Development for UAV Detection Against The Background of Atmospheric Radiation," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2022, pp. 20-24, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766843.

N. Ruzhentsev, S. Zhyla, V. Pavlikov, V. Volosyuk, G. Cherepnin and V. Kosharskyi, "UAV Radio Thermal Contrasts in MM and CM Wavelength Ranges," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 711-715, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037002.

Патент

Радіометричний комплекс виявлення джерел радіотеплового випромінювання на тлі неба. Патент України на винахід №. 127880. / Жила С. С., Руженцев М. В., Волосюк В. К., Павліков В. В., Церне Е. О., Власенко Д. С., Кошарський В. В., Черепнін Г. С., Шматко О. О., Попов А. В.; 31.01.2024

1. МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ БПЛА

1.1. Огляд існуючих систем виявлення БПЛА

Повномасштабне вторгнення російської федерації показало, що усі типи БПЛА є грізною зброєю, яку не можна ігнорувати.

На початку вторгнення свій внесок робили ударні безпілотники типу Bayraktar. Коли на полі бою з'явилися системи протиповітряної оборони тактичного та оперативного рівня, роль великих ударних БПЛА переважно звелася до аеророзвідки на дистанціях поза зоною досяжності ППО.

Вже зараз зрозуміло, що без застосування БПЛА на полі бою не обійдеться жодна сучасна армія, а тому в майбутньому слід очікувати ще більший сплеск попиту на різноманітні безпілотні літальні апарати і не тільки військового призначення.

При відносно невеликій вартості ударні дрони можуть вражати техніку, яка за вартістю може бути на декілька порядків вищою. Наприклад FPV ударні дрони здатні вражати артилерію та танки противника, частково або повністю виводячи їх з поля бою. Не менш важливою складовою є розвідувальні дрони. На початку вторгнення Україна показала, що система «Кропива», це те чого бракувало навідникам артилерії. Такий варіант розвідки дроном дуже швидкий і дозволяє оперативно вражати важливі об'єкти противника.

Проміжною ланкою можуть вважатися середні розвідувальні БПЛА, наприклад, ОРЛАН-10 [15] у російської сторони та БПЛА «Лелека» [16] і «Фурія» [17] в Україні. Вони також можуть видавати координати цілей для ураження і хоча мають менший радіус дії, ніж Bayraktar, проте вони дешевші та їхня кількість більша, тому також займають свою специфічну ланку.

Новим “витком” застосування БПЛА стали атаки іранських баражуючих боеприпасів «Shahed-136» на об’єкти критичної інфраструктури України. До цих атак застосування саме баражуючих боеприпасів зводилося до тактичного ураження техніки та піхоти. З відкритих джерел відомо, що Shahed-136 не має систем інфрачервоного наведення або оптичних камер. Його політ виконується за задалегідь побудованим маршрутом. Часто цей маршрут прокладається вздовж течії річок, на низькій висоті. Також було виявлено, що на останній ділянці польоту він може орієнтуватися на радіомаяки, які розміщують на об’єкті ураження. Боротьба з таким типом БПЛА полягає у ранньому виявленні та ураженні зі стрілецької зброї мобільними групами (через відносно малу швидкість), а також застосування зенітних систем ураження.

При цьому обидві сторони постійно вдосконалюють та шукають нові засоби захисту. На ударні дрони вже ставлять тепловізійні камери для роботи вночі, а наступним кроком може стати впровадження штучного інтелекту та створення роїв БПЛА. При чому з теперішнім розвитком технологій це лише питання часу.

З відкритих джерел заявляється, що в подальшому у росії можуть з’явитися баражуючі боеприпаси з можливістю наведення на засоби ППО. В такому випадку для активних систем ППО, одним з важливих завдань стане власний захист, що досягається мобільністю самих комплексів. Також необхідно починати звертатись до пасивних систем виявлення.

Провідні фахівці в галузі конструювання систем автоматичного управління для дронів відзначають, що на сьогоднішній день основним і найефективнішим засобом РЕБ проти БПЛА є перешкода для супутникового радіонавігаційного сигналу (СРНС).

Справа в тому, що переважна більшість нинішніх безпілотників – це невеликі апарати, оснащені недорогими мініатюрними гіроскопами та акселерометрами на базі мікро-електромеханічних систем, які при втраті сигналу СРНС втрачають орієнтацію і зазнають аварії або здійснюють вимушену посадку.

Більш технічно досконалі і відповідно дорожчі моделі БПЛА можуть продовжувати рух під керуванням оператора з використанням відеозображення

поверхні, що підстилає, або комплексної системи бортових датчиків і магнітометра (компаса) для виходу із зони масованих перешкод (які зазвичай не перевищують в радіусі 30 км). Однак застосування відеокамери та бортового комп'ютера, що обробляє відео для орієнтації на місцевості, не забезпечує навігацію в складних метеоумовах і вночі.

Тим більше що для запобігання використанню описаних вище засобів орієнтування на місцевості на додаток до перекриття супутникової навігації БПЛА військами РЕБ протиборчої сторони застосовується ще й постановка перешкод "по командній лінії" – канал передачі даних з борту безпілота.

На цей випадок модеми, що передають і приймають, в бортовій апаратурі сучасних БПЛА працюють за принципом "псевдовипадкової перебудови робочої частоти" [18], ускладнюючи процес постановки перешкод. Але сучасні потужні наземні станції РЕБ досить успішно долають подібний захист, оскільки модеми на малорозмірних БПЛА мають невелику потужність та прості алгоритми керування частотою [19].

Комплекси (активні та пасивні)

Панцир-С1 [20] Інформаційні засоби бойової машини ЗРПК складаються з радіолокаційної станції виявлення цілей (СВЦ), радіолокаційної станції супроводу цілей і ракет (ССЦР) і оптико-електронної системи (ОЕС) супроводу цілей і ракет.

Станція виявлення цілей "S"-діапазона ЗРПК "Панцир-1С". Складається із двох станцій, перша з яких працює тільки на прийом сигналів радіовідповідача (РВ) ЗУР, за допомогою ФАР, що має малу кількість елементів, вимірює три координати ЗУР і використовується на ділянці виведення ракети в основну діаграму локатора. Друга станція з багатоелементною ФАР працює в режимі приймання-передачі за ціллю та ракетою. Застосування ФАР дозволяє реалізувати три канали за трьома цілями в радіолокаційному, всепогодному режимі, причому по одній з найбільш небезпечних цілей може бути забезпечена залпова стрільба двома ракетами.

ССЦР комплексу працює в короткохвильовому діапазоні, що забезпечує високу точність вимірювання кутових координат і можливість роботи в радіолокаційному режимі за цілями, що летять на малій висоті.

Таблиця 1.1 – Параметри радіолокаційної станції виявлення

| Параметр | Значення |
|--|------------------------|
| Дальність виявлення/супроводу цілі з ЕПР 1м.кв, км | >40 |
| Кількість одночасно супроводжуваних цілей | >40 |
| Висота польоту виявлених цілей, м | від 5 до 20000 |
| Радіальні швидкості, м/с | 30-1200 |
| Зона огляду: -по азимуту (за рахунок електромеханічного сканування): -по азимуту (за рахунок електронного сканування, в секторному режимі): -по кутку місця (за рахунок електронного сканування): | 0-360° 90° 0-60° |
| Час огляду, с | 4 |
| Дальність (ЕПР 2 м ²) (виявлення/супровід) | 36/30 км |

Супровід цілі проводиться в інфрачервоному діапазоні 3-5 мкм, що забезпечує вседобове використання в оптичному режимі роботи.

Радар 48Я6-К1 Підліт-К1 [21] являє собою мобільний, електронно нахилений тривимірний радар S-діапазону частот, з можливістю обертання по азимуту і по куту підйому. Особливо ефективний проти цілей, що низько летять. Для перегляду та відстеження цілей використовується антена з ПФАР (велика верхня антена). Дві нижні діаметрально протилежні антени є вторинними радарями, вужча – для міжнародного стандарту SIF Mark XII, велика вузька антена ззаду – для національного стандарту рф пристроїв ідентифікації. Маленькі антени,

розташовані поряд з антеною фазованої решітки та зверху, є компенсуючими антенами для захисту від активних перешкод.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд системи «Підліт»

Таблиця 1.2 – Параметри радару системи «Підліт»

| Параметр | Значення |
|---|---------------|
| Діапазон частот | сантиметровий |
| Період сканування | 5 с та 10 с |
| Дальність | 10-200 км |
| Максимальна висота | 10 км |
| Кути височин | -2°...+25° |
| Розрізнявальна спроможність за дальністю | 200 м |
| Розрізнявальна спроможність за азимутом | 1,6° |
| Коефіцієнт подавлення відображень від місцевих об'єктів | 50 дБ |
| Час включення РЛС | 3 хв |

Здатний виявляти середньовисотні цілі з ЕПР 0,05-0,1 м² на відстані 80-120 км, низьковисотні - в момент виходу через радіогоризонт на відстані 27-35 км.

Білоруська станція перешкод та радіокерування зв'язку **Р-934УМ2 (Гроза-6)** [22] призначена для пошуку, виявлення та радіопридушення ліній радіозв'язку УКХ діапазону, що працюють на фіксованих частотах та в режимах адаптивної та програмної перебудови робочої частоти. До складу входить виявник-пеленгатор з приймально-пеленгаторною антенно-фідерною системою (АФС), два автоматизовані робочі місця операторів, десятиканальний радіопередавач з сімома передаючими АФС, комплект апаратури зв'язку та передачі даних, комплект апаратури електроживлення та життєзабезпечення, автомобільне шасі з двома кузовом-фургоном.

Має розширений робочий діапазон частот радіорозвідки та радіопригнічення; виявляє та пригнічує джерела радіовипромінювань на наземних та повітряних об'єктах; виявляє, пеленгує та визначає місце джерел радіовипромінювання в режимі ППРЧ зі швидкістю до 1000 стрибків на секунду, радіопригнічує лінії зв'язку в режимі ППРЧ зі швидкістю до 500 стрибків на секунду; одночасно придушує до 28 ліній радіозв'язку на фіксованих частотах.



Рисунок 1.2 – станція перешкод Р-934УМ2

Комплекс "Кольчуга" [23] – це українська автоматизована станція радіотехнічної розвідки, яка працює за принципом пасивного радара. Завдяки цьому "Кольчуга" не може бути виявлена традиційними засобами радіоелектронної розвідки супротивника. Комплекс здатний не тільки виявляти, а й розпізнавати наземні (надгоризонтні) і повітряні цілі працюючи за принципом тропосферного поширення. Комплекс здатний з високою точністю визначати

координати наземних та надводних цілей, маршрути їх руху на відстані до 600 км у глибину території та 1000 км по фронту, а для повітряних цілей, що летять на висоті 10 км – до 800 км. Чутливість радіо тракту становить від 110 до 155 дБ/Вт у смузі панорамного огляду. Це забезпечують п'ять антенних систем, розрахованих на різну довжину хвилі (метрову, дециметрову та сантиметрову).

Таблиця 1.3 – Параметри пасивної системи «Кольчуга»

| Параметр | Значення |
|--|--|
| Діапазон частот, ГГц | 0,135-0,170 0,230-0,470 ГГц 0,750-18 ГГц |
| Середньоквадратичне відхилення вимірювання частот, МГц | 0,4 |



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд пасивної системи Кольчуга

Комплекс виявлення та придушення БПЛА GLORY AIR [24] по заявленню виробників виконує розпізнавання, супровід, прийняття рішення про необхідну дію, залежно від типу та призначений для автоматизованої протидії несанкціонованому застосуванню БПЛА, ведення відеозйомки. Система являє собою пригнічувач дронів, оснащений скануючим приймачем, що працює в

найбільш часто використовуваних каналах зв'язку і управління БПЛА, а також оптоелектронною системою стеження.

Таблиця 1.4 – Підсистема виявлення радіоканалів управління БПЛА

| Параметр | Значення |
|--|---|
| Моніторинг та пеленгація частот | 840-940 МГц, 2400-2500 МГц, 5725-5850 МГц |
| Дистанція виявлення | до 3 км |
| Діаграма огляду | кругова |
| Точність визначення дистанції однією станцією: | не гірше 80 % |
| Кількість одночасно виявлених БПЛА | понад 40 |
| Час першого визначення | ≤ 3 с |
| Охоплення за азимутом | 360 градусів |
| Охоплення по кутку місця | 60 градусів |



Рисунок 1.4 – Радар виявлення та супроводження цілі

Радар призначений для виявлення БПЛА на відстані до 2 км. Завдяки спеціальним алгоритмам обробки відбитого сигналу, такі об'єкти, як птахи, повітряні судна підсвічуються на екрані оператора, але не класифікуються як

профільні, сигнал тривоги не подається. Радар виготовлений за технологією АФАР. Радар виявлення БПЛА до 3 км має характеристики, які показано в таблиці 1.4.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики системи GLORY AIR

| Параметр | Значення |
|-------------------------------|--|
| Антенна система | 3D: АФАР РЛС (імпульсний, Доплера) |
| Діапазон частот радара | C-band (5,5-5,8 ГГц) |
| Віддалення об'єкта | 2500-3000 км (БПЛА), ЕПР \approx 0.01 м ² |
| Кут перевищення цілі | \pm 20 градусів |
| Азимут цілі | 360 градусів |
| Точність визначення дистанції | \leq 5 м |
| Точність визначення азимуту | \leq 1 градуса |
| Визначення швидкості БПЛА | від 0,2 до 30 м/с |
| Точність визначення швидкості | \leq 0,2 м/с |
| Вага | \leq 80 кг |



Рисунок 1.5 – Модуль випромінювача радіоперешкод спрямованої дії (а) та з антенами кругової ДС

Комплекс «Рубіж-Автоматика» [25] було розроблено для одного з нафтопереробних заводів росії, що зумовлено недавніми атаками БПЛА на об'єкти нафтової інфраструктури в Саудівській Аравії. Російська система дозволяє вести безперервне радіоспостереження, фіксуючи сигнали БПЛА. Устаткування «Рубіж-

Автоматика» дозволяє створювати сигнали протидії та відзначати місцезнаходження БПЛА на карті.

В умовах прямої видимості комплекс може фіксувати польоти БПЛА на відстані до 15 кілометрів. Вже з відстані 4 км «Рубіж-Автоматика» дозволяє придушувати сигнали управління та навігації БПЛА, позбавляючи операторів дронів зв'язку з літальними апаратами. Маса компонентів комплексу складає 300 кг, що дозволяє розміщувати їх на автомобільному шасі.



Рисунок 1.7 – Системи перешкодового впливу – «Луч-ПРО» (а), та «Купол-ПРО»(б)

Система «Луч» впливає на канали навігації, управління та передачі інформації безпілотною, випромінюючи перешкоди одночасно в 11 діапазонах. Система працює за принципом «свій-чужий» – «Луч» не впливає на БПЛА, інформація про які заздалегідь внесена до бази даних комплексу. Дальність дії складає до 6 км.

Купол-ПРО – мобільний пристрій перешкодової дії на засоби зв'язку та управління безпілотних повітряних суден. Система призначена для захисту об'єктів шляхом загороджувального електромагнітного впливу на бортові радіоелектронні системи дрону та переведення їх у непрацездатний стан. Діє на дрони у певному периметрі. Має невеликий радіус дії – 2-2,5 км над територією, що охороняється.

Радіолокаційна станція "ЄНОТ" [26] розроблена для автоматичного виявлення безпілотних літальних апаратів малого класу, а також наземних та

надводних цілей, вимірювання координат та видачі цілевказівки оптико-електронним засобам та комплексам радіоелектронного придушення. Максимальна дальність виявлення типової цілі до 3 000 м (при прозорій атмосфері, пряма видимість, відсутність пасивних перешкод).

Ймовірність правильного виявлення не менше 0,8 при ймовірності хибної тривоги не більше 10^{-5} (шумова перешкода) для наступних характеристик типової цілі: ефективна поверхня розсіювання (ЕПР) не менше 0,01 м²; радіальна швидкість не менше 0,7 м/с).

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики системи «ЄНОТ»

| Параметр | Значення |
|--|---------------|
| Дальність виявлення малі БПЛА (ЕПР (0,01 м ²)) | 1 800 м |
| Діапазон робочих частот, МГц | 9200 - 9400 |
| Розмір зони огляду (азимут x кут місця), град. | 360 x 60 |
| Помилка виміру дальності, м | Не більше 2,0 |
| Помилка виміру азимуту, град. | Не більше 2,0 |
| Помилка виміру кута місця, град. | Не більше 5,0 |
| Мінімальна радіальна швидкість мети, що виявляється, м/с | Не більше 0,7 |
| Максимальна радіальна швидкість мети, що виявляється, м/с | Не менше 20,0 |
| Помилка вимірювання радіальної швидкості, м/с | Не більше 0,6 |
| Час оновлення інформації, з | Не більше 2,5 |
| Габаритні розміри (діаметр x висота), мм | 647 x 411 |
| Потужність, Вт | Не більше 80 |



Рисунок 1.8 – Антенна система РЛС ЄНОТ

Радіолокаційний комплекс виявлення маловисотних цілей «Роса-РБ» [27] призначений для автоматичного виявлення та супроводу маловисотних повітряних об'єктів, видачі трасової інформації до автоматизованої системи управління.

Забезпечує ефективне виявлення повітряних об'єктів на гранично малих висотах з малою ефективною відбивною поверхнею, здатна функціонувати в автоматичному режимі – без участі оператора. Має високу радіолокаційну скритність і перешкодозахищеність, працює без вимкнення на перерву не менше місяця. Система прийнята на озброєння в Білорусі у 2012 році.



Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд антенної системи РЛС "Роса-РБ"

Система виявлення дронів AATROS X7 [28] – це тривимірна радіочастотна система стеження, що включає в себе антенну решітку високої щільності з можливістю зміни частоти від 400 МГц до 8 ГГц. Діапазон виявлення БПЛА: від 3 до 7 км в залежності від умов.



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд системи виявлення БПЛА **AATROS X7**

Вдосконалена версія AARTOS X9 [28] працює з тією ж точністю, що і X7, але додатково пропонує безперебійний надширокопasmовий моніторинг завдяки чотирьом незалежним приймачам та оптимізованій групі підсилювачів. Завдяки величезній дальності дії до 50 км, AARTOS X9 ідеально підходить для моніторингу великих територій. Система вже зарекомендувала себе у таких міжнародних аеропортах, як Хітроу та Маскат.

Система виявлення БПЛА від СТЦ (Спеціальний технологічний центр) [29] – цей комплекс прихованої локації дозволяє виявляти моделі, що здійснюють політ у режимі радіомовчання, та підвищує ймовірність виявлення в умовах поганої погоди.

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики системи виявлення від СТЦ

| Параметр | Значення |
|--|---|
| Дальність радіопридушення в секторі 1200 за азимутом та 900 за кутом місця | до 5 км |
| Діапазон робочих частот | 225-510, 800-900, 1100-1800, 2200-2500, 4400-5850 МГц |
| Енергетичний потенціал | не менше 50 Вт |



Рисунок 1.11 – Станція боротьби з радіокерованими авіаційними моделями

Система виявлення та протидії БПЛА AUDES [30]– це стаціонарна система для виявлення та протидії безпілотникам, що належить до класу систем радіоелектронної боротьби РЕМ/РЕБ.

Радар Blighter A400, що працює в Ku-діапазоні показано на рисунку 1.12 з правої сторони. Потужність радара невелика – всього 4 Вт, але цього цілком вистачає, щоб виявляти цілі розміром від 0,01 м² на відстані від 8 км. Сектор дії радара – 180 градусів по азимуту. Система орієнтована переважно на боротьбу з великими військовими БЛА, малі цивільні модифіковані у "бомбардувальники" БЛА вона засікає з 2,5 км.

Також у системи встановлена камера компанії Chess Synamics із оптичним 30-ти кратним зумом. Націлювати її допомагає термокамера Gen 3 Cooled. Камери встановлені на єдиному електрокерованому підвісі із системою РЕБ компанії Enterprise Control Systems Ltd. (Три "труби" спрямованих антен на рисунку 1.12).



Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд камер (зліва) системи виявлення та радар Blighter A400 (справа)

Система може створювати локальні перешкоди для безпілотної-порушника на частотах, які використовуються для зв'язку з пультом дистанційного керування. Втративши зв'язок з оператором деякі дрони просто падають, складніші моделі можуть повертатися в точку старту в автоматичному режимі. Ймовірно, що навіть у ситуації, коли безпілотної ніким не управляється, а рухається по "точках" записаного в його пам'яті маршруту, його можна зупинити, створюючи перешкоду на частотах систем супутникової навігації GPS/ГЛОНАСС.

Оптичні та інфрачервоні методи виявлення часто застосовуються в парі або як додаткові для більш масштабних систем. Не виключається застосування для конкретної військової або цивільної задачі, як от моніторинг аеропортів або повітряного простору міст. Основним недоліком оптичних систем виявлення є ускладнене використання в нічний час та в умовах хмарності. Інфрачервоні системи орієнтовні на відстежування теплового треку від моторів БПЛА. Для виявлення великих повітряних цілей з гарячими моторами – гвинтокрилів, великих

ударних БПЛА або літаків – такі системи застосовуються ефективно у складі комплексів. Але у задачах виявлення тихохідних БПЛА або комерційних, малих за розмірами краще показують себе інші принципи (оптичні, радіотехнічні, акустичні).

Оптична система виявлення SkyPatriot [31, 32] має велику базу даних підписів і профілів безпілотних літальних апаратів для точної ідентифікації та класифікації. Може бути розгорнута як стаціонарна самостійна установка, як частина мобільної установки або у поєднанні з більшою системою. Область виявлення складає до 2 км для цілей типу DJI Phantom, час виявлення – 2 с. Система має механічний 30-ти кратний оптичний зум.



Рисунок 1.13 – Зовнішній вигляд оптичної системи виявлення **SkyPatriot**

Ізраїльська система SKYLOCK [33] за допомогою зображень високої роздільної оптичної здатності має можливість виявляти, ідентифікувати та відстежувати до 200 безпілотних літальних апаратів одночасно на відстані до 2,5 км залежно від погодних умов та розміру цілі. Призначена для спостережень переважно в міських умовах та аеропортах.



Рисунок 1.14 – Оптична система спостереження за БПЛА

Існують умови за яких необхідно протидіяти БПЛА в зоні прямої видимості, в зоні людського зору. Узагальнити такий клас систем можна назвавши їх переносними та ручними, оскільки вони повинні бути зручними для застосування людиною. Основним ручним засобом протидії малим БПЛА є анти-дронові рушниці. Зараз вони активно представлені в різних країнах, але за змістом виконують однакові задачі: перехоплення дрона по променю та його кероване приземлення або знищення. Також можуть виконувати роль постановника перешкод в зоні прямого доступу до БПЛА. Самостійно такі системи мають малий радіус дії, тому для знищення БПЛА їх доцільно використовувати в парі з системами виявлення. Такі системи є не тільки на озброєнні в армії, а й у органів правопорядку. Технічні характеристики таких систем приблизно однакові, оскільки розраховані на протидію серійним цивільним дронам.

Тайванська система SkyNet [34] – це пристрій, що важить близько 5,7 кг (не рахуючи рюкзак з блоком живлення), заряджається за 90 хвилин, працює 15 годин у режимі очікування або 2 години при активному використанні. Дальність "стрільби" – 2 км. Система здатна блокувати сигнал GPS та відеопотік із камери дрона.



Рисунок 1.15 – Застосування «антидронові» рушниці

Іспанська система GALILEO виконує подавлення всіх діапазонів GNSS (1,2/1,5 та 1,6 ГГц) придушення телеметричного діапазону 2,4 ГГц, подавлення телеметрії та/або відео діапазону 5,8 ГГц. Діапазон виявлення 2 км.



Рисунок 1.16 – Зовнішній вигляд «антидронові» рушниці

Недолік такого типу протидії БПЛА в тому, що при захопленні БПЛА в діаграму спрямованості системи його необхідно постійно утримувати до моменту падіння адже зв'язок з оператором може відновитися.

Британська Система SkyWall 100 [35] – це нетиповий спосіб протидії, що полягає в застосуванні ручного «гранатомету», який вистрілює сітку для упіймання дрону. Дальність дії – 100 метрів.



Рисунок 1.17 – Застосування системи SkyWall 100

Такий тип систем доцільно використовувати для захисту на аеродромах від несакціонованого прольоту БПЛА. В міській забудові неконтрольоване падіння відносно великого дрону може призвести до небажаних руйнувань та може бути небезпечно для жителів міст.

Система DroneBullet [36] – це протидроновий безпілотно-камікадзе, гібрид кишенькової ракети та квадрокоптера. Малі безпілотноки атакує знизу, великі – зверху, цілячи туди, де розташовані системи супутникової навігації та незахищені гвинти.



Рисунок 1.18 – Зовнішній вигляд БПЛА-знищувача

В даний момент також ведеться розробки лазерних та НВЧ систем для ураження БПЛА. Імовірно, турецька лазерна система, яка скомпонована на броневих автомобілі, в Лівії збила БПЛА Wing Loong II китайського виробництва. Заявлена потужність – 50 кВт.



Рисунок 1.19 – Експериментальні лазерні установки

Система Phaser [37] являє собою потужний НВЧ-випромінювач, розміщений на даху 6-метрового транспортного контейнера. Радар, наприклад MPQ-64 Sentinel або Close Combat Tactical Radar, виявляють ворожий БЛА, що дозволяє націлити на нього випромінювач. Phaser, який працює від дизельного генератора, видає імпульс НВЧ випромінювання, який ушкоджує бортову систему управління БПЛА. Це відрізняє "Phaser" від численних засобів РЕБ, які ставлять перешкоди з метою порушити роботу каналу дистанційного керування безпілотником.

На відміну від лазерних протидронних систем, які руйнують дрон механічно, за рахунок його сильного дистанційного нагріву, Phaser, що дистанційно формує в електричних ланцюгах наведені струми, здатний знищувати цілі групи БЛА без необхідності перенаправляти фокус випромінювача на кожен пристрій у "рої".



Рисунок 1.19 – Зовнішній вигляд системи Phaser

В сучасних системах можуть використовувати не один принцип виявлення, наприклад оптичні системи найкраще застосовуються вдень в ясну погоду. Як тільки умови змінюються, а це наприклад настання ночі, або хмарна погода або опади, доцільно доповнювати такі системи інфрачервоними або тепловізійними засобами, які в той же час також мають свої обмеження. Наприклад для інфрачервоного методу виявлення негативним фактором також буде несприятлива погода і той факт, що мотори БПЛА не можуть нагріватися настільки сильно, щоб буди завжди помітними.

Ручні системи, а саме «атнидронові» пушки або сітки при їх відносно невеликій вартості, все ж мають серйозний недолік в дальності виявлення та дальності ефективного враження. При цьому характеристики та робочі частоти таких ручниць відомі.

Активні радіолокаційні системи виявлення хоч і мають найбільшу дальність виявлення, проте мають і сліпу зону, а також не ефективні при виявленні малорозмірних об'єктів. А нові композитні матеріали з яких виробляють БПЛА, можуть буди спеціально розроблені, щоб бути непомітними для деяких діапазонів довжин хвиль. Недоліком таких систем також є їх помітність при включенні радару оскільки, щоб виконувати активне зондування на великій відстані потужність випромінюваного сигналу теж повинна бути немалою.

Будь-який з метод має свої переваги і недоліки, проте об'єднує їх той факт, що одночасно ведуться дослідження з розроблення методів і засобів зниження помітності БпЛА у зазначених діапазонах. Як наслідок виникає протиріччя: з одного боку розробники засобів виявлення та боротьби з БпЛА постійно підвищують точність та надійність вимірювань, а з іншого боку – на момент отримання результатів вони вже є застарілими та не актуальними по відношенню до розвинутих засобів зниження помітності. Подолати це протиріччя можливо за рахунок застосування пристроїв та систем пасивної радіолокації. Такі системи є скритними, надчутливими та здатні реєструвати власне радіотеплове випромінювання літальних апаратів, в тому числі виконаних з композитних матеріалів, в широкому спектрі частот на тлі випромінювання атмосфери в будь-яку погоду, вдень та вночі.

В безхмарну та ясну погоду радіометричні вимірювання у W діапазоні дозволяють отримати високоточні оцінки просторового положення БпЛА, у X діапазоні – надійні спостереження в дощ, сніг, мряку, туман, а Ка діапазоні, завдяки розвинутій в Україні технології створення широкосмугових приймачів, підвищити загальну флуктуаційну чутливість радіометричного комплексу.

1.2. Огляд існуючих схем побудови радіометрів

Радіометри – це приймачі власного радіотеплового випромінювання (РТВ) різноманітних об'єктів. Радіометри зазвичай виявляють і вимірюють прирости температур або контрасти, які пропорційні відповідним збільшенням середньої потужності РТВ. Вони широко застосовуються в радіоастрономії, дистанційному зондуванні Землі, медицині, метеорології тощо.

Розглянемо докладніше основні структурні схеми сучасних радіометрів, їх відмінності та чим викликана їхня поява. Необхідно відразу відзначити, що побудова всіх наведених нижче радіометрів ґрунтується на рекомендаціях практичного досвіду експлуатації, а не в результаті вирішення статистичних задач синтезу.

Першою схемою підключення є радіометр повної потужності. Ця назва виникла від того, що коли вихід антени підключити до супергетеродинного приймача, а потім на виході квадратичного детектора виміряти струм, то такий прилад, а саме радіометр, покаже повну потужність вхідного шумового процесу – власного шуму і корисного сигналу.

Щоб виділити невелику величину струму корисного сигналу від цілі, який на кілька порядків за величиною менший власних шумів приймача, до детектору підключають спеціальне джерело, що може компенсувати струм від власного шуму приймача. Дана схема побудови радіометра у літературі має назву компенсаційна схема. (рис. 1.20).

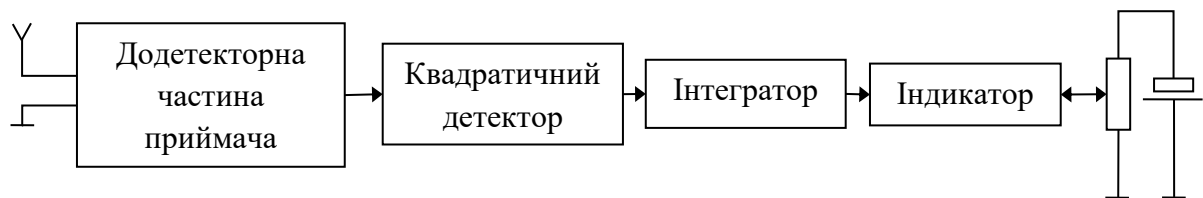


Рисунок 1.20 – Структурна схема компенсаційного радіометра

Наведена вище схема компенсаційного радіометра це найпростіша схема, а також її принципова чутливість вища, ніж у будь-якої іншої. Проте компенсаційний радіометр недоцільно реалізовувати практично через нестабільність у часі коефіцієнта посилення його вхідного тракту.

Подальшим розвитком радіометричних систем можна вважати схему з компенсацією, в якій відбувається стеження за флуктуаційним коефіцієнтом посиленням. Через весь тракт радіометра проходить спеціальний пілот-сигнал, який створює компенсаційний струм. Ця схема отримала назву радіометр з пілот-сигналом (рис. 1.21).

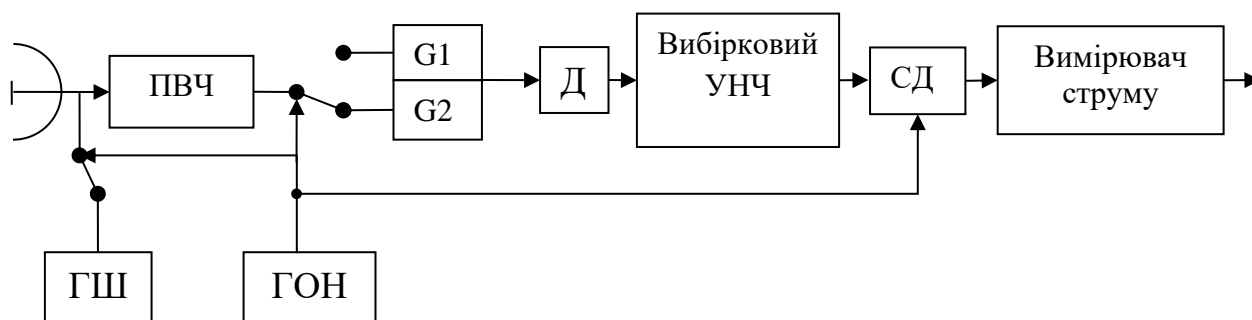


Рисунок 1.21 – Радіометр з пілот-сигналом

Така схема має свої складнощі в реалізації: по-перше, джерело пілот-сигналу має бути досить стабільним; по-друге, якщо пілот-сигнал монохроматичний і йому виділяється невелика частина робочої смуги частот, то такий сигнал може містити інформацію про зміни тільки в цій вузькій частині частот.

Якщо по всій смузі радіометра буде розподілено шумовий пілот-сигнал, а його селекцію та селекцію корисного сигналу проводити за часом, наприклад, комутуючи по черзі відповідні джерела, то така схема має назву модуляційна. Джерелом пілот-сигналу в такому випадку є антенний еквівалент, а на частоті модуляції на виході виконується реєстрація різниць температур антени та зразка. Структура побудови цієї схеми наведена на рис. 1.22.

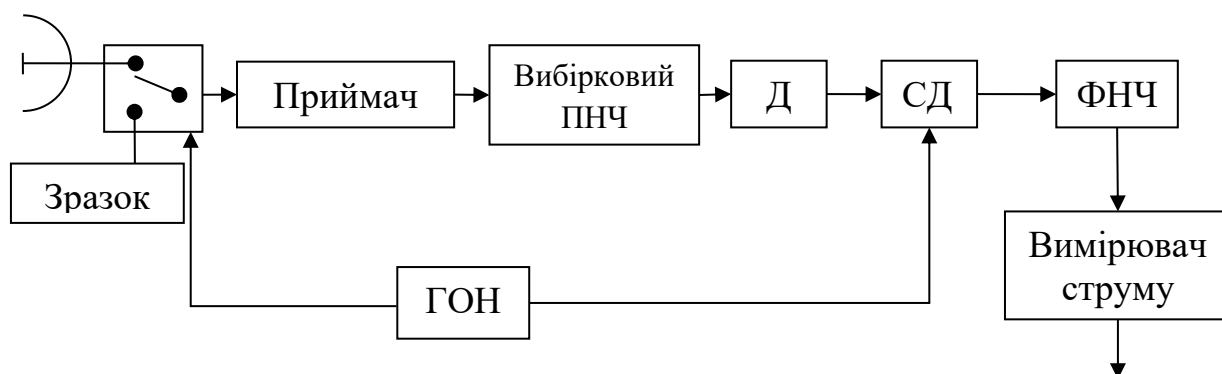


Рисунок 1.22 – Одноканальний модуляційний радіометр

Керуючись сигналами від генератора опорної напруги модулятор по черзі підключає на вхід приймача сигнали від антени та від шумового зразка. В результаті модуляція посиленої напруги відбувається з низькою частотою (від

10-кГц до 1 кГц), а глибина модуляції залежить від різниці прийнятого і еталонного сигналів.

Така модуляція сигналу зберігається після детектування. Синхронний детектор необхідний для виділення корисного сигналу. Опорна напруга детектора формується за допомогою синхронізатора, який керує модулятором. Вихід детектора створює напругу, яка буде пропорційна різниці температур антени та антенного зразка. В ролі інтегратора використовується ФНЧ, що буде визначати смугу пропускання Δf . Вперше ця схема була запропонована в 1946 американським фізиком Робертом Генрі Дікке [38].

Суттєвим недоліком є те, що джерело корисного сигналу підключається до приймача тільки половину часу, і через це чутливість модуляційної схеми не менше ніж в два рази гірша, ніж у компенсаційної. Проте така схема легко реалізується, тому має велике практичне значення і використовується частіше.

Поява флуктуацій в радіометрах виникає внаслідок реєстрації власного шуму приймача, що промодульований такими флуктуаціями. Виникає потреба позбутися таких негативних впливів. Зі схем, що усувають такий ефект, найбільшого поширення набула схема кореляційного радіометра.

Структура радіометра кореляційного типу наведено на рис. 1.23. Схема містить два фільтри високих частот (ФВЧ), 1 і 2, вихідні напруги яких перемножуються, результат подається на вихідний фільтр низької частоти (ФНЧ).

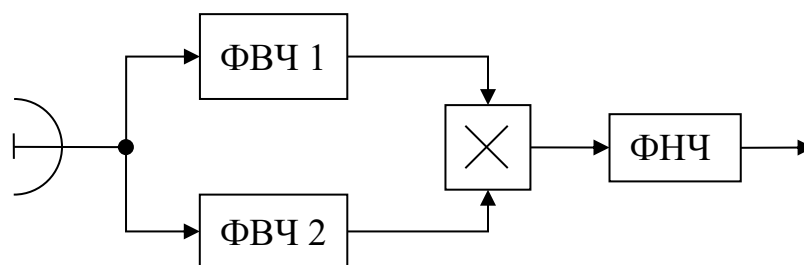


Рисунок 1.23 – Структурна схема радіометра за кореляційним принципом

Головною перевагою є те, що на виході радіометра вдається позбутися квадратурної складової внутрішнього шуму, яка є характерною для радіометрів модуляційного і компенсаційного типу. Однак якщо шуми в 1-му та 2-му каналі

залежні, то на виході помножувача з'явиться постійна складова, що пропорційна функції взаємної кореляції шумів в цих каналах.

Іншим серйозним недоліком кореляційного радіометра є сильний вплив неідентичності фазо-частотних характеристик каналів на відношення сигнал/завада. Також кореляційний радіометр схильний до флуктуацій фазо-частотних характеристик каналів.

Враховуючи всі вище наведені недоліки, кореляційний радіометр є менш надійним, ніж інші схеми радіометрів. Однак кореляційний радіометр необхідний для багатоканальних радіотехнічних систем, що визначають точні координати цілей.

З теорії відомо, що для зменшення нестабільності коефіцієнта посилення є можливість використовувати порівняльні вимірювальні системи. У таких системах прийнята величина порівнюється з деяким еталоном, а момент їх рівності фіксується за допомогою індикатора. Оскільки схеми з порівнянням значення зафіксованої величини з еталоном проводять реєстрацію, коли така різниця мінімальна, інша назва таких систем – нульові.

При побудові нульової схеми радіометра зручно використовувати модуляційний принцип, оскільки знижується вплив аномальних флуктуацій та досягається максимальна простота функціональної схеми. Функціональна схема нульового модуляційного радіометра зображена на рис. 1.24.

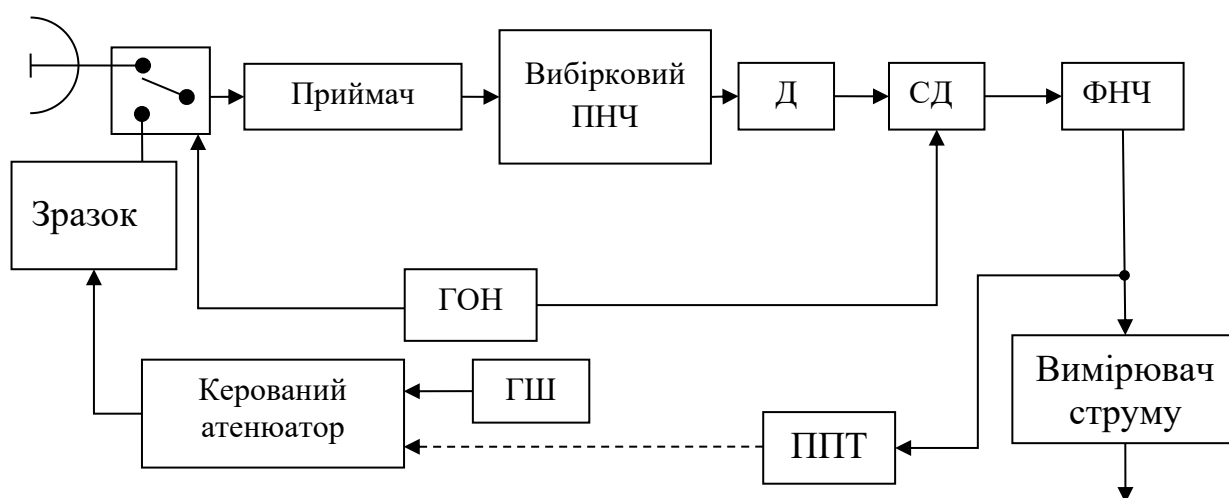


Рисунок 1.24 – Нульовий модуляційний радіометр

Оскільки модуляційний радіометр вимірює різницю між антеною та температурою на виході антенатора точність вимірювання визначатиметься лише чутливістю радіометра.

У більшості розглянутих схем основною проблемою є нестабільність коефіцієнта підсилення, що негативно впливає на результати вимірювань. При цьому розробка методів синтезу базувалася на евристичному підході та узагальненні інженерного досвіду експлуатації НВЧ апаратури. Однак даний підхід не дозволяє визначити потенційні можливості радіометричної апаратури та граничні характеристики точності оцінювання параметрів дослідження. У зв'язку з викладеним актуальним є завдання статистичного синтезу оптимальних методів, алгоритмів та структур НВЧ радіометрів, для виявлення контрастів об'єктів на тлі внутрішніх шумів приймача. Розв'язання задачі в роботі забезпечується на основі узагальненої теорії статистичного синтезу, аналізу та атестації методів виявлення, оцінки та фільтрації параметрів РТВ в радіометрах з нестабільним коефіцієнтом підсилення приймача.

1.3. Теоретичні основи синтезу оптимальних методів обробки сигналів радіотеплового випромінювання

При синтезі на аналізі роботи пасивних радіотехнічних систем чи не найголовнішою задачею є виявлення шумоподібних сигналів, зокрема власного радіотеплового випромінювання нагрітих об'єктів. Типовим прикладом таких систем можуть бути радіометричні системи у задачах радіоастрономії, дистанційного зондування Землі, метеорології та радіолокаційні системи для радіотеплолокації.

Відома [39] класична схема виявника шумових (радіотеплових) сигналів, а саме енергетичний приймач. Алгоритм в такій системі оптимальний при обробці дискретизованих шумових процесів з обмеженим спектром. При переході до практичної реалізації приймачів у НВЧ діапазоні виникає ряд складнощів, зокрема

технічні характеристики сучасних АЦП та їх вартість. На практиці доводиться часто стикатися з задачею обробки даних з радіометра, які є аналоговими та шумовими, та які мають довільний спектр. У такому разі наведена у літературі [39] структура не оптимальна.

Завдання полягає в тому, щоб синтезувати оптимальний алгоритм виявлення шумових сигналів з довільним енергетичним спектром і проаналізувати ймовірності й енергетичні характеристики для різних співвідношень сигнал/шум.

Запишемо рівняння спостереження, що описує сигнали на вході радіометра, на інтервалі часу $(0, T)$ та яке має вигляд:

$$u(t) = \varepsilon s(t) + n(t) \quad (1.1)$$

де $s(t)$ – корисний шумовий сигнал,

$n(t)$ – адитивна перешкода,

ε – коефіцієнт наявності корисного сигналу, який приймає значення 0 або 1.

Процеси $s(t)$ і $n(t)$ – гаусівські дельта-корельовані, стаціонарні та взаємно незалежні випадкові процеси з нульовими математичними очікуваннями $\langle s(t) \rangle = 0$, $\langle n(t) \rangle = 0$ та енергетичними спектрами (спектральними щільностями потужності, СЦП) N_{0s} і N_{0n} . Сигнал $s(t)$ в одному випадку може бути присутнім, і тоді коефіцієнт ε дорівнює одиниці або бути відсутнім, тобто ε рівний 0. Для задач виявлення радіотеплових сигналів доцільно користуватися такими параметрами, як яскравісна температура сигналу T_s° і яскравісна температура завади T_n° , які співвідносяться зі спектрами наступними виразами:

$$\begin{aligned} N_{0s} &= kT_s^\circ, \\ N_{0n} &= kT_n^\circ, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де k – стала Больцмана, Дж/К.

Рішення про наявність чи відсутність сигналу приймається внаслідок перевищення чи не перевищення відношенням правдоподібності деякого [39]

$$\frac{p(u/1)}{p(u/0)} >, \text{ або } < \frac{p(0)}{p(1)}, \quad (1.3)$$

де $p(u/\varepsilon=1) = p(u/1)$ – функція правдоподібності при наявності корисного сигналу;

$p(u/\varepsilon=0) = p(u/0)$ – функція правдоподібності при відсутності корисного сигналу.

Спочатку можна припустити, що процеси $s(t)$ та $n(t)$ це випадкові процеси з обмеженим спектром у вигляді прямокутника, тобто записати наступним чином:

$$G_s(f) = \begin{cases} 0,5N_{0s}, & f \in (-\Delta f, \Delta f); \\ 0, & f \notin (-\Delta f, \Delta f), \end{cases}$$

$$G_n(f) = \begin{cases} 0,5N_{0n}, & f \in (-\Delta f, \Delta f); \\ 0, & f \notin (-\Delta f, \Delta f). \end{cases}$$

Відповідно до теореми Хінчина – Вінера можна записати їх кореляційні функції в такому вигляді:

$$\begin{aligned} R_s(\tau) &= F^{-1}[G_s(f)] = \sigma_s^2 \text{sinc}(2\pi \Delta f \tau), \\ R_n(\tau) &= F^{-1}[G_n(f)] = \sigma_n^2 \text{sinc}(2\pi \Delta f \tau), \end{aligned} \quad (1.4)$$

Тоді дисперсії цих процесів $s(t)$ та $n(t)$ відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 &= \frac{N_{0s}}{2} 2\Delta f = N_{0s} \Delta f = kT_s^\circ \Delta f \\ \sigma_n^2 &= N_{0n} \Delta f = kT_n^\circ \Delta f \end{aligned} \quad (1.5)$$

В точках $\tau = \frac{1}{2\Delta f}$ кореляційні функції (1.4) дорівнюють нулю. Далі необхідно здійснити дискретизацію процесів $s(t)$ та $n(t)$ через інтервали $\Delta t = \tau$, відповідно до теореми Котельникова, при цьому відліки сигналів стають некорельваними. Число таких відліків на інтервалі $t \in (0, T)$ описується наступною формулою:

$$M = T/\Delta t = 2T\Delta f \quad (1.6)$$

Оскільки окремо відліки розподілені за нормальним законом, то спільні густини ймовірностей дискретизованих процесів $\vec{s} = \|s_1, s_2, \dots, s_M\|$ та $\vec{n} = \|n_1, n_2, \dots, n_M\|$ будуть мати вигляд:

$$p(\vec{s}) = p(s_1, s_2, \dots, s_M) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} \sigma_s^M} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_s^2} \sum_{i=1}^M s_i^2\right), \quad (1.7)$$

$$p(\vec{n}) = p(n_1, n_2, \dots, n_M) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} \sigma_n^M} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=1}^M n_i^2\right). \quad (1.8)$$

Щільність ймовірності сумарного дискретизованого сигналу (1.1) при $\varepsilon = 1$, буде рівна

$$p(\vec{s} + \vec{n}) = \frac{1}{[2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)]^{M/2}} \exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^M s_i^2 + n_i^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}\right). \quad (1.9)$$

Щоб розрахувати функції правдоподібності для безперервних випадкових процесів необхідно виконати граничні переходи за умов $\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta f \rightarrow \infty$, $\sigma_s^2 = N_{0s} / (2\Delta t)$:

$$p(u/0) = \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} (\Delta f N_{0n})^{\frac{M}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{N_{0n}} \int_0^T u^2(t) dt\right), \quad (1.10)$$

$$p(u/1) = \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{M}{2}} [\Delta f (N_{0s} + N_{0n})]^{\frac{M}{2}}} \exp\left(-\frac{\int_0^T u^2(t) dt}{N_{0s} + N_{0n}}\right). \quad (1.11)$$

У безперервному варіанті для процесів білого шуму можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{p(u/1)}{p(u/0)} &= \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \left(\frac{N_{0n}}{[N_{0s} + N_{0n}]}\right)^{\frac{M}{2}} \exp\left(-\frac{\int_0^T u^2(t) dt}{N_{0s} + N_{0n}} + \frac{\int_0^T u^2(t) dt}{N_{0n}}\right) = \\ &= \left\{ \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \left(\frac{T_n^\circ}{[T_s^\circ + T_n^\circ]}\right)^{\frac{M}{2}} \exp\left(\frac{N_{0s} \int_0^T u^2(t) dt}{N_{0n} (N_{0s} + N_{0n})}\right) \right\} >, \text{ або } < \frac{p(0)}{p(1)}, \end{aligned}$$

де $\Delta f = 1/2\Delta t$.

Видно, що ці вирази правдоподібності є монотонно зростаючими функціями для величини $\int_0^T u^2(t) dt$. Тому достатньо порівнювати ці величини, які стають для такої задачі достатніми статистиками. Таким чином розв'язання задачі виявлення можна описати виразом

$$Y = \int_0^T u^2(t) dt >, \text{ або } < Y_0, \quad (1.12)$$

Y – вихідний ефект оптимального виявника,

Y_0 – порогове значення вихідного ефекту.

Структурну схему оптимального виявника зображено на рис. 1.25.

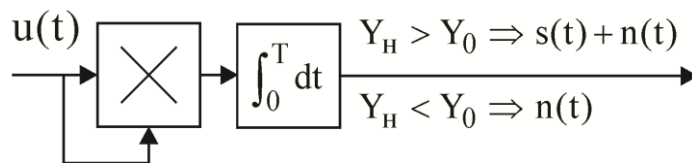


Рис. 1.25 – Оптимальний виявник шумових сигналів

Імовірними характеристиками виявлення є вірогідність правильного виявлення

$$D(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} p(Y/1) dY$$

та ймовірність помилкової тривоги

$$L(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} p(Y/0) dY.$$

Для їхнього визначення необхідно знати диференціальні закони розподілу ймовірностей $p(Y/1), p(Y/0)$. У виразах (12) значення $u(t)$ розподілені за нормальним законом, $u^2(t)$ по закону χ^2 , а значення $\int_0^T u^2(t) dt$ по закону χ^2 з M ступенями свободи. На практиці число M може становити дуже великі значення, навіть мільйони. Тому величину $Y = \int_0^T u^2(t) dt$ через центральну граничну теорему Ляпунова можна вважати розподіленою за нормальним законом, і записати її можна в наступному вигляді:

$$p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} \exp\left(-\frac{(Y - \langle Y \rangle)^2}{2\sigma_Y^2}\right). \quad (1.13)$$

Для конкретизації $D(Y_0)$ та $L(Y_0)$ визначено відповідні математичні очікування та дисперсії

$$\langle Y_n(u/0) \rangle = T N_{0s} \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f = T k T_n^\circ \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f, \quad (1.14)$$

$$\langle Y_n(u/1) \rangle = T (N_{0s} + N_{0n}) \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f = T k (T_s^\circ + T_n^\circ) \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f, \quad (1.15)$$

$$\langle Y_n^2(u/0) \rangle = [\langle Y_n(u/0) \rangle]^2 + T (N_{0n})^2 \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f, \quad (1.16)$$

$$\langle Y_n^2(u/1) \rangle = [\langle Y_n(u/1) \rangle]^2 + T (N_{0s} + N_{0n})^2 \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f, \quad (1.17)$$

$$D[Y_n(u/0)] = T (N_{0n})^2 \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f = T (k T_n^\circ)^2 \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f, \quad (1.18)$$

$$D[Y(u/1)] = T (N_{0s} + N_{0n})^2 \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f = T [k (T_s^\circ + T_n^\circ)]^2 \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \Delta f. \quad (1.19)$$

Алгоритм (1.12) для процесу $u(t)$ з обмеженим спектром та білим шумом $n(t)$ є оптимальним. Але для шумового процесу $u(t)$ у випадку з довільним енергетичним спектром

$$G_u(f) = G_s(f) + G_n(f)$$

він не є оптимальним. В такому випадку оптимальний вихідний ефект дорівнює:

$$Y_w = \int_0^T u_w^2(t) dt >, \text{ або } < Y_0, \quad (1.20)$$

де $u_w(t)$ – шумовий сигнал на виході оптимального декорелюючого фільтра, з імпульсною характеристикою $h_w(t-\tau)$ та частотною характеристикою $\dot{K}_w(j2\pi f)$ та дорівнює

$$u_w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) h_w(t-\tau) d\tau = \varepsilon s_w(t) + n_w(t) \quad (1.21)$$

$$h_w(t-\tau) = F^{-1} [\dot{K}_w(j2\pi f)], \quad |\dot{K}_w(j2\pi f)|^2 = \frac{G_s(f)}{[G_s(f) + G_n(f)]^2}. \quad (1.22)$$

Оптимальний виявник сигналів з довільним спектром має структурну схему, яку зображено на рис. 1.26.

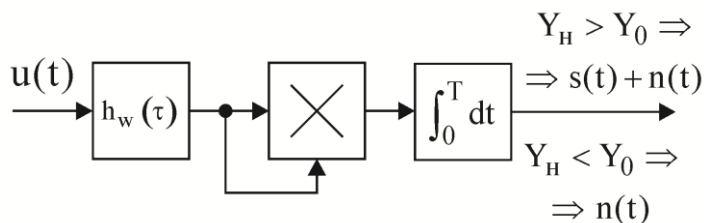


Рисунок 1.26 – Оптимальний виявник

Спектри процесів $u_w(t)$ за наявності або відсутності в них корисного та завадового шумового сигналу рівні:

$$G_{wn}(f) = G_n(f) |\dot{K}_w(j2\pi f)|^2 = \frac{G_n(f)G_s(f)}{[G_s(f) + G_n(f)]^2},$$

$$G_{ws}(f) = G_s(f) |\dot{K}_w(j2\pi f)|^2 = \frac{G_s^2(f)}{[G_s(f) + G_n(f)]^2},$$

$$G_{w(s+n)}(f) = [G_s(f) + G_n(f)] |\dot{K}_w(j2\pi f)|^2 = \frac{G_s(f)}{G_s(f) + G_n(f)}.$$

Статистичні характеристики вихідний ефект (1.12) та вихідного ефекту (1.20) для процесів $u(t)$ та $u_w(t)$ з обмеженими спектрами будуть однакові.

Знайдемо математичні сподівання та дисперсії для (1.20), що має місце під час обробки шумового сигналу. При цьому треба мати на увазі, що процес $u_w(t)$ є результатом проходження білого шуму, через деякий фільтр, та враховує коефіцієнти передачі елементів первинного тракту прийому $\dot{K}(j2\pi f)$ та пристроїв оптимальної фільтрації $\dot{K}_w(j2\pi f)$, з результуючою АЧХ

$$|\dot{K}_p(j2\pi f)| = |\dot{K}_w(j2\pi f) \dot{K}(j2\pi f)|.$$

Енергетичні спектри процесів $s_w(t)$ та $n_w(t)$ при цьому будуть рівні

$$G_{ws}(f) = \frac{N_{0s}}{2} |\dot{K}_p(j2\pi f)|^2, G_{wn}(f) = \frac{N_{0n}}{2} |\dot{K}_p(j2\pi f)|^2. \quad (1.23)$$

Математичні сподівання

$$\langle Y_w(u/0) \rangle = T \int_{-\infty}^{\infty} G_{wn}(f) df = T \frac{N_{0n}}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_p(j2\pi f)|^2 df = TN_{0n} K_0^2 \Delta f_w = Tk T_n^\circ K_0^2 \Delta f_w, \quad (1.24)$$

$$\langle Y_w(u/1) \rangle = T(N_{0s} + N_{0n}) K_0^2 \Delta f_w = Tk(T_s^\circ + T_n^\circ) K_0^2 \Delta f_w, \quad (1.25)$$

де

$$\sigma_{wn}^2 = \langle n_w^2(t) \rangle = \frac{N_{0n}}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_p(j2\pi f)|^2 df = N_{0n} K_0^2 \Delta f_w, \quad (1.26)$$

$$\sigma_{w(s+n)}^2 = (N_{0s} + N_{0n}) K_0^2 \Delta f_w \quad (1.27)$$

$\sigma_{w(s+n)}^2$ – дисперсії випадкових процесів $n_w(t)$ та $s_w(t) + n_w(t)$,

$2\Delta f_w = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_{норм}(j2\pi f)|^2 df$ – смуга пропускання, при оптимальній фільтрації з АЧХ

виду (1.22),

$\dot{K}_{норм}(j2\pi f) = \dot{K}_p(j2\pi f) / \dot{K}_0$ – нормований коефіцієнт передачі,

K_0 – коефіцієнт посилення на центральній частоті АЧХ.

Другий момент $Y_w(u/0)$ та дисперсія:

$$\begin{aligned} \langle Y_w^2(u/0) \rangle &= \left[\int_0^T \langle n_w^2(t) \rangle dt \right]^2 + 2\sigma_{wn}^2 \int_0^T \int_0^T r_{wn}^2(t_1 - t_2) dt_1 dt_2. \\ \sigma_{(Y/0)w}^2 &= 2\sigma_{wn}^2 \int_0^T \int_0^T r_{wn}^2(t_1 - t_2) dt_1 dt_2. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Після заміни змінних у подвійному інтегралі ($t_1 - t_2 = \tau$, $t_1, t_2 = t$), отримаємо [40]:

$$\int_0^T \int_0^T r_{wn}^2(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 = T \int_{-T}^T \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) r_{wn}^2(\tau) d\tau \approx T \int_{-\infty}^{\infty} r_{wn}^2(\tau) d\tau = \alpha \Delta \tau, \quad (1.29)$$

$$\text{де } \Delta\tau = \int_{-\infty}^{\infty} r_{\text{wn}}(\tau) d\tau = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_{\text{норм}}(j2\pi f)|^2 df} = \frac{1}{2\Delta f_w}.$$

У [41, розд. 2] показано, що величина α залежить від форми АЧХ і, як правило, наближається до одиниці.

Тоді

$$\sigma_{(Y/0)w}^2 = T(N_{0n}K_0^2)^2 \Delta f_w = T(kT_n^\circ K_0^2)^2 \Delta f_w. \quad (1.30)$$

А дисперсія величини $Y_w(u/1)$ дорівнює

$$\sigma_{(Y/1)w}^2 = T[(N_{0s} + N_{0n})K_0^2]^2 \Delta f_w = T[k(T_s^\circ + T_n^\circ)K_0^2]^2 \Delta f_w. \quad (1.31)$$

Тут величина M виконує роль відношення сигнал/завада, якщо брати до порівняння завдання виявлення шумового сигналу в пасивній системі з виявленням в активній радіолокації. Ця величина дорівнює числу некорельованих відліків шумового процесу, під час усереднення на інтервалі часу спостереження. В формулах (1.30), (1.31) величина $\xi = K_0^2$. Таким чином:

$$\begin{aligned} p(Y/0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y/0}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(Y - 0,5M \xi k T_n^\circ)^2}{0,5M (\xi k T_n^\circ)^2}\right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y/0}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{Y}{\sigma_{Y/0}} - \sqrt{0,5M}\right]^2\right\}, \quad (1.32) \\ p(Y/1) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y/1}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(Y - 0,5M \xi k (T_s^\circ + T_n^\circ))^2}{0,5M [\xi k (T_s^\circ + T_n^\circ)]^2}\right) = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y/1}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{Y}{\sigma_{Y/1}} - \sqrt{0,5M} \right]^2 \right\}. \quad (1.33)$$

Цікавим є перехід у (1.32) і (1.33) до нормованих випадкових величин $Y/\sigma_{Y/1}$, $Y/\sigma_{Y/0}$:

$$\langle Y/\sigma_{Y/1} \rangle = \langle Y/\sigma_{Y/0} \rangle = \sqrt{0,5M} = \sqrt{T\Delta f}.$$

Величина ξ не впливає на ймовірнісні характеристики виявлення та її можна прийняти рівною одиниці. Відповідно мають бути пронормовані дисперсії $\sigma_Y(Y/1)$ та $\sigma_Y(Y/0)$.

Для наочного пояснення подальших досліджень необхідно перейти від випадкових величин Y до величин $\eta = Y/0,5Mk$. Вони також гаусові, математичними сподіваннями та дисперсіями, які розраховані за формулами:

$$\langle \eta(u/0) \rangle = \left\langle \frac{Y(u/0)}{0,5Mk} \right\rangle = T_n^\circ, \quad (1.34)$$

$$\langle \eta(u/1) \rangle = \left\langle \frac{Y(u/1)}{0,5Mk} \right\rangle = T_s^\circ + T_n^\circ, \quad (1.35)$$

$$\sigma_{\eta/0}^2 = \frac{\sigma_{Y/0}^2}{0,25M^2k^2} = \frac{0,5M(kT_n^\circ)^2}{0,25M^2k^2} = \left(T_n^\circ \sqrt{\frac{2}{M}} \right)^2, \quad (1.36)$$

$$\sigma_{\eta/1}^2 = \frac{\sigma_{Y/1}^2}{0,25M^2k^2} = \frac{0,5M[k(T_s^\circ + T_n^\circ)]^2}{0,25M^2k^2} = \left((T_s^\circ + T_n^\circ) \sqrt{\frac{2}{M}} \right)^2.$$

Відповідно закони розподілу (рис. 1.27)

$$p(\eta/0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta/0}} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(\eta - T_n^\circ)^2}{2(T_n^\circ)^2 M^{-1}} \right), \quad (1.37)$$

$$p(\eta/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta/1}} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{[\eta - (T_s^\circ + T_n^\circ)]^2}{2(T_s^\circ + T_n^\circ)^2 M^{-1}} \right). \quad (1.38)$$

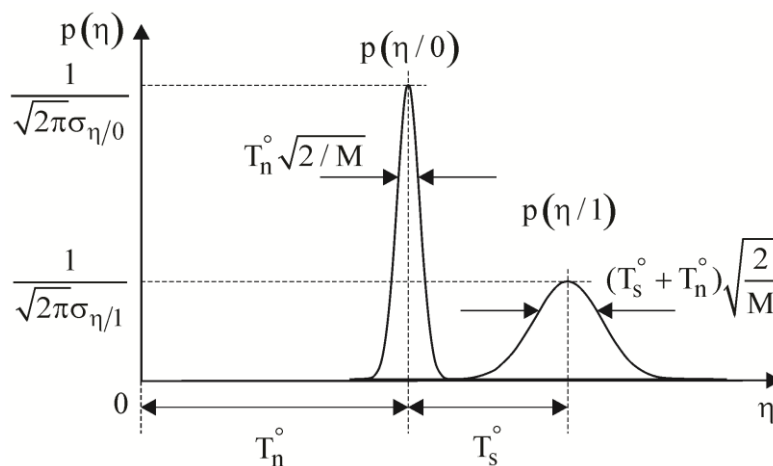


Рисунок 1.27 – Густина ймовірностей розподілу достатніх статистик η

Слід зазначити, що закони розподілу величин η не є нормальними, але дуже близькими до них. На відміну від нормальних законів щільності імовірності $p(\eta/1)$ і $p(\eta/0)$ при $\eta=0$ рівні нулю.

При виявленні шумових корисних сигналів або їх прирощень основною проблемою є результат недостатнього усереднення процесів $u^2(t)$ або $u_w^2(t)$ при їх інтегруванні на кінцевому інтервалі $(0, T)$ у алгоритмах (1.12) та (1.20). При $M = \infty$ цей ефект відсутній і помилок при виявленні в такому випадку не виникає.

Але на практиці можна розглянути наступні випадки: виявлення дуже малих температур $T_s^\circ \ll T_n^\circ$, порівнянних із величинами σ_η (так званий малосигнальний варіант), виявлення приростів ΔT_s° , коли температури корисного і перешкоджального сигналів можна порівняти $T_s^\circ \approx T_n^\circ$ та виявлення приростів ΔT_s° , якщо величини T_s° великі (наприклад, при дослідженнях Сонця).

Розглянемо спочатку ситуацію, коли $T_s^\circ \ll T_n^\circ$. Випадкові величини позначимо літерою η :

$$p(\eta/0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta/0}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\eta^2}{2(T_n^\circ)^2 M^{-1}}\right), \quad (1.39)$$

$$p(\eta/1) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta/1}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{[\eta - (T_s^\circ)]^2}{2(T_s^\circ + T_n^\circ)^2 M^{-1}}\right). \quad (1.40)$$

Перехід до таких випадкових величин ніяк не позначиться на ймовірнісних характеристиках виявлення. Ці умовні густини ймовірності показані на рис. 1.28.

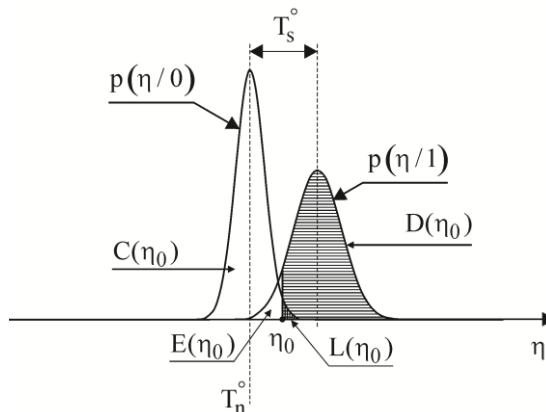


Рисунок 1.28 – Умовні закони розподілу ймовірностей достатніх статистик η в малосигнальному варіанті

Розглянемо ймовірність потрапляння випадкової величини η в області, що знаходяться під кривими $p(\eta/1)$, $p(\eta/0)$ правіше від порогу η_0 та лівіше. У найпростішому разі порівняння густин $p(\eta/1)$ та $p(\eta/0)$ (яка з них більша чи менша), очевидно, цей поріг дорівнює $\eta_0 = T_s^\circ / 2$. У складному випадку необхідно вибирати величину порога з урахуванням апріорних ймовірностей $p(0)$ та $p(1)$. Часто величину порога вибирають із умови заданої ймовірності хибної тривоги.

Ймовірність несправжньої тривоги $L(Y_0)$ та вірогідність правильного виявлення $D(Y_0)$ визначається так

$$L(\eta_0) = \int_{\eta_0}^{\infty} p(\eta/0) d\eta = 1 - F(\eta_0 / \sigma_{\eta/0}) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi(\eta_0 / \sigma_{\eta/0}) \right], \quad (1.41)$$

$$D(\eta_0) = \int_{\eta_0}^{\infty} p(\eta/1) d\eta = 1 - F\left(\frac{\eta_0}{\sigma_{\eta/1}} - \mu_{\mathfrak{E}}\right) = F\left(\mu_{\mathfrak{E}} - \frac{\eta_0}{\sigma_{\eta/1}}\right) = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{\eta_0}{\sigma_{\eta/1}} - \mu_{\mathfrak{E}}\right) \right], \quad (1.42)$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx,$$

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (1.43)$$

Для розрахунку ймовірнісних та енергетичних характеристик виявника у малосигнальному варіанті маємо два рівняння

$$L = \varphi(x_0) = \varphi(\eta_0 / \sigma_{\eta/0}), \quad (1.44)$$

$$D(y_0) = \varphi\left(\frac{\eta_0}{\sigma_{\eta/1}} - \mu_E\right) \approx \varphi(x_0 - \mu_E), \quad (1.45)$$

$$\text{де } \mu_E = \sqrt{M/2} \frac{T_s^\circ}{T_s^\circ + T_n^\circ} \approx \sqrt{M/2} \frac{T_s^\circ}{T_n^\circ},$$

$$\sigma_{\eta/0}^2 = (T_n^\circ \sqrt{2/M})^2, \quad \sigma_{\eta/1}^2 = ((T_s^\circ + T_n^\circ) \sqrt{2/M})^2 \approx \sigma_{\eta/0}^2, \quad (1.46)$$

η_0 – поріг по температурі,

$x_0 = \eta_0 / \sigma_{\eta/0}$ – нормований поріг.

Зазвичай для виконання розрахунків задають необхідну ймовірність помилкової тривоги, що дозволяє розрахувати необхідну величину порога:

$$L_{\text{необх}} = \varphi(\eta_0 / \sigma_{\eta/0}) = \varphi(x_{0\text{необх}}) \Rightarrow \eta_{0\text{необх}} / \sigma_{\eta/0} = x_{0\text{необх}} = \varphi^{-1}(L_{\text{необх}}). \quad (1.47)$$

Величину $x_{0\text{необх}}$ можна знайти графічно за побудованим графіком помилкової тривоги $L = \varphi(x_0)$.

Для різних $L_{\text{необх}1}, L_{\text{необх}2}, L_{\text{необх}3}$, тобто для різних величин $x_{01\text{необх}}, x_{02\text{необх}}, x_{03\text{необх}}$ будемо графіки залежностей D від μ_E , що показані на рис. 1.29. (Криві виявлення, робочі характеристики), тобто

$$D = \varphi(x_{0\text{необх}} - \mu_E). \quad (1.48)$$

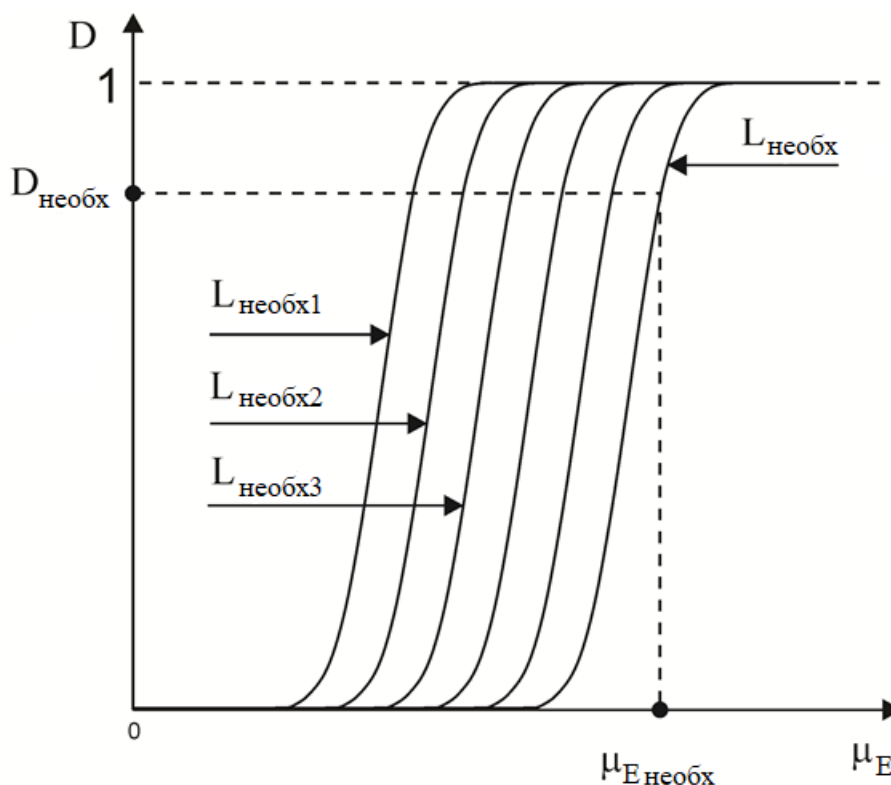


Рисунок 1.29 – Криві виявлення за формулою (1.48)

З необхідного $D_{\text{необх}}$ знаходимо на графіках

$$\mu_{E\text{необх}} = \sqrt{M_{\text{необх}}/2} \frac{T_{s\text{необх}}^{\circ}}{T_{s\text{необх}}^{\circ} + T_n^{\circ}} \approx \sqrt{M_{\text{необх}}/2} \frac{T_{s\text{необх}}^{\circ}}{T_n^{\circ}}. \quad (1.49)$$

Величина T_n° визначається якістю приймача та вимірюється під час калібрування. Для необхідної величини $T_{s\text{необх}}^{\circ}$, що підлягає виявленню та забезпечує необхідні ймовірності правильного виявлення та помилкової тривоги, необхідно визначити величину

$$M_{\text{необх}} = 2T_{\text{необх}} \Delta f_{\text{необх}},$$

яка дорівнює кількості некорельованих відліків процесу, під час усереднення, та визначає необхідний час $T_{\text{необх}}$ усереднення для усереднення та смугу частот $\Delta f_{\text{необх}}$ приймача шумового випромінювання.

У цьому випадку має місце таке рівняння спостереження

$$u(t) = s(t) + \varepsilon \Delta s(t) + n(t), \quad \varepsilon = (0,1), t \in (0, T). \quad (1.50)$$

Шумовим процесам, що входять до рівняння спостереження (1.50), відповідають яскравісні температури T_s° , ΔT_s° та T_n° . Зовнішньо залишаються справедливими алгоритми виявлення (1.12), (1.20). Основною перешкодою при виявленні є випадковий процес, що є наслідком недостатнього усереднення процесів $u^2(t)$ або $u_w^2(t)$ при інтегруванні. Результатом застосування алгоритмів є виявлення приросту ΔT_s° на тлі сумарної температури $T_s^\circ + T_n^\circ$. Усі розглянуті вище результати справедливі й у варіанті виявлення, якщо замінити T_s° на ΔT_s° і T_n° на $T_s^\circ + T_n^\circ$. Відповідні густини розподілу зображені на рис. 1.30.

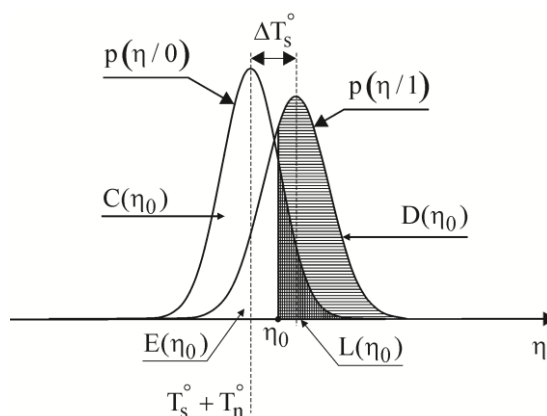


Рисунок 1.30 – Умовні закони розподілу ймовірностей достатніх статистик η у варіанті співрозмірних температур T_s° та T_n° .

Для такого варіанту $T_s^\circ \gg T_n^\circ$ і для спрощення вважати, що величина $T_n^\circ \approx 0$. Цей випадок відповідає дослідженням Сонця. Рівняння спостереження має такий вигляд

$$u(t) = s(t) + \varepsilon \Delta s(t), \quad \varepsilon = (0,1). \quad (1.51)$$

Виявленню тут підлягає збільшення ΔT_s° . Усі розглянуті вище результати справедливі й у цьому варіанті, якщо замінити T_s° на ΔT_s° і T_n° на T_s° . Відповідні густини розподілу зображені на рис. 1.31.

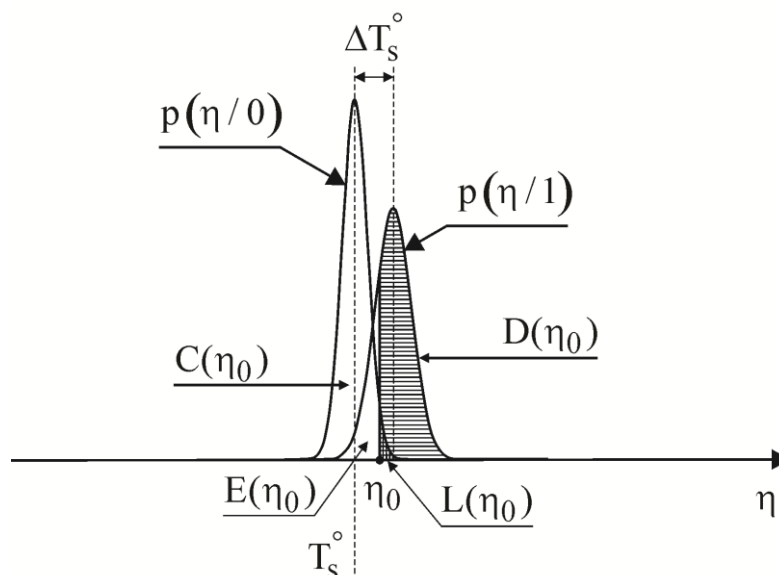


Рисунок 1.31 – Умовні закони розподілу ймовірностей достатніх статистик η у варіанті коли $T_s^\circ \gg T_n^\circ$

1.4. Постановка задачі

У роботах синтезовано оптимальні [39] та квазіоптимальні алгоритми [42, 43] виявлення сигналів власного радіотеплового випромінювання об'єктів дослідження на тлі внутрішніх шумів приймача. Розроблено структурні схеми оптимальних та квазіоптимальних виявників з дискретною та аналоговою обробкою прийнятих коливань. Також в [44, 45] досліджено аналітичні вирази ймовірнісних та енергетичних характеристик виявлення для різних співвідношень потужності корисних сигналів та завад, побудовано відповідні криві виявлення. Отримані в [39, 42-45] результати є фундаментальними при розробці радіометричних систем і комплексів. У той же час виявлення сигналів радіотеплового випромінювання базується на двох гіпотезах: наявності шумового сигналу на вході приймача та його відсутності. Застосування такого підходу до завдань пасивної радіолокації відповідає практичній ситуації проведення експериментів, оскільки РТВ, що випускається об'єктами з температурою вище 0 К завжди існує.

Вирішення поставленої у дисертаційному дослідженні задачі вимагає вирішення окремої більш практичної задачі виявлення приростів температури нагрітих БПЛА з низькою відбиваючою здатністю на тлі радіотеплового випромінювання неба в присутності внутрішніх шумів приймача;

Висновки до розділу

У розділі проаналізовано існуючі системи виявлення БПЛА, як от активні радіолокаційні та пасивні радіометричні, інфрачервоні, оптичні, експериментальні лазерні системи, та переносимі ручні. Вони призначені для протидії різним типам БПЛА. Описано недоліки та переваги різних типів систем. Визначено, що пасивні системи виявлення мають ряд переваг над іншими системами, зокрема їх висока скритність від уражаючих засобів та можливість працювати в різних погодних умовах.

Провівши порівняльну оцінку схем радіометрів різних типів можна сказати, що найпростішою та найдешевшою схемою побудови є схема вимірювання повної потужності, а схема модуляційного радіометру краще підходить для установки на рухомих об'єктах та в інших випадках, коли низькочастотна частина спектра може бути спотворена різними надмірними шумами.

Прийнято рішення дослідити основи синтезу оптимальних методів обробки сигналів у реєстраторах радіотеплового випромінювання та синтезувати алгоритм для дослідження контрастів нагрітих об'єктів на тлі атмосфери, оскільки існуючі методи не дозволяють з впевненістю говорити про потенційні можливості та параметри виявлення.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ БАГАТОЧАСТОТНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА ТЛІ АТМОСФЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У зв'язку з неможливістю приховати власне радіотеплове випромінювання БПЛА або зменшити його контраст на тлі випромінювання атмосфери, доцільно застосовувати високочутливі радіометричні приймачі для вирішення задачі виявлення. В даному розділі розроблено оптимальний метод комплексування результатів вимірювань в багатоканальних радіометричних приймачах та виявлення різних типів та класів безпілотних літальних апаратів на тлі неба при різних метеорологічних умовах.

Наскрізна оптимізація методів та алгоритмів дозволила виявити теоретичні основи побудови радіометричних систем починаючи від області реєстрації електромагнітних полів до кінцевих каскадів. Отриманий метод задовольняє суперечливим вимогам до радіотехнічних вимірювань – високій просторовій роздільній здатності, високій флуктуаційній чутливості та всепогодності. Синтезовані аналітичні вирази для розрахунку основних параметрів виявлення БПЛА, а саме для ймовірності хибної тривоги та ймовірності правильного виявлення. Отримані теоретичні результати дозволяють визначити алгоритми обробки сигналів і оптимальні структури радіометричних приймачів, проаналізувати граничні похибки вимірювання та розробити рекомендації для проведення експериментів.

2.1. Рівняння спостереження

Задача розвитку теоретичних основ виявлення контрастів радіозображення або приростів яскравості температури об'єкта, що досліджується, полягає в наступному: необхідно по прийнятій реалізації $u(t)$ на інтервалі часу $t \in [0, T]$ прийняти рішення, чи з'явився на вході приймача приріст корисного сигналу

$s_{UAV}(t)$ або є постійний сигнал фонового випромінювання атмосфери $s_{atm}(t)$ суміші з шумами приймача $n(t)$.

Векторне рівняння спостереження, що описує сигнали на вході багаточастотного радіометричного комплексу на інтервалі часу $(0, T)$ має вигляд:

$$\vec{u}(t) = \varepsilon \vec{s}_{UAV}(t) + \vec{s}_{atm}(t) + \vec{n}(t), \quad (2.1)$$

де $\varepsilon = (0, 1)$ – множник, що вказує на наявність і відсутність приросту радіотеплового випромінювання,

$\vec{s}_{UAV}(t)$ – вектор корисних шумових сигналів від шуканого БПЛА,

$\vec{s}_{atm}(t)$ – вектор сигналів фонового випромінювання атмосфери,

$\vec{n}(t)$ – вектор адитивних завад.

Процеси $s_{iUAV}(t)$, $s_{i atm}(t)$, $n_i(t)$ для кожної i -ї частоти ($i = \overline{1, K}$) є гаусовими білими (дельтакорельованими) стаціонарними та взаємно незалежними випадковими процесами з нульовим математичним сподіванням та наступними енергетичними спектрами:

$$\begin{aligned} G_{iUAV}(f) &= 0,5k_B T_{iUAV}, \\ G_{i atm}(f) &= 0,5k_B T_{i atm}, \\ G_{i n}(f) &= 0,5k_B T_{i n}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де k_B – постійна Больцмана,

T_{iUAV} , $T_{i atm}$, $T_{i n}$ – яскравісні температури БПЛА, фонового випромінювання атмосфери, внутрішніх шумів приймача.

2.2. Вирішення оптимізаційної задачі

Для визначення оптимального алгоритму виявлення БПЛА багаточастотним комплексом (розробки оптимальної системи обробки спостереження $u(t)$) скористаємося критерієм відношення функцій правдоподібності:

$$\frac{P(\vec{u}(t) | \varepsilon = 1)}{P(\vec{u}(t) | \varepsilon = 0)} >, \text{ або } < \frac{P(0)}{P(1)}, \quad (2.3)$$

де $P(\vec{u}(t) | \varepsilon = 1)$ – функція правдоподібності при наявності корисного сигналу;

$P(\vec{u}(t) | \varepsilon = 0)$ – функція правдоподібності при відсутності корисного сигналу;

$P(0)$ – апіорна ймовірність відсутності БПЛА в області спостереження;

$P(1)$ – апіорна ймовірність наявності БПЛА в області спостереження.

Функції правдоподібності для безперервних векторних випадкових процесів (2.1) мають вигляд:

$$P(\vec{u} | 0) = \prod_{i=1}^K \lim_{\substack{\Delta f_i \rightarrow \infty \\ \Delta t_i \rightarrow 0 \\ M_i \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^2 [\Delta f_i k_B (T_{i \text{ atm}} + T_{i n})]^{M_i}} \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{k_B (T_{i \text{ atm}} + T_{i n})} \int_0^T u_i^2(t) dt\right), \quad (2.4)$$

$$P(\vec{u} | 1) = \prod_{i=1}^K \lim_{\substack{\Delta f_i \rightarrow \infty \\ \Delta t_i \rightarrow 0 \\ M_i \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^2 [\Delta f_i k_B (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i n})]^{M_i}} \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{k_B (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i n})} \int_0^T u_i^2(t) dt\right), \quad (2.5)$$

де $\Delta f_i = 1/2\Delta t_i$ – ширина спектра спостережуваних коливань у i -му каналі прийому,

Δt_i – інтервал часу, через який процеси $s_{i \text{ UAV}}(t)$, $s_{i \text{ atm}}(t)$, $n_i(t)$ будуть некорельовані,

$M_i = 2T\Delta f_i$ – кількість некорельованих відліків на інтервалі часу $t \in (0, T)$.

В (2.4) і (2.5) передбачається що всі процеси, що входять до $u(t)$, мають нульове математичне сподівання.

Підставивши (2.4), (2.5) в (2.3), отримаємо:

$$\left(\prod_{i=1}^K \lim_{\substack{\Delta f_i \rightarrow \infty \\ \Delta t_i \rightarrow 0 \\ M_i \rightarrow \infty}} \frac{(T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^{\frac{M_i}{2}}}{(T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^{\frac{M_i}{2}}} \right) \times \exp \left(\sum_{i=1}^K C_i \int_0^T u_i^2(t) dt \right) > \text{або} < \frac{P(0)}{P(1)}, \quad (2.6)$$

$$\text{де } C_i = \frac{T_{i \text{ UAV}}}{k_B (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}) (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})}.$$

Видно, що відношення правдоподібності (2.6) є монотонно зростаючою функцією величини

$$\sum_{i=1}^K C_i \int_0^T u_i^2(t) dt.$$

Тому з деяким порогом достатньо порівнювати цю величину, яка є в даній задачі достатньою статистикою.

Таким чином, рішення поставленої задачі виявлення можна представити виразом:

$$Y_{\Delta} = \sum_{i=1}^K C_i \int_0^T u_i^2(t) dt >, \text{або} < Y_{0\Delta}, \quad (2.7)$$

де Y – вихідний ефект оптимального виявника,

Y_0 – порогове значення вихідного ефекту.

На практиці найбільш цікавими є ймовірність правильного виявлення

$$D(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(Y | \varepsilon = 1) dY \quad (2.8)$$

і ймовірність помилкової тривоги

$$L(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(Y | \varepsilon = 0) dY. \quad (2.9)$$

Для їх визначення необхідно знайти диференціальні закони розподілу ймовірностей $P(Y | \varepsilon = 1)$ та $P(Y | \varepsilon = 0)$. У виразі (2.7) процеси $u_i(t)$ на кожній частоті розподіляються за нормальним законом, а значення $u_i^2(t)$ відповідно до закону 2χ , величина $\int_0^T u_i^2(t) dt$ відповідно до закону χ^2 з M_i ступенями свободи. У практичних ситуаціях радіометричних вимірювань кількість M_i перевищує мільйон. Отже, вихідний ефект Y (достатня статистика) по закону центральної граничної теореми Ляпунова розподілена за нормальним законом

$$P(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} \exp\left(-\frac{(Y - m_Y)^2}{2\sigma_Y^2}\right), \quad (2.10)$$

де m_Y – математичне очікування вихідного ефекту Y ,

σ_Y^2 – дисперсія Y .

Математичні очікування в (2.10) за наявності та відсутності БПЛА в області спостереження виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
m_Y[Y(\bar{u} | 0)] &= 0,5k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}), \\
m_Y[Y(\bar{u} | 1)] &= 0,5k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}), \\
\sigma_Y^2[Y(\bar{u} | 0)] &= 0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2, \\
\sigma_Y^2[Y(\bar{u} | 1)] &= 0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Рівняння (2.10) з урахуванням (2.11) має вигляд:

$$\begin{aligned}
P(Y | 0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi 0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2}} \times \\
&\times \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\left(Y - 0,5k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}) \right)^2}{0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2} \right],
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
P(Y | 1) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{k_B^2}{2} \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2}} \times \\
&\times \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\left(Y - \frac{1}{2} k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}) \right)^2}{0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2} \right].
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Використовуючи отримані вирази (2.12) і (2.13), можна розрахувати параметри $D(Y_0)$ і $L(Y_0)$, які є базовими для радіометричного комплексу виявлення БПЛА. Слід зазначити, що в задачах виявлення приростів шумових сигналів основним заважаючим процесом є результат недостатнього усереднення процесів $u_i^2(t)$ при їх інтегруванні на обмеженому інтервалі $(0, T)$ в алгоритмі (2.7). Коли $M_i = \infty$ ця завада відсутня і теоретично виявлення приростів корисного сигналу в цьому випадку безпомилкове.

Щоб розрахувати $L(Y_0)$ виконуються наступні перетворення

$$\begin{aligned}
 L(Y_0) &= \int_{Y_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y[Y(\bar{u}|0)]} e^{-\frac{(Y-m_Y[Y(\bar{u}|0)])^2}{2\sigma_Y^2[Y(\bar{u}|0)]}} dY = \\
 &= \left| \begin{array}{l} x = \frac{Y - m_Y[Y(\bar{u}|0)]}{\sigma_Y[Y(\bar{u}|0)]}, dx = \frac{dY}{\sigma_Y[Y(\bar{u}|0)]}, \\ \text{for } Y = Y_0, \quad x = x_0 = \frac{Y_0 - m_Y[Y(\bar{u}|0)]}{\sigma_Y[Y(\bar{u}|0)]} \end{array} \right| = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \\
 &= 1 - F(x_0) = F(-x_0) = \frac{1}{2}[1 - \Phi(x_0)], \tag{2.14}
 \end{aligned}$$

де $F(x_0)$ і $\Phi(x_0)$ є інтегралами ймовірності.

Ймовірність правильного виявлення $D(Y_0)$ також записується наступним чином

$$D(Y_0) = 1 - F(y_0) = F(-y_0) = \frac{1}{2}[1 - \Phi(y_0)], \tag{2.15}$$

де $y_0 = \frac{Y_0 - m_Y[Y(\bar{u}|1)]}{\sigma_Y[Y(\bar{u}|1)]}$.

Щоб розрахувати $D(Y_0)$ і $L(Y_0)$ спочатку необхідно встановити необхідне значення помилкової тривоги, що дає можливість визначити значення порогу Y_0 наступним чином

$$L_{desired} = \varphi(x_{0\,desired}) \Rightarrow x_{0\,desired} = \varphi^{-1}(L_{desired}). \tag{2.16}$$

За отриманими виразами були виконані розрахунки ймовірності правильного виявлення в залежності від різних параметрів. На рис. 1-4 наведено графіки для наступних параметрів виявлення міні-БПЛА на тлі чистої атмосфери на частотах $f_1 = 10$ ГГц, $f_2 = 20$ ГГц, $f_3 = 35$ ГГц і $f_4 = 94$ ГГц під кутом візування 30° :

- $M_1 = 10^8$, $M_2 = 10^8$, $M_3 = 4,5 \cdot 10^8$, $M_4 = 1,5 \cdot 10^8$,
- $T_{1\ atm} = 15\ K$, $T_{2\ atm} = 40\ K$, $T_{3\ atm} = 45\ K$, $T_{4\ atm} = 100\ K$,
- $T_{1\ n} = 100\ K$, $T_{2\ n} = 130\ K$, $T_{3\ n} = 600\ K$, $T_{4\ n} = 3000\ K$,
- $T_{1\ UAV} = 86\ K$, $T_{2\ UAV} = 96\ K$, $T_{3\ UAV} = 121\ K$, $T_{4\ UAV} = 245\ K$.

Ці параметри характеризують радіометричні приймачі діапазонів хвиль X, Ka, K та W, що потенційно можливо розробити на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

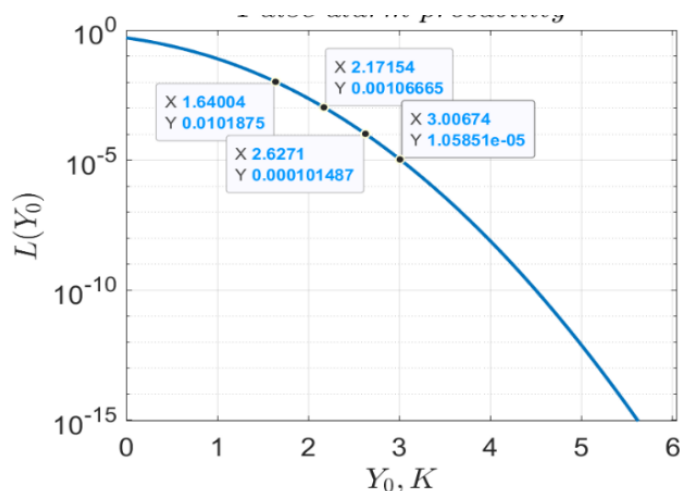


Рисунок 2.1 – Ймовірність помилкової тривоги виявлення БПЛА

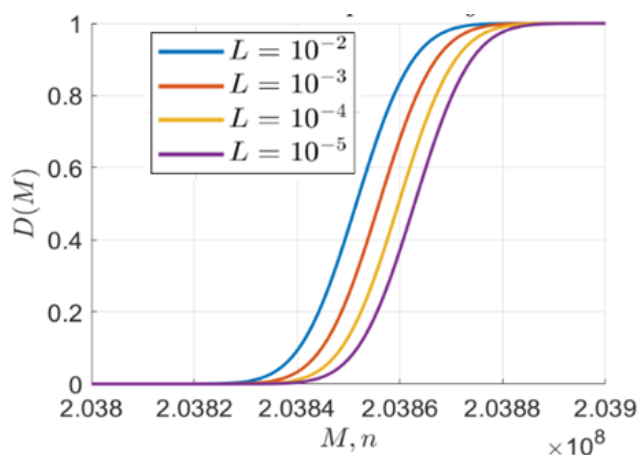


Рисунок 2.2 – Ймовірність правильного виявлення БПЛА
для різної кількості некорельованих відліків

Використовуючи графіки на рис. 2.1-2.2, можна розробити рекомендації щодо структури радіометричного комплексу, ширини спектру радіометричних приймачів, часу спостереження об'єктів, умов вимірювань та забезпечити підвищення ефективності виявлення від зміни цих параметрів.

Висновки до розділу

Використовуючи фізичні властивості радіотеплового випромінювання, поставлено та вирішено задачу розробки теоретичних основ побудови багаточастотних радіометричних систем виявлення БПЛА. Використання багаточастотності обумовлено необхідністю експлуатації комплексу в різних погодних умовах без втрати точності.

Розроблено оптимальний алгоритм виявлення, що дозволяє комплексувати результати оцінок яскравісної температури БПЛА в різних каналах прийому. Комплексування виконується з урахуванням характеристик приймачів і стану атмосфери в заданому діапазоні довжин хвиль. З використанням сучасних досягнень статистичної теорії оптимізації радіосистем розраховано ймовірнісні характеристики роботи радіометричного комплексу. Проаналізовано аналітичні вирази для ймовірності правильного виявлення та помилкової тривоги.

3. РАДІОМЕТРИЧНІ КОНТРАСТИ РІЗНИХ ТИПІВ БПЛА ТА НАТУРНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

Сукупний розвиток космічних навігаційних систем, елементної бази мікроелектроніки та цифрових ТБ технологій утримання кадру на об'єкті, що рухається, створили передумови для революційного розвитку та широкомасштабності застосування безпілотної авіації, особливо, у військовій сфері. Сьогодні у світі 65 країн виробляють БПЛА. Безумовні лідери – США та Китай. За ними йдуть Туреччина, Ізраїль, Іран, Пакістан. У Бразилії, Індії, Німеччині, Австралії, Росії також ведуться інтенсивні роботи у цьому напрямі. Ці розробки, які можна порівняти з новою ерою у військовій справі невідкладно вимагають створення ефективних засобів протидії таким літальним апаратам потенційного противника. Для проектування та забезпечення ефективної роботи такого роду систем вкрай необхідне знання та прогнозування значень очікуваних контрастів цікавих типів цілей, їхньої погодної стабільності в різних діапазонах хвиль.

Цей розділ присвячений експериментальному вивченню контрастів різних типів малорозмірних літальних контрастів БПЛА на тлі неба під різними кутами візування в різних точках міліметрового та сантиметрового діапазонів хвиль. Експериментальна частина досліджень проведена в різних погодних умовах у статичному режимі спостереження різних типів БПЛА на вимірному радіометричному полігоні ХАІ.

Наявність таких даних найбільш актуальна в міліметровій і короткохвильовій частині сантиметрового діапазону хвиль, які за наявними теоретичними оцінками [46, 47] є найбільш перспективними для розробки всепогодних пасивних систем розвідки та наведення зброї. Такі дані можуть становити інтерес для розробників засобів виявлення та супроводу малорозмірних повітряних цілей, пасивних систем

розвідки та головок самонаведення, зокрема, для прогнозування ймовірності їх виявлення на заданих дальностях у діапазонах см та мм хвиль.

3.1. Методологія проведення натурального експерименту

Для активного радара параметром класифікації є ефективна площа розсіювання. За цим параметром БПЛА діляться на класи від малих до великих. Але для пасивних радарних пристроїв такий підхід невірний. Для систем, що працюють в режимі пасивної радіотеплової локації параметр контрасту в деякому діапазоні довжин хвиль є основним параметром для виявлення об'єктів. Наявність даних про контрасти найбільш актуальна в ММ та короткохвильовому КМ діапазонах хвиль, які, за наявними теоретичними оцінками, є найбільш перспективними для розробки всепогодних пасивних систем.

Отримання та прогнозування контрастів об'єктів техніки в широкому частотному діапазоні є багатогранною проблемою, яка потребує розвитку теоретичних уявлень та проведення на їх основі модельних розрахунків [48-53]. Ця необхідність зумовлена значними частотними відмінностями відносного впливу на значення прогнозованого розмаїття характеристик власного, перевідбитого та фонового випромінювання для різноманітних об'єктів, а також сезонно-погодних умов та кутів візування. Однак для проведення такого роду теоретичних досліджень також неможливо обійтися і без експериментальних даних, які відіграють роль реперних точок, що дозволяють оцінити ступінь адекватності використовуваних теоретичних моделей і підходів.

Математичний опис процедур формування радіотеплового контрасту БПЛА показано в [48, 52-53]. Саме такий комплексний підхід був використаний у даній роботі для прогнозних оцінок значень радіотеплових контрастів літальних апаратів на тлі неба та параметрів їх виявлення в різних частотних діапазонах. При цьому отриманню експериментальних даних для радіотеплової температури БПЛА $T_{БПЛА}$ в широкому діапазоні ДХ у цій роботі було приділено особливу увагу, оскільки дані

про контрасти стануть основою для розрахунків потенційних можливостей виявлення.

Кутові та частотні залежності значень радіотеплових контрастів, дальності та ймовірності виявлення різних типів безпілотних літальних апаратів у діапазонах 12 ГГц, 20 ГГц, 34 ГГц, 94 ГГц, були виміряні на спеціально створеному вимірювальному полігоні ХАІ [48] або отримані методами обліку [53] і програмно-алгоритмічного забезпечення.

Розрахунки ймовірнісних характеристик виявлення безпілотних літальних апаратів були проведені із залученням методу максимальної правдоподібності з подальшою побудовою кривих виявлення різних класів БПЛА [53] за критерієм Неймана-Пірсона. Розрахунки радіояскравісної температури $T_{неба}$ небесної сфери проведені із залученням рекомендованих ІТУ метеорологічних та радіофізичних моделей [54, 55], а також з використанням статистичних даних оригінальних метеорологічних та радіометричних спостережень ХАІ [56-57].

Експериментальні дослідження $T_{БПЛА}$ були проведені в ретельно контрольованих умовах, на створеному на території ХАІ вимірювальному полігоні, за допомогою спеціально розробленої для цього радіометричної апаратури СМ і ММ діапазонів хвиль [52-53]. Тут $T_{БПЛА}$ підвішеного на тлі неба БПЛА визначалася за результатами вимірювання антенної температури T_a за наявності БПЛА чи антенної температури неба за його відсутності ($T_{a\text{ неба}}$) з урахуванням коефіцієнта заповнення пелюстки ДС рупорної антени (K_3) цілком на контрольованій дальності на підставі виразу

$$T_{БПЛА} = \frac{T_a - T_{a\text{ неба}}(1 - K_3)}{K_3}. \quad (3.1)$$

Даний вираз було записано в припущенні зразкової рівності T_a і $T_{БПЛА}$ для цілі або її фону (що прийнятно для рупорних антен з низьким рівнем розсіювання поза основною пелюсткою ДС).

Сучасний радіометр СМ і аж до довгохвильової частини ММ ДХ може мати чутливість в режимі повної потужності вище, ніж у традиційно використовуваному в останні десятиліття в практиці радіометрії модуляційному режимі. Це пов'язано з тим, що сучасні підсилювачі ВЧ і ПЧ мають значно менший $1/f$ шум у НЧ області, ніж у застосовуваних раніше, а також з істотно меншим рівнем цього виду шуму в обернених тунельних детекторах, порівняно з традиційними детекторами на діодах Шотткі, германієвих чи кремнієвих структурах. У зв'язку з цим і з урахуванням практичної необхідності ухвалення компромісних рішень між вартістю, термінами розробки та доступністю найкращих ключових елементів із розроблюваних сьогодні у світі, з одного боку, та технічною ефективністю вирішення поставленого перед комплексом завдання – з іншого, було прийнято рішення про побудову радіометрів СМ та 8мм ДХ на основі структурної схеми повної потужності (рис.3.1).

Схема радіометра СМ ДХ містить в своєму складі вхідний каскад, який представлено антеною, блоком МШП ВЧ, змішувачем з гетеродином, підсилювачем ПЧ, квадратичним детектором (КД) та підсилювачем сигналу постійного струму.

Схема працює наступним чином – сигнал радіотеплового випромінювання в СМ діапазоні хвиль від 19,7 ГГц до 20,2 ГГц потрапляє на антену, далі поступає на вхід блоку МШП ВЧ, на наступному кроці сигнал потрапляє до змішувача з фільтром на входу, з нього у полоси ПЧ 500-1000 МГц через ППЧ до квадратичного детектору, з якого виходить на підсилювач сигналу постійного струму.

Схема радіометра 8мм ДХ містить в своєму складі вхідний каскад, який представлено антеною, блоком МШП ВЧ, квадратичним детектором з підсилювачем сигналу постійного струму. Схема працює наступним чином – сигнал радіотеплового випромінювання потрапляє на антену, далі поступає в блок МШП ВЧ, на наступному кроці сигнал в діапазоні від 32 ГГц до 36 ГГц потрапляє

до квадратичного детектору з якого виходить на підсилювач сигналу постійного струму.

При побудові радіометра 3мм ДХ були використані як схема модуляції з приймачем прямого посилення (рис.3.1), так і схема повної потужності. Порівняльний аналіз цих 2-х схем показав, що в 3-х мм ДХ, на відміну від низькочастотних діапазонів, схема приймача повної потужності забезпечує на 1,5 порядку гірші значення чутливості радіометра (виміряні значення чутливості - 0.008К і 0.2К відповідно). Ймовірно, ця обставина пов'язана з недостатньо високим рівнем стабільності $K_{n_{idc}}$ вхідного МШП, якщо порівнювати з його аналогами в більш довгохвильових діапазонах. У зв'язку з цим при побудові радіометричних систем надалі використовувалася в 3 мм ДХ модуляційна схема.

Таким чином, реалізована схема радіометра 3мм ДХ містить в своєму складі вхідний каскад, який представлено антеною, модулятором (М), блоком ПВЧ, квадратичним детектором (КД) з підсилювачем низької частоти (ПНЧ), синхронним детектор (СД) з підсилювачем ПЧ.

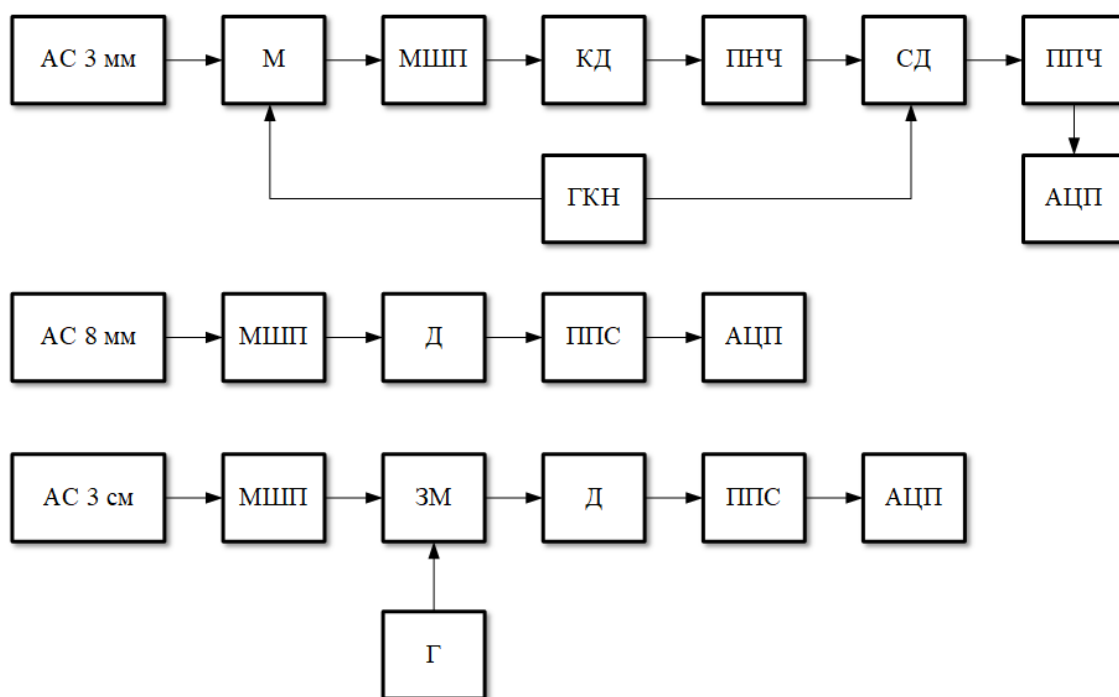


Рисунок 3.1 — Структурна схема блоків радіометрів

Схема працює наступним чином – сигнал радіотеплового випромінювання потрапляє на антену, далі надходить на вхід амплітудного модулятора (прямі втрати 0,4дБ у полосі 75-110 ГГц), далі сигнал в діапазоні від 75 ГГц до 110 ГГц потрапляє в блок МШП ВЧ з характеристиками $-K_{ш} = 2,5\text{дБ}$ $K_{відс.} = 45\text{дБ}$, на наступному кроці квадратичний детектор з нульовим зміщенням (чутливість 800мВ\мВт, -45дБм) приймає сигнал. Після цього ПНЧ посилює сигнал для подальшої обробки. На останньому етапі сигнал потрапляє на вхід аналогового синхронного детектора, інтегратора та підсилювально-перетворювального тракту, або на АЦП та ПК де проводиться його синхронне детектування та накопичення у цифровому вигляді.

На рисунку 3.2 показаний зовнішній вигляд побудованих блоків радіометрів 3-х частотного комплексу, які встановлюються на опорно поворотний пристрій. НВЧ частини радіометрів побудовані на основі елементної бази українських ДП НДІ Оріон, Сатурн та закордонних від Mi-Wave та Rohde & Schwarz.



а) радіометр ДХ 75-110 ГГц, флуктуаційна чутливість $\delta T=0.007\text{ К}$

б) радіометр ДХ 19.7-20.2 ГГц, $\delta T=0.1\text{ К}$

в) радіометр ДХ 32-36ГГц, $\delta T=0.04\text{ К}$

Рисунок 3.2 — Блоки радіометрів для експериментального дослідження



а)

б)

Рисунок 3.3 — Радіометр (а) 10.8--12ГГц ДХ ($\delta T=0.04$ К) та блок радіометрів з рупорними антенами для статичних вимірювань $T_{я}$ БПЛА (б).

Проведені у ХАІ на кафедрі 501 за допомогою спеціалізованих стендів для налаштування та вимірювання основних параметрів радіометрів СМ і ММ ДХ та спеціально розроблених методик [47] експерименти показали, що досягнута виміряна флуктуаційна чутливість побудованих радіометрів δT у діапазоні хвиль 3см становила 0.04К, 1.5 см – 0.1м. - 0.04 К, 3мм - 0.007 К).

Такі значення цього найважливішого показника радіометрів вважатимуться цілком прийнятними як для проведення програми статичних вимірювань в рамках даної НДР, а й для вирішення завдань побудови діючого макета вимірювального Комплексу. Доречно зауважити, що унікальність цієї розробки для України полягає в сукупності ширини охоплення робочих частот вікон прозорості атмосфери від 10ГГц до 110ГГц і високих значень флуктуаційної чутливості радіометричних каналів (так, досягнута в цій роботі чутливість 0.007 К, для України є рекордною і більш характерною для пристроїв з криогенним охолодженням).

При розробці засобів виявлення та супроводу повітряних об'єктів методами радіометрії потрібне знання радіотеплових контрастів різних об'єктів спостереження та прогноз дальності їх виявлення із заданою ймовірністю. Однією з перешкод проведенню таких обґрунтованих оцінок та прогнозів є практично

повна відсутність вихідних даних про значення радіояскравісних температур БПЛА.

Методологія прогнозування радіотеплових контрастів літальних апаратів (ЛА) в цій роботі полягала в експериментальній оцінці радіояркості ($T_{\text{я}}$) в секторі середніх кутів візування з подальшою екстраполяцією на більш широкий сектор кутів. Для цих цілей були також проведені модельні оцінки $T_{\text{я}}$ неба в різних погодних умовах для см і мм діапазонів хвиль.

Радіояркісна температура спостережуваного на тлі неба літального апарату $T_{\text{ла}}$ може бути записана у вигляді:

$$\begin{aligned} T_{\text{ЛА}} &= T_{\text{вл.}} + T_{\text{відоб.}} + T_{\text{пр.}} \\ T_{\text{вл.}} &= \chi T_0 \\ T_{\text{відоб.}} &= K_{\text{відоб.}} T_{\text{ЗП}} \\ T_{\text{пр.}} &= T_{\text{ф}} (1 - K_{\text{відоб.}}) K_{\text{пр.}} \\ T_{\text{ф}} &= T_{\text{неба}} = T_{\text{эф.}} (1 - e^{\tau \cdot \sec \theta}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

де τ – оптична товщина атмосфери в метеорологічних умовах і частотному діапазоні;

$\chi = (1 - K_{\text{відоб.}})$ – випромінювальна здатність ЛА, що залежить від його діелектричних властивостей та форми;

$T_{\text{ЗП}}$ – ефективне (усереднене) значення $T_{\text{я}}$ земної поверхні (залежить від типу, форми, діелектричних властивостей, кута візування та сезонно-погодних умов);

T_0 – термодинамічна температура земної поверхні;

$K_{\text{відоб.}}$ – ефективне значення коефіцієнта відбиття ЛА;

$K_{\text{пр.}}$ – ефективне значення коефіцієнта проходження ЛА;

$T_{\text{пр.}}$ – ефективне значення $T_{\text{я}}$ неба, що пройшла крізь ЛА;

$T_{\text{ф}}$ – ефективне значення $T_{\text{я}}$ неба;

$T_{ef.}$ – ефективне значення термодинамічної температури атмосферного шару, який формує T_y неба,

θ – зенітний кут візування.

У зв'язку зі складністю дати точний математичний опис процедур формування радіотеплового розмаїття ЛА для адекватного вирішення поставленої практичної задачі, було прийнято рішення ввести деякі припущення, виходячи, при цьому, з експериментально отриманих даних.



а)



б)



в)



г)

Пластиковий БПЛА проекту «Укрнафтогаз» ($S=0.7\text{м}^2$) (а), металева масштабна (1/40) копія винищувача СУ-27 ($S=0.08\text{м}^2$) (б), БПЛА із композиційного скловолоконного матеріалу ($S=0,44\text{м}^2$) (в), пластико-металевий квадрокоптер ($S=0.078\text{м}^2$) (г)

Рисунок 3.4 — Зовнішній вигляд досліджуваних БПЛА

Так, в умовах дефіциту літературних даних про значення $T_{я}$ БПЛА в різних ДХ був підготовлений та проведений у діапазоні середніх кутів візування цикл вимірювань цього основного контрастоутворюючого параметра. База даних за результатами цих вимірювань представлена в графічному вигляді у Додатку А.

На рис. 3.4 наведено фото досліджених на спеціальному майданчику в ХАІ типів ЛА, виготовлених з різних типів пластмас, металу та їх комбінацій, які при цьому мають різні форми та площі проекції (S).

Також, як додаткові тестові об'єкти, для полегшення розуміння отриманих експериментальним шляхом залежностей були обміряні величини $T_{я}$ та контрасти металевої та тонкої пластмасової (оргскло) прямокутних плоских пластин ($S=0,5\text{м}^2$). Зокрема, результати цих додаткових вимірів допомогли підтвердити припущення про те, що напівпрозорі в СМ ДХ пластики стають не прозорими в ММ ДХ, що підвищує вплив перевідображеного з нижньої напівсфери (і більш інтенсивного порівняно з небом) випромінювання землі та викликає підвищення $T_{я}$ об'єкта. Ця ж закономірність справедлива для металевих об'єктів у всіх ДХ.

3.2. Результати вимірювань

На рис. 3.5, як приклад, наведені виміряні частотні залежності спостережуваних на вертикальній поляризації (ВП) на тлі ясного неба контрастів БПЛА, виготовленого з композиційного скловолокна та БПЛА проекту «Укрнафтогаз», виготовленого зі склопластику. З рисунку можна побачити якісну схожість частотної залежності та суттєвий вплив матеріалу з якого виготовлений ЛА, – для БПЛА проекту «Укрнафтогаз» значення контрастів у 1.5-2 рази вище.

На рис. 3.6, як приклад, показана частотна залежність спостережуваних на ВП і горизонтальній поляризації (ГП) на тлі хмарного неба контрастів, БПЛА, виготовленого з композиційного скловолокна.

Аналіз отриманих для цих 2-х типів пластикових БПЛА показав, що поляризаційні відмінності їх контрастів не суттєві і починають виявлятися лише при підвищенні робочих частот до 94 ГГц.

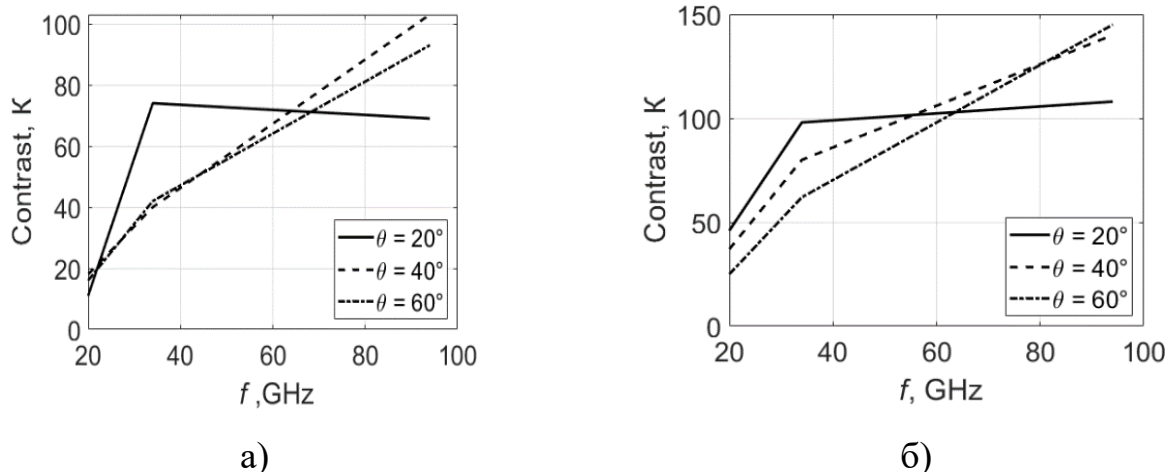


Рисунок 3.5 — Частотні залежності контрастів БПЛА виготовленого з композиційного скловолокна (а) і БПЛА «Нафтогаз» із пластику (б), що спостерігаються на ВП на тлі ясного неба

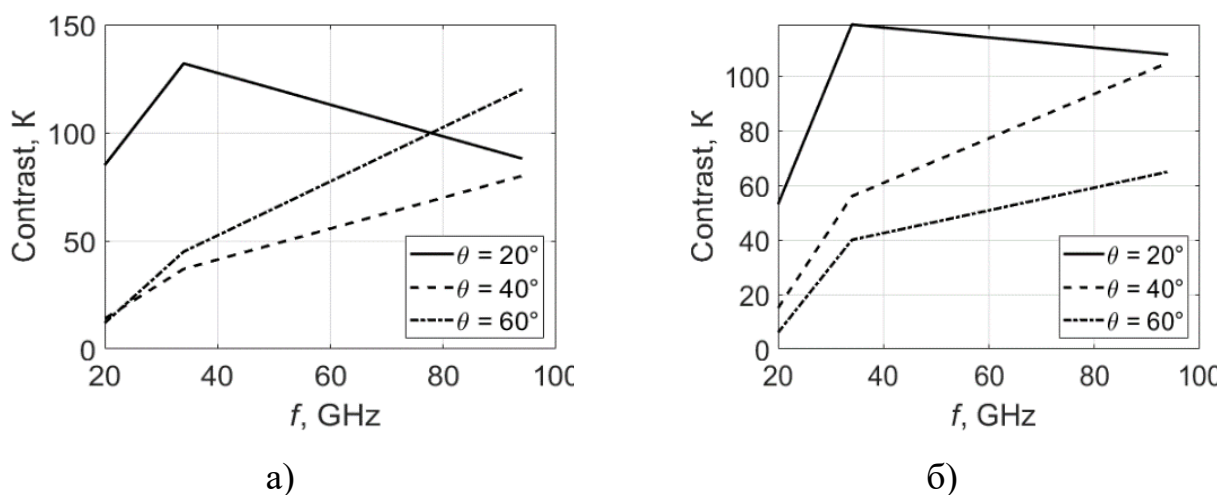


Рисунок 3.6 — Частотна залежність контрастів БПЛА з композиційного скловолокна для ВП (а) і ГП (б) на тлі хмарного неба

Аналогічна поведінка $T_{\text{Я}}$ та їх контрастів спостерігаються на тестових зразках плоских електрично напівпрозорих для СМ ДХ листів оргскла, що виявлялося у суттєвому перевищенні контрасту, вимірюного на ГП, над ВП.

На рисунку 3.7 показані кутові залежності контрастів, виготовленої з металу масштабної копії винищувача СУ-27, для ВП і ГП на тлі ясного неба.

Для такого типу виготовленого з металу об'єкта характерна наявність у ММ яскраво вираженої поляризаційної залежності контрастів, значення яких набагато вище спостерігаються в СМ ДХ. У ММ ДХ на ГП можуть перевищувати значення 200К.

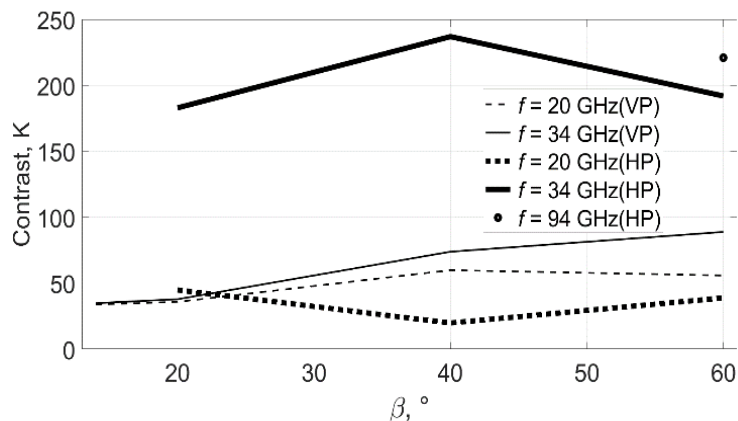


Рисунок 3.7 — Кутова залежність контрастів макета СУ-27 в умовах ясної погоди на ГП та ВП

Аналогічне підвищення T_y для ММ ДХ спостерігалось на тестових зразках плоских металевих листів, що розташовуються на тлі неба, проте при цілком зрозумілій для плоскої металевої поверхні відсутності помітних поляризаційних відмінностей. Поляризаційна відмінність, що виявилася в істотному перевищенні контрасту виміряного на ГП над ВП для реального об'єкта (СУ-27), мабуть, пов'язана зі складністю його форми.

Що стосується квадрокоптера, то значення його контрастів займали проміжне положення між об'єктами виготовленими з пластику (у квадрокоптера в 1.5-2 рази вище) та з металу (приблизно вдвічі нижче).

З аналізу та зіставлення, отриманих всім обмірених нами типів БПЛА даних можна назвати такі закономірності та особливості отриманих залежностей:

— використаний частотний діапазон істотно впливає на величину спостережуваних контрастів, що становлять від двох десятків К в СМ ДХ до двох сотень К в 3-х ММ ДХ;

— зміна кута візування ЛА або ракурсу спостереження може призводити до 1.5-2 кратної зміни значень контрастів, особливо помітної для об'єктів

виготовлених з напівпрозорого електрично для використаного ДХ матеріалу, або мають переважно плоску форму;

— поляризаційні відмінності контрастів, що виявляються у суттєвому (багаторазовому) перевищенні їх значень на ГП над ВП найбільш яскраво спостерігалися для металевих та метало-пластикових об'єктів складної форми та були слабо виражені для випадків використання напівпрозорих для робочих частот композиційних матеріалів;

— наявність суцільного хмарного покриву для БПЛА виготовленого з напівпрозорих матеріалів не мало істотного впливу на величину контрастів ЛА, що спостерігалися. При цьому, для всіх інших ЛА на частотах 20ГГц і 34 ГГц спостерігався аналогічно слабкий вплив, тоді як на 94ГГц мало місце більш ніж 2-кратне зменшення контрасту (наприклад для БПЛА «Нафтогаз» спостерігалось зменшення з 140К в ясну погоду до 50К в умовах хмарності).

Справді, отримані результати вимірювань дають загальне уявлення про величину та якісні закономірності в очікуваних залежностях. Однак, експериментальні дослідження в силу своєї специфіки мають обмеження щодо кількості типів ЛА, кутів їх візування та різноманітності погодних умов. Для усунення цих обмежень ми проводили теоретичні оцінки та порівняння передбачуваної ефективності різних діапазонів хвиль для типових станів погоди при фіксованих апаратурних параметрах.

Для екстраполяції цих експериментально отриманих значень на інші кути візування в даній роботі була використана експоненційна модель виду

$$T_{БПЛА}^{\circ} = \kappa_1 e^{-\kappa_2 \theta} + \kappa_3, \quad (3.3)$$

де κ_1 , κ_2 , κ_3 – модельні коефіцієнти, які залежать від частоти і $T_{атм.}^{\circ}$.

Використовуючи цей вираз, а також результат експерименту та наближені теоретичні оцінки коефіцієнтів відбиття поверхонь під кутами ковзання, значення

$T_{БПЛА}^{\circ}$ були розраховані для 4-х вищезгаданих смуг частот. Сумісна обробка цих даних і даних, представлених на рис. 3.2-3.4 дозволяє оцінити кутові залежності $T_{неба}$ і радіотеплових контрастів БПЛА на тлі неба в різних погодних умовах.

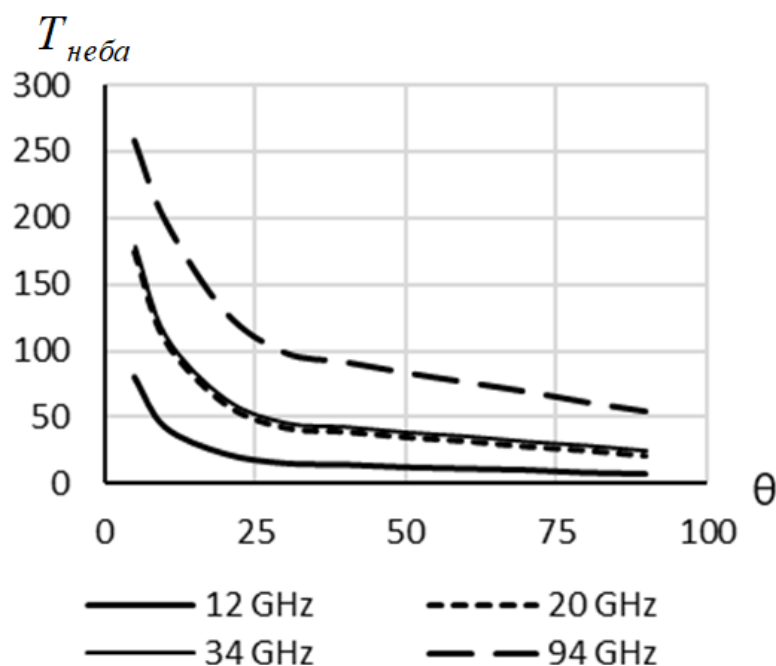


Рисунок 3.8 – Значення радіояскравісних температур ясної атмосфери для діапазона частот від 12 ГГц до 94 ГГц

На рис. 3.8 наведені отримані розрахунковим шляхом для частотних діапазонів 12 ГГц, 20 ГГц, 34 ГГц і 94 ГГц значення ясного неба та кутові залежності. Тут кут візування θ відрховується від площини горизонту. Ці дані були використані в наступних оцінках контрастів БПЛА, що спостерігаються на фоні неба.

На рис. 3.9 наведено значення радіояскравісних температур неба в умовах потужної хмарності та інтенсивного дощу відповідно. Використані в цих розрахунках несприятливі для виявлення БПЛА метеорологічні параметри, характерні не більше ніж у 1% річного часу погодних ситуацій в Україні.

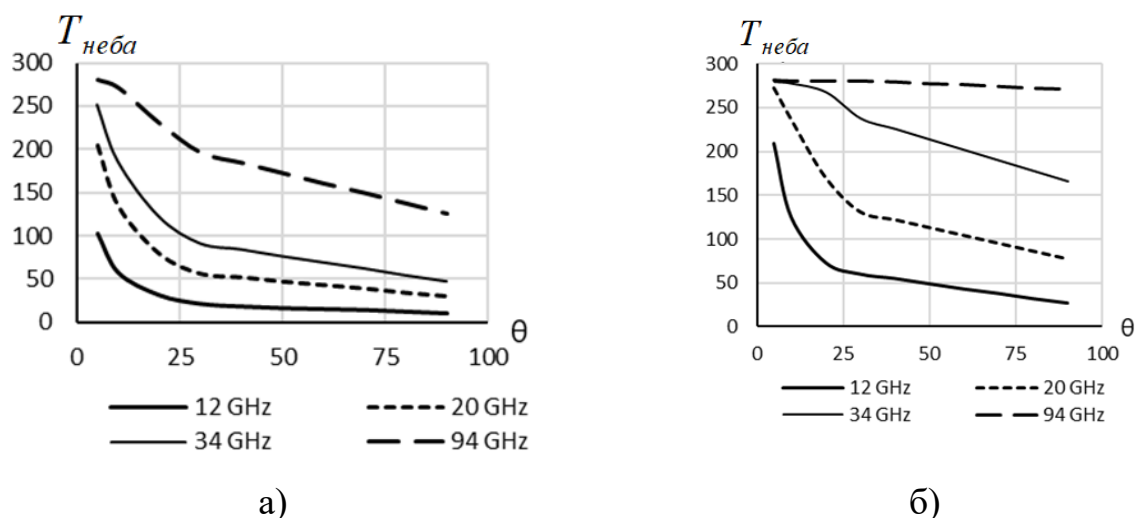


Рисунок 3.9 – Значення температур хмарної (а) і дощової (б) атмосфери для діапазону частот від 12 ГГц до 94 ГГц

Розрахунки $T_{неба}$ ясної небесної сфери у всіх аналізованих ДХ були проведені із залученням сукупності розробленої в ESA метеорологічної моделі ERA-15 та радіофізичної MPM моделі Ліїба [58]. Значення повного вертикального поглинання ясної атмосфери (τ) отримано шляхом інтегрування розрахованих для різних висот на основі MPM моделі значень коефіцієнта горизонтального погонного ослаблення (γ) від частоти для нормальних метеорологічних умов липня у м. Харкові (Україна). З використанням висотних профілів метеорологічних параметрів, взятих з моделі ERA-15 було визначено висотні профілі метеорологічних параметрів, які необхідні при обчисленні значень $T_{неба}$ неба на основі виразу

$$T_{неба} = T_{эф.} (1 - e^{-\tau \cdot \sec \theta}) \quad (3.4)$$

Розрахунки небесної сфери в умовах хмарного покриття були проведені для значень загального стовпчастого вмісту хмарної рідкофазної вологи на рівні $0,4 \text{ кг/м}^2$. Вірогідність перевищення таких значень в Україні за даними ІТУ [59] не перевищує 1% часу в році. Для розрахунків $T_{неба}$ використано аналогічний вираз (3.4) в якому τ визначалося, як розраховане за допомогою MPM моделі ослаблення

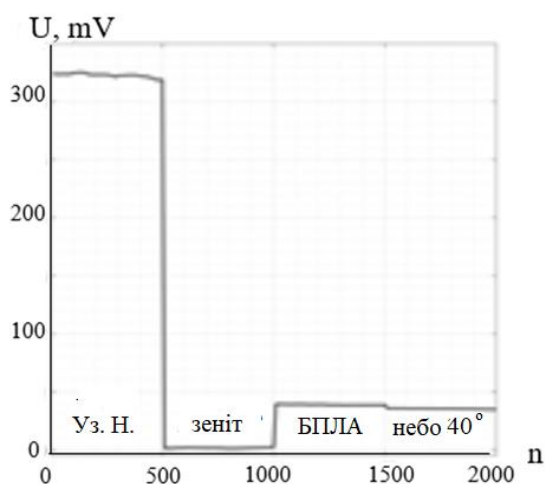
для шару дрібнодисперсних крапель з водозapasом 0.4 кг/м^2 . У цих розрахунках значення T_{ef} приймалися виходячи з температур, що визначаються по моделі ERA-15 на середній для літнього сезону висоті хмар, обчислені на основі багаторічних метеорологічних спостережень [60] в літній період року.

Розрахунки T_J небесної сфери в умовах дощу визначалися за виразом (3.4), при цьому значення величини $T_{неба}$ для 8мм ДХ отримані для випадку коли загасання у дощі перевищено на 1% у середньому за рік. Ці значення було визначено на основі даних циклу річних безперервних спостережень атмосферного випромінювання у м. Харків [61-62]. Подальший перерахунок на інші частоти здійснювався за співвідношенням поглинання у дощах також з допомогою МРМ моделі.

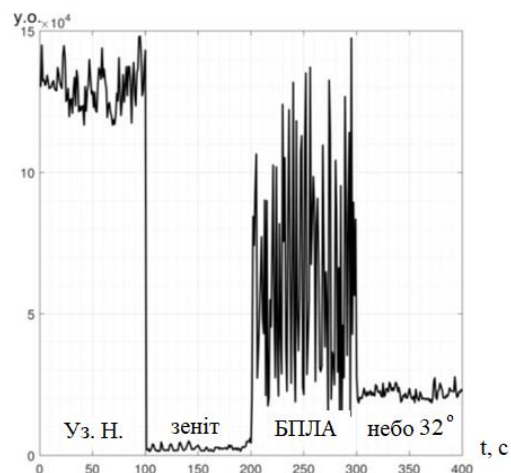
Проведені вимірювання радіотеплового випромінювання скловолоконного БПЛА (рис. 3.1(в)) показали, що значення його $T_{БПЛА}$ при середніх кутах візування в умовах ясної атмосфери зосереджені в районі 240К, 120К, 90К і 80К відповідно для 3мм (W), 8мм (Ka), 1,5 см (Ku) та 3см (X) ДХ відповідно.

На рис. 3.7 наведено приклад фрагмента радіометричного запису сигналів за наявності та відсутності БПЛА в 8мм ДХ на ГП. На підставі результатів серії таких вимірювань у чотирьох зазначених вище ДХ потім було змодельовано та побудовано кутові залежності очікуваних значень $T_{БПЛА}$ та їх контрастів (ΔT) на тлі неба.

Важливо та доречно зазначити, що було проведено додаткові виміри в каналі діапазону 20 ГГц, та який можна розглядати як альтернативний діапазону 12 ГГц. Ця додаткова ініціативна робота була пророблена в зв'язку зі специфічними результатами та особливостями обміру БПЛА в 3 см діапазоні радіохвиль. Йдеться про виявлений в результаті натурних вимірювань на відкритому повітрі надзвичайно високій рівень зовнішніх завад, що негативно впливає на роботу радіометра 3 см діапазону.



а)



б)

Рисунок 3.10 — Фрагмент радіометричного запису з використанням узгодженого навантаження (Уз.Н.) в 8мм ДХ на ГП (а) та фрагмент полігонного радіометричного запису сигналів в 3см діапазоні на круговій поляризації (б)

Панорамний огляд, проведений у зв'язку з цим з даху будівлі ХАІ за допомогою рупорної антени продемонстрував, що джерела цих перешкод розташовані в багатьох напрямках (рис. 3.11). Природа перешкод що спостерігалися різна і, ймовірно, їх джерелами являються лінії зв'язку, розташовані в околицях Харкова РЛС, телевізійні вишки і канали супутникового телебачення.

Як показали проведені спостереження, деструктивний вплив цього фактору можна зменшити або навіть усунути шляхом звуження ДС антени, або шляхом екранування широкоградусних антен, однак, не для всіх азимутальних і кутомісцевих напрямків. Логічно також було припустити, що ця обставина може підвищити спостережливість БПЛА за рахунок перевідбиття ними цих потужних перешкод. Наведені на рис. 3.10(б) записи підтверджують це припущення.

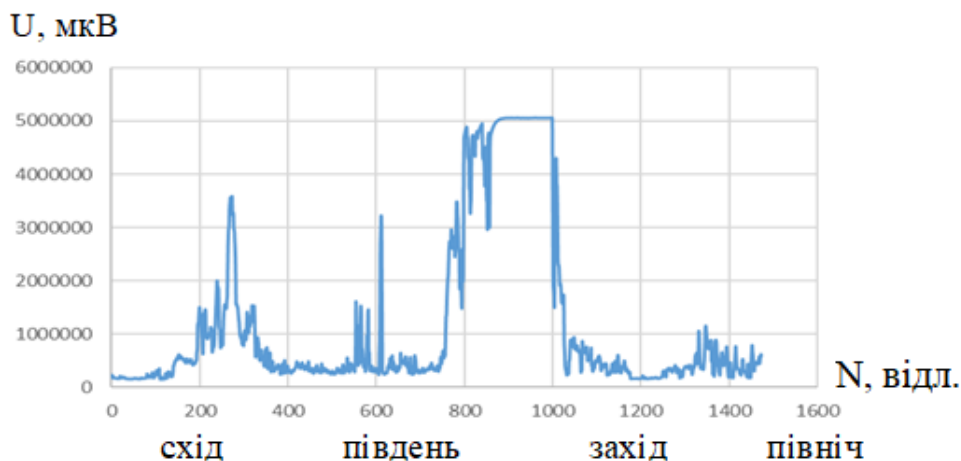


Рисунок 3.11 – Панорамний запис завадової ситуації в напрямку горизонту з майданчика для радіометричних спостережень в ХАІ

Однак проблема полягає в невивченості та непередбачуваності підвищень помітності, у впливі на можливість спостереження об'єкта, характеру місцевості і території. Треба також розуміти, що в такій завадовій ситуації не доводиться говорити про реалізацію режиму радіометрії в класичному вигляді при вимірах $T_{я}$ об'єкта.

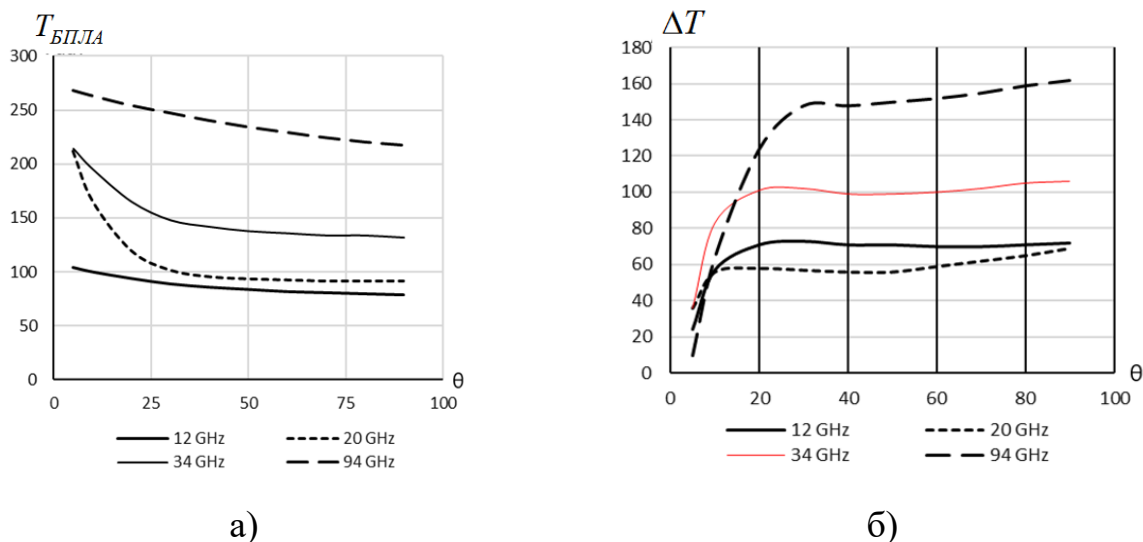


Рисунок 3.12 — Значення яскравісних температур БПЛА (а) переважно зі склопластику та контрастів яскравості (б) для умов ясної атмосфери

Саме у зв'язку з цим було прийнято рішення про побудову додаткового радіометра в найближчому альтернативному діапазоні частот – 20 ГГц і проведенні за його допомогою додаткових, замість до запланованих в 3 см ДХ вимірювань.

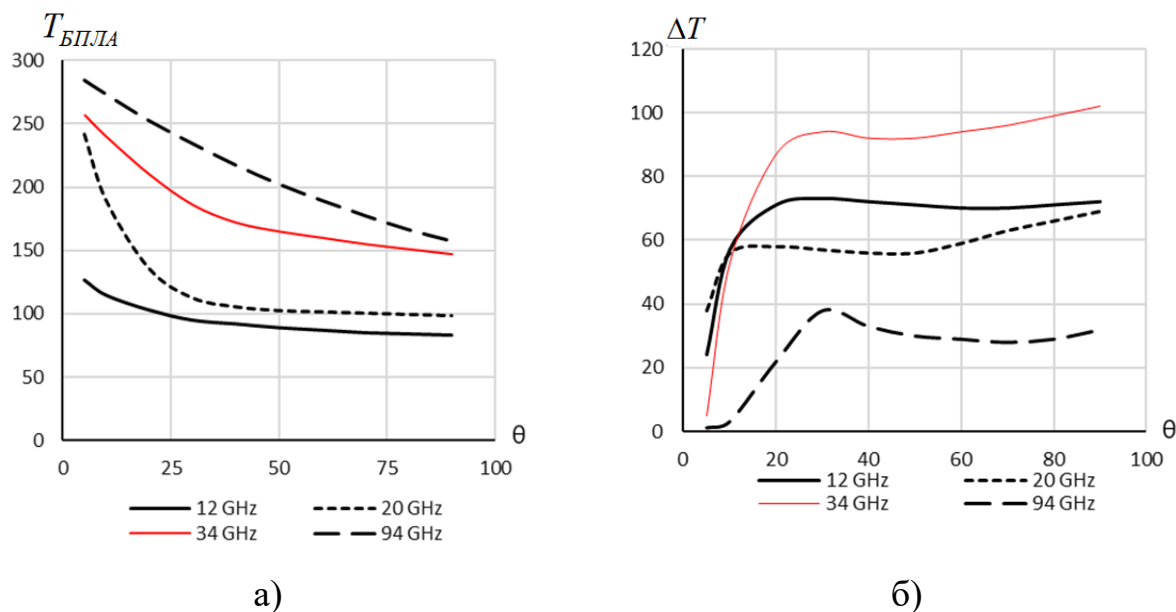


Рисунок 3.13 — Значення яскравісних температур БПЛА переважно зі скловолокна (а) і контрастів (б) для умов хмарної атмосфери

Аналіз отриманих даних показує, що в секторі близьких до ковзних кутів візування, в порівнянні з рештою кутів, спостерігаються істотно знижені значення контрастів, а також зменшення їх відмінностей для ДХ (рис. 3.12 – 3.14). При цьому в умовах ясного неба значення контрастів максимальні в Ка ДХ, за наявності потужного хмарного покриву контраст максимальний у Ку ДХ, а в дощову погоду – у Х ДХ.

У секторі решти (не ковзаючих) кутів візування проявляється істотна частотна залежність $T_{БПЛА}$ даного типу та її контрастів, величина яких знижується за умов ясної атмосфери майже втричі при переході від 3 мм до 3 см ДХ (рис.3.9). Якісно цю тенденцію можна пояснити тим, що відносно радіопрозорий на нижчих частотах матеріал корпусу БПЛА стає не радіопрозорим з підвищенням частоти. Зниження радіопрозорості може призводити до зростання втрат і

випромінювальної здатності матеріалу планера, а також зростання впливу перевідбитої і більш інтенсивної радіояскравості земної поверхні за рахунок зростання коефіцієнта відображення корпусу БПЛА.

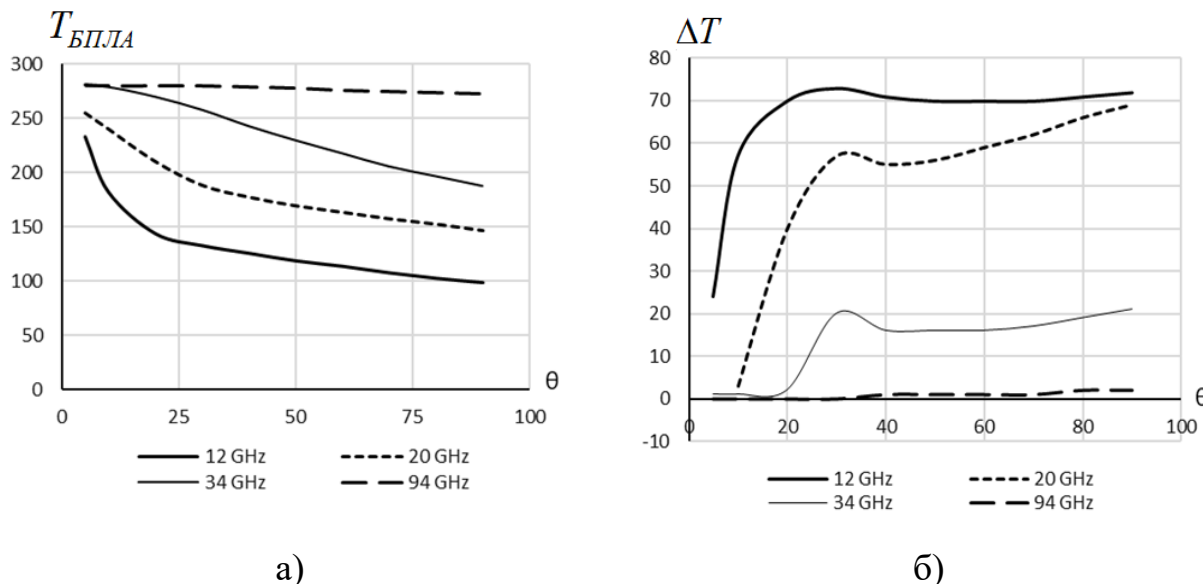


Рисунок 3.14 — Значення яскравісних температур БПЛА (а), виготовлених переважно зі скловолокна і контрастів (б) для умов дощової атмосфери

Останнє зауваження побічно підтвердилося наявністю суттєвих поляризаційних відмінностей у величині $T_{\text{БПЛА}}$, які спостерігалися в ході експериментів у 3 мм ДХ у секторі середніх кутів візування.

При появі потужної хмарності в аналогічному секторі кутів візування (рис. 3.13) має місце багаторазове зниження величини контрастів 3мм ДХ з максимальними контрастами 8мм ДХ і слабким впливом хмарності, а також практичною відсутністю такого впливу в діапазонах СМ хвиль.

Поява інтенсивного дощу (рис. 3.14) призводить до посилення зазначеної тенденції, аж до повного зникнення контрасту в 3мм ДХ, при цьому призводячи до зміщення максимальних значень контрастів у 3см ДХ.

Розрахункові оцінки дальностей достовірного виявлення БПЛА були проведені на основі методу максимальної правдоподібності [45] для різних значень

площі їх проєкцій, що спостерігаються, на область антен для чотирьох частотних діапазонів 12 ГГц, 20 ГГц, 34 ГГц і 94 ГГц.

Розрахунок ймовірностей виявлення таких об'єктів з урахуванням експериментальних значень контрастів і $T_{\text{я}}$ фону показав можливість пасивного виявлення з 90% ймовірністю і супроводу БПЛА на відстанях до декількох кілометрів [45]. Наприклад, розрахунки показують, що для фіксованого значення ширини ДС в один кутовий градус у всіх діапазонах хвиль, що розглядаються, дальність виявлення в СМ ДХ без дощу буде в 1.5 – 4 рази вище (залежно від погодних умов), ніж у діапазоні коротких ММ хвиль. Причому погодні умови слабо впливають на результати спостереження БПЛА в Х, К і Ка діапазонах і багаторазово знижують потенційні характеристики виявлення у W діапазоні вже за дощів середньої інтенсивності.

Результати аналогічних розрахунків дальностей виявлення ЛА з 90% ймовірністю, але для випадку однакових розмірів апертур антен (стосовно задач самонаведення, коли розмір носія радіометричної системи обмежує розмір її антени) у всіх діапазонах хвиль представлені на рис.3.15.

Ці залежності були отримані за умов ясної, хмарної та дощової атмосфери. В них, в якості як вхідних даних, розглянуто БПЛА з площею проєкції 5м^2 , який спостерігався під кутом місця 30° . При цьому, розмір апертури антенних систем всіх радіометрів був прийнятий рівним 0,5м, а шумові температури радіометрів становили 120К (у смузі прийому 4ГГц), 400К (5ГГц) та 600К (6ГГц) для діапазонів робочих частот 20ГГц, 34ГГц та 94ГГц.

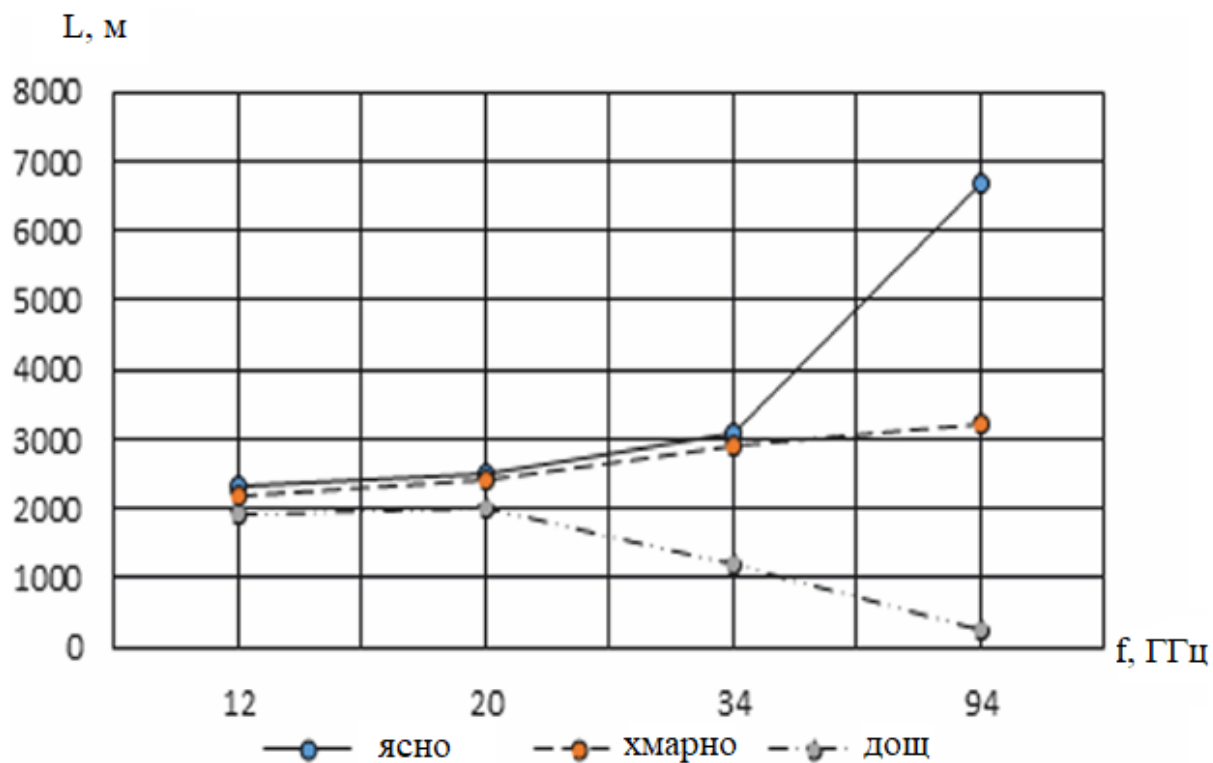


Рисунок 3.15 — Частотна залежність дальності виявлення ЛА

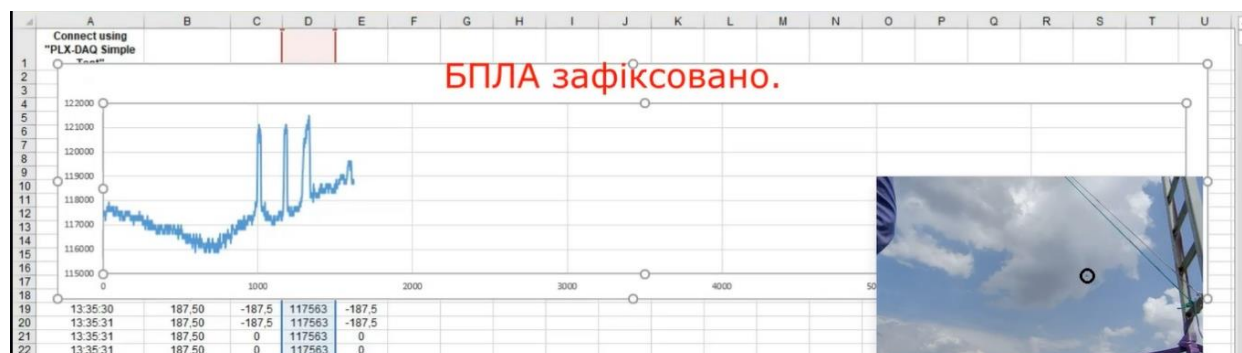
У результатах цих розрахунків (рис. 3.15) проглядається 2-х – 3-х кратна перевага використання діапазону коротких ММ хвиль порівняно з іншими діапазонами за всіх погодних умов, крім дощів середньої та високої інтенсивності. Аналіз отриманих даних свідчить про доцільність застосування 2-х – 3-х частотних радіометричних комплексів для підвищення надійності виявлення БПЛА незалежно від погодних умов. Проте, корисно пам'ятати, що критично несприятливі синоптичні ситуації становлять лише одиниці відсотків часу протягом року.

Також експериментальна перевірка проведених розрахункових оцінок була зроблена для мініатюрного БПЛА типу квадрокоптер в польоті з площею проекції $0,01\text{ м}^2$ на відстані кілька десятків метрів за допомогою розробленого для цих цілей вимірювального Комплексу (рис. 3.16), а також з площею проекції $0,007\text{ м}^2$ на відстані в кілька метрів за допомогою розробленого для цього чотиричастотного радіометричного блоку з рупорними антенами. На рисунку 3.16 показано

експериментальне виявлення міні БПЛА з майданчика для радіометричних спостережень в ХАІ.



а)



б)

Рисунок 3.16 — Зовнішній вигляд на майданчик вимірювань під час виявлення БПЛА в польоті (а) та фрагмент запису даних з радіометрів (б)

Дані цих експериментів дозволяють провести наступний перерахунок визначення дальності виявлення літальних апаратів з більшою площею проекції, і навіть проводити зіставлення з розрахунковими узагальненими теоретичними оцінками.

На рис. 3.17, як приклад, наведено фрагмент побудованого радіотеплового зображення ділянки неба в каналі 8мм ДХ для розробленого 3-х частотного

радіометричного комплексу. Видно реакцію вихідного сигналу радіометра на перебування мініатюрного квадрокоптера в центральній частині рисунка. Перерахунок дальності виявлення цього об'єкта з площею проєкції $S = 0,01\text{м}^2$ на площу проєкції БПЛА $S = 5\text{м}^2$ показав задовільне узгодження первинних даних натурального експерименту рис. 3.17 із результатами розрахункових оцінок.

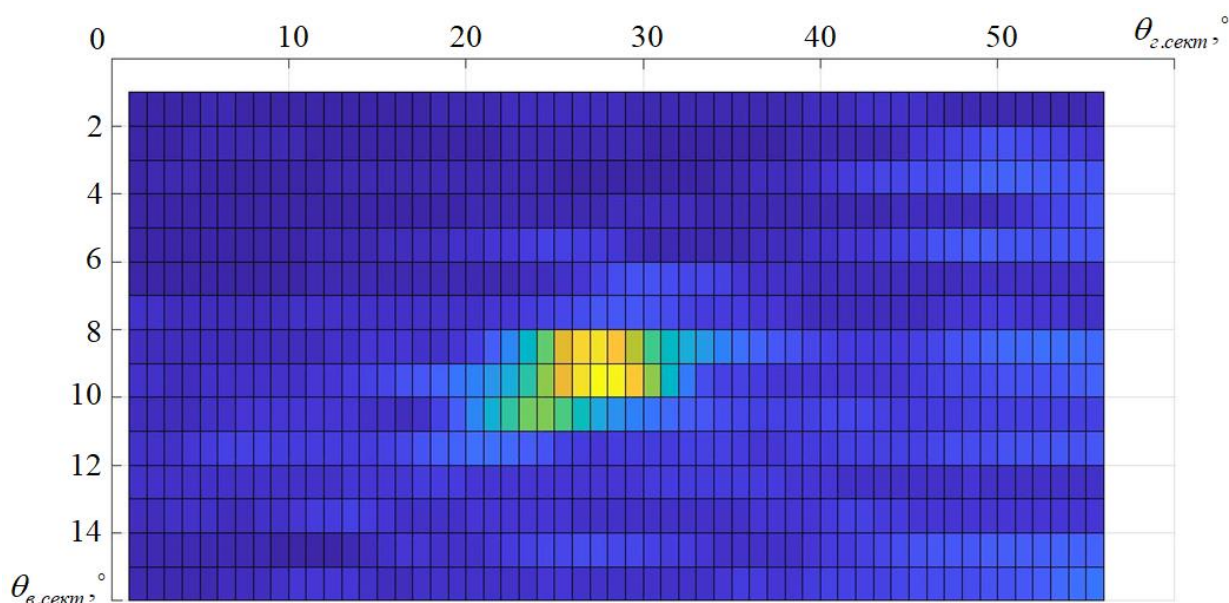


Рисунок 3.17 — Фрагмент побудованого радіотеплового зображення неба в присутності БПЛА в каналі 8мм ДХ на виході розробленої 3-х частотної радіометричної системи (по обох осях відкладено значення градусів сектора сканування)

Синхронні спостереження літаючого БПЛА були продовжені з вікна лабораторії радіофізичного корпусу, але вже за допомогою рупорних антен, знятих з вимірювального Комплексу, в 4-х ДХ. При цьому, використані рупорні антени були підібрані таким чином, що співвідношення ширин їх ДС між собою відповідали співвідношенням ДС АС, що використовуються в розробленому багаточастотному комплексі. Це дозволило:

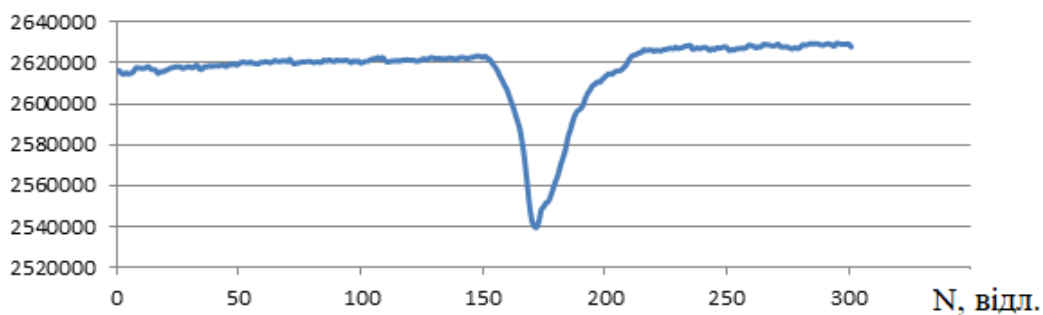
- оцінити та зіставити вплив ДХ на реакцію радіометрів при входженні БПЛА у пелюстку ДС кожного з каналів,

– врахувавши значення $K_{заповн.}$ пелюстки ДС рупорних антен спостережуваним БПЛА на малих відстанях, провести перерахунок на відповідні цим записам відстані при використанні дзеркальних АС вимірювального Комплексу, або для інших заданих розмірів та з іншими площами проєкції БПЛА.

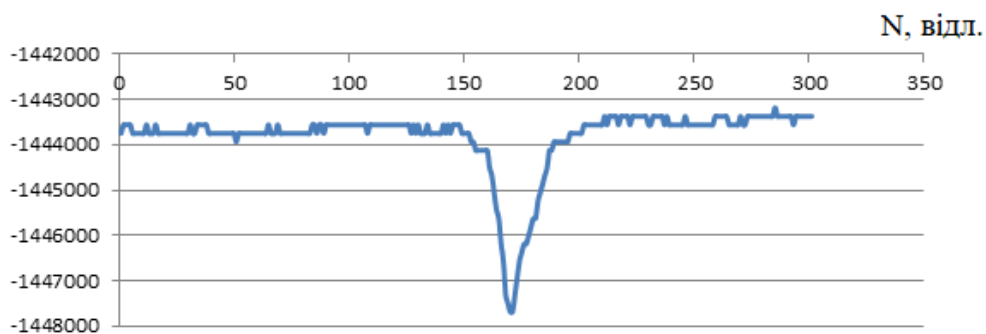
На рис. 3.18 показані приклади сканів області неба з мініатюрним ($S = 0.006\text{м}^2$) квадрокоптером на дальностях, що забезпечують значення K_z ДС АС об'єктом на рівнях $1\sqrt{54}$, $1\sqrt{120}$, $1\sqrt{425}$, $1\sqrt{600}$ для ДХ W, Ku та X відповідно. Коректний перерахунок показав, що такі значення K_z повністю відповідають спостереженню БПЛА з розміром $S = 5\text{м}^2$ на дальності близько 1500 м. Це означає, що реакція радіометрів розробленого макета вимірювального Комплексу з дзеркальними антенами (рис.3.16) на такий самий БПЛА на дальності 1500м буде аналогічною тій, що наведена на рис. 3.18. Сплеск на рисунку, викликаний появою БПЛА в ДС антен.

Декілька знижені значення співвідношення сигнал\шум в каналі 1,5см (рис. 3.18 г) в порівнянні з 3 см каналом (рис. 3.18, в) вочевидь, пов'язані зі зниженим значенням чутливості цього радіометра, яка становила на момент вимірювань величину 0,1К (у радіометрі 3см ДХ вона становила 0.04К).

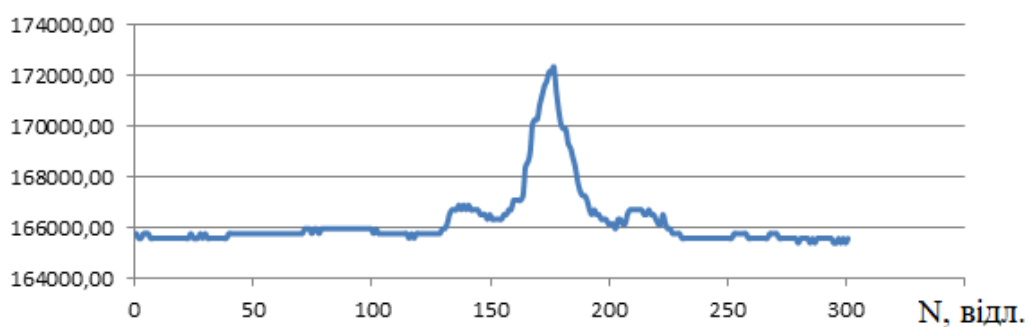
Отримана в широкому діапазоні хвиль база радіометричних контрастів різних типів БПЛА (ДОДАТОК А), які спостерігаються в статиці при різних тактичних та погодних умовах, а також зазначені на їх основі закономірності можуть бути корисними для прогнозних оцінок ефективності роботи та вибору найбільш кращих ДХ або набору робочих частот проєктованих радіометричних систем для військових систем та охорони особливо важливих об'єктів критичної інфраструктури.



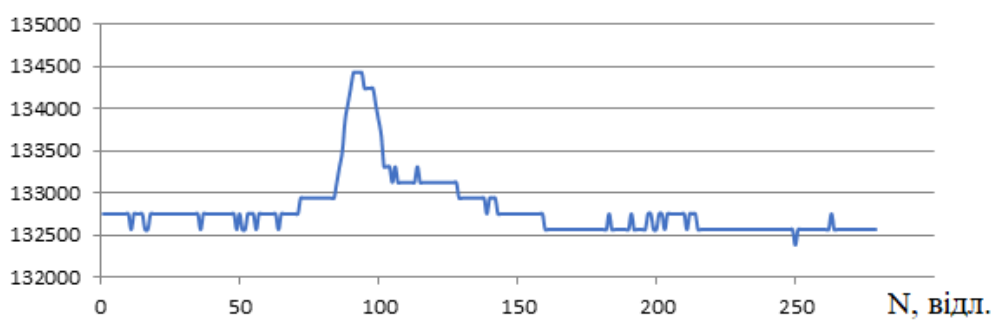
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.18 — Фрагмент запису вихідних сигналів послідовності азимутальних сканів сектора неба в каналах 3мм – $\delta T=0.007\text{K}$ (а), 8мм $\delta T=0.04\text{K}$ (б), 1.5см $\delta T=0.1\text{K}$ (в), 3см $\delta T=0.04\text{K}$ (г) ДХ

Подальші дослідження даного напрямку доцільно було б зосередити на розвитку та уточненні модельних представлень, що враховують дані вже проведених експериментів, а також на експериментальному вивченні особливостей контрастування БПЛА на тлі земної поверхні при різноманітності сезонно-погодних умов.

Висновки до розділу.

В даному розділі вперше описано результати унікальних для України досліджень з виявлення малорозмірних БПЛА та тлі атмосфери за допомогою пасивної багаточастотної радіометричної системи.

Вимірювання проводились за різних погодних умов з різними зразками БПЛА на протязі більше року, тому результати дозволять з впевненістю свідчити про виконання поставлених задач, а саме отримання достовірних даних для розрахунків потенційно можливих характеристик виявлення, а також максимально можливих дальностей виявлення. Експериментальні дані та перерахунки показують, що з досяжною чутливістю радіометрів наявних у складі комплексу виявлення можна спостерігати БПЛА з розміром $S = 5\text{м}^2$ на дальності близько 1500 м.

Вперше була створена база радіометричних контрастів різних типів та класів БПЛА, які спостерігаються в статистиці при різних тактичних та погодних умовах, що в подальшому дозволить створити апріорні дані для класифікації та виявлення різноманітних типів БПЛА.

4. УЗАГАЛЬНЕНА СХЕМА РАДІОМЕТРИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ТА АНАЛІЗ ЇЇ ПОТЕНЦІАЛЬНОЇ МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА, ЩО СПОСТЕРІГАЮТЬСЯ НА ТЛІ НЕБА У РІЗНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ І ТАКТИЧНИХ УМОВАХ

В Україні та світі швидко розвиваються технології виробництва БПЛА різних класів. Невеликі за вагою і габаритами і майже непомітні для більшості інформаційно-вимірjuвальних систем БПЛА почали використовувати в різних галузях – від народного господарства до мультимедіа та реклами.

Разом з їх корисним застосуванням з'явилися нові небезпеки та інциденти – зіткнення БПЛА з людьми, спорудами, пам'ятками культури, перевезення злочинних товарів, терористичні акти, польоти над забороненими зонами та в межах аеропортів. Виявлення БПЛА та контроль їх переміщення в населених пунктах і поблизу критичних об'єктів стає одним із найважливіших завдань служби управління повітряним рухом. Існуючі системи оптичного, акустичного та радіолокаційного діапазонів не можуть ефективно виконувати подібні завдання в складних метеорологічних умовах. В якості доповнення до вже розроблених систем виявлення пропонується використовувати радіометричні системи, які реєструють власне радіотеплове випромінювання БПЛА.

В даному розділі запропонована структурна схема радіометричного комплексу. Показано, що отримавши базу даних радіометричних контрастів, можлива подальша реалізація технічних рішень щодо підвищення можливостей моніторингу повітряного простору для виявлення БПЛА. Надано рекомендації щодо практичного вибору порогу виявлення БПЛА для забезпечення ймовірності правильного виявлення не гірше 0,9 для різних кутів спостереження, стану атмосфери, розмірів та матеріалу виготовлення.

4.1. Структурна схема радіометричного комплексу

Основними операціями в алгоритмі (2.7) є формування оцінок енергій прийнятих коливань $u_i(t)$ і вагове усереднення цих оцінок з урахуванням характеристик приймачів і яскравих температур БПЛА та атмосфери в різних частотних діапазонах. Вагове усереднення з визначеними коефіцієнтами C_i є новою оптимальною операцією. Водночас у [1-8, 14, 18] досліджено операцію оцінки енергії енергетичними приймачами.

За останні 50 років було запропоновано ряд практичних рекомендацій [9, 63-66] щодо побудови енергетичних приймачів та розроблено низку додаткових заходів для отримання ефективних і незміщених оцінок параметрів радіотеплових джерел. Такі операції повинні включати модуляцію корисних сигналів на входах приймачів, періодичне калібрування приймачів, термостабілізацію вхідних трактів. З урахуванням досвіду розробки радіометричних приймачів запропоновано структурну схему радіометричного комплексу, яка наведена на рис. 4.1.

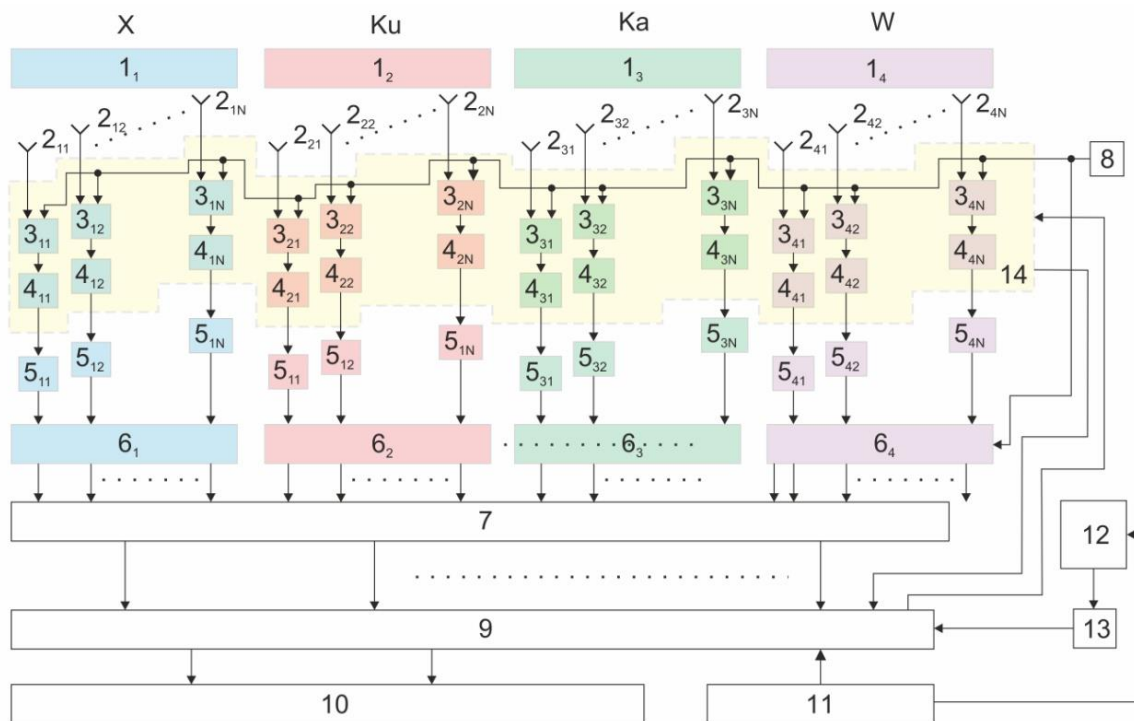


Рисунок 4.1 – Структурна схема радіометричного комплексу виявлення БПЛА в різних погодних умовах

Радіометричний комплекс працює наступним чином. Будь-яке тіло з температурою вище нуля Кельвінів випромінює власне радіотеплове випромінювання, величина якого може бути описана в одиницях яскравісної температури. Зазвичай антропогенні джерела радіотеплового випромінювання мають яскравісну температуру вищу за яскравісну температуру неба і можуть бути виявлені за допомогою радіометричного комплексу. Спочатку в кожному з M каналів комплексу на поверхню антени 1 потрапляє радіотеплове випромінювання. Антена 1 фокусує випромінювання в зону, де розміщено набір опромінювачів 2. N опромінювачів в кожному каналі реалізують паралельний огляд простору і дозволяють підвищити час спостереження за джерелом радіотеплового випромінювання. Підвищення часу спостереження призводить до підвищення дальності виявлення джерел радіотеплового випромінювання на тлі неба.

З виходу опромінювачів 2 сигнали модулюються у N PIN діодних модуляторів 3, підсилюються у N широкосмугових малошумливих підсилювачах 4 та детектуються у N квадратичних детекторах 5. Модуляція необхідна для подальшої компенсації в інтелектуальному процесорі 9 впливу флікер-шуму на результати вимірювань. PIN діодний модулятор 3 періодично закриває вхідний тракт приймача та керується меандровим сигналом з виходу керуючого генератора 8.

Після детекторів 5 сигнали в кожному з M каналів перетворюються у цифровий вигляд за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 6. Після представлення сигналів різних каналів у цифровій формі, виконується їх фільтрація від флікер-шуму та міжканальне об'єднання в блоці цифрової обробки інформації 7 у вигляді вагового підсумовування.

Для фільтрації від флікер-шуму результатів вимірювання, цифрові сигнали з урахуванням сигналу від керуючого генератора 8 розділяються на напівперіоди. В першому напівперіоді спостерігається сигнал, що пропорційний сумі яскравісних температур джерела радіотеплового випромінювання і внутрішніх шумів, які спотворені флікер-шумом. В другому напівперіоді модуляції спостерігається лише сигнал від внутрішніх шумів, які також спотворені флікер-шумом. В блоці

цифрової обробки інформації 7 виконується ділення оцінок яскравісних температур на різних періодах модуляції. Для визначення істинного значення яскравісної температури джерела радіотеплового випромінювання необхідно знати яскравісну температуру внутрішніх шумів.

Повністю стаціонарні та надійні вимірювання можливо отримати, коли яскравісна температура внутрішніх шумів незмінна у часі. Для цього у структурі радіометричного комплексу передбачено блок термостабілізації 14, що охоплює вхідний тракт – всі PIN діодні модулятори 3 та широкосмугові малoshумливі підсилювачі 4. Виміряна температура в середині блока термостабілізації 14 подається в інтелектуальний процесор 9, що реалізує алгоритми автоматичного підтримання заданої температури в середині блока термостабілізації 14 та видає сигнали керування в блок 14.

Результати вагового підсумовування даних з різних каналів поступають в інтелектуальний процесор 9 для прийняття рішення про наявність або відсутність джерела радіотеплового випромінювання в зоні спостереження. Обробка в інтелектуальному процесорі 9 може виконуватись за оптимальними алгоритмами або з використанням сучасних методів машинного навчання.

Для дослідження обраної частини неба в структурі комплексу передбачено органи управління 11, що налаштовують сектор огляду та швидкість сканування. Сигнали управління поступають в інтелектуальний процесор 9 та на антенно-поворотний пристрій 12, що реалізує механічне переміщення діаграми спрямованості антен у просторі. Поточне значення кутів повороту антенно-поворотного пристрою 12 за кутом місця і азимутом реєструється датчиком кутів 13. Сигнали з датчиків кутів поступають в інтелектуальний процесор 9, де з урахуванням заданого сектору огляду, швидкості сканування, що надаються з органів управління 11, та результатів вимірювань яскравісних температур формується радіометричне зображення зони спостереження.

До радіометричного зображення в інтелектуальному процесорі 9 застосовуються методи обробки та стиснення зображень. Оброблені зображення та результати вирішення задачі виявлення з виходів інтелектуального процесору 9

подаються до входів блока кінцевої обробки даних 10, де відбувається відображення, збереження та передача отриманих даних.

Для підвищення дальності виявлення джерел радіотеплового випромінювання на тлі неба в радіометричному комплексі обов'язково використовувати набір опромінювачів, широкосмугові малошумливі підсилювачі та методи інтелектуальної обробки результатів вимірювань, методи машинного навчання. Для забезпечення всепогодності в комплексі необхідно обов'язково мати канал прийому власного радіотеплового випромінювання у X діапазоні хвиль, а для забезпечення високої роздільної здатності – у W діапазоні хвиль. Більш високочастотні діапазони мають значне ослаблення електромагнітних хвиль на трасі розповсюдження, а більш низькочастотні – громіздкі антенні системи та низьку роздільну здатність за кутовими координатами. Між діапазонами X та W можливе використання Ku, K, Ka та V діапазонів хвиль для підвищення кількості інформації, що впливає на збільшення дальності виявлення джерел радіотеплового випромінювання.

4.2. Розрахунок потенційних можливостей правильного виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери

Щоб перевірити потенційні можливості системи були проведені розрахунки ймовірностей правильного виявлення та ймовірності пропуску цілей для наступних варіацій:

- різних значень ймовірностей хибної тривоги (від 10^{-2} до 10^{-5}),
- для чотирьох діапазонів частот (10-12 ГГц, 20-22 ГГц, 35-36 ГГц та 94-96 ГГц),
- різних типів БПЛА (з варіацією площі поверхні від $0,5 м^2$ до $20 м^2$),
- набору кутів візування (5° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° , 90°),
- відсутності та наявності специфічних станів атмосфери (хмарність, дощ).

Слід зазначити, що вплив туману, мряки та смогу на ймовірність виявлення є незначним у порівнянні з хмарами та опадами в цих діапазонах частот.

У якості вихідних аналітичних виразів будемо використовувати наступні

диференційні закони розподілу ймовірностей результатів оцінок яскравісних температур для випадків наявності та відсутності БПЛА:

$$P(\eta|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ})}{\sqrt{0,5M}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{[\eta - (T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ})]^2}{2(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ})^2 M^{-1}}\right), \quad (4.1)$$

$$P(\eta|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{(T_{atm}^{\circ} + \Delta T_{БнЛА}^{\circ} + T_n^{\circ})}{\sqrt{0,5M}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{[\eta - (T_{atm}^{\circ} + \Delta T_{БнЛА}^{\circ} + T_n^{\circ})]^2}{2(T_{atm}^{\circ} + \Delta T_{БнЛА}^{\circ} + T_n^{\circ})^2 M^{-1}}\right), \quad (4.2)$$

де M – кількість некорельованих відліків шумового процесу, що підлягає обробці,

T – час спостереження,

ΔF – ширина смуги вхідного тракту приймача, Гц

$\eta = Y_{\Delta}/0,5M \cdot k$ – нормований випадковий процес Y_{Δ} на виході радіометричної

системи виявлення БПЛА,

k – постійна Больцмана,

T_{atm}° – яскравісна температура фонового випромінювання атмосфери, К

$\Delta T_{БнЛА}^{\circ}$ – приріст яскравісної температури над фоном при наявності БПЛА в зоні спостереження, К;

T_n° – яскравісна температура внутрішнього шуму приймача.

Щільності розподілу ймовірностей (4.1) і (4.2) зображені на рис. 4.2. Найбільший інтерес на цих графіках представляють величини

$$D(Y_{0\Delta}) = \int_{Y_{0\Delta}}^{\infty} P(Y_{\Delta}|1) dY_{\Delta},$$

$$M(Y_{0\Delta}) = \int_{-\infty}^{Y_{0\Delta}} P(Y_{\Delta}|1) dY_{\Delta} \text{ та}$$

$$L(Y_{0\Delta}) = \int_{Y_{0\Delta}}^{\infty} P(Y_{\Delta}|0) dY_{\Delta},$$

що визначають ймовірність правильного виявлення $D(Y_{0\Delta})$, ймовірність пропуску цілі $M(Y_{0\Delta})$ та ймовірність хибної тривоги $L(Y_{0\Delta})$.

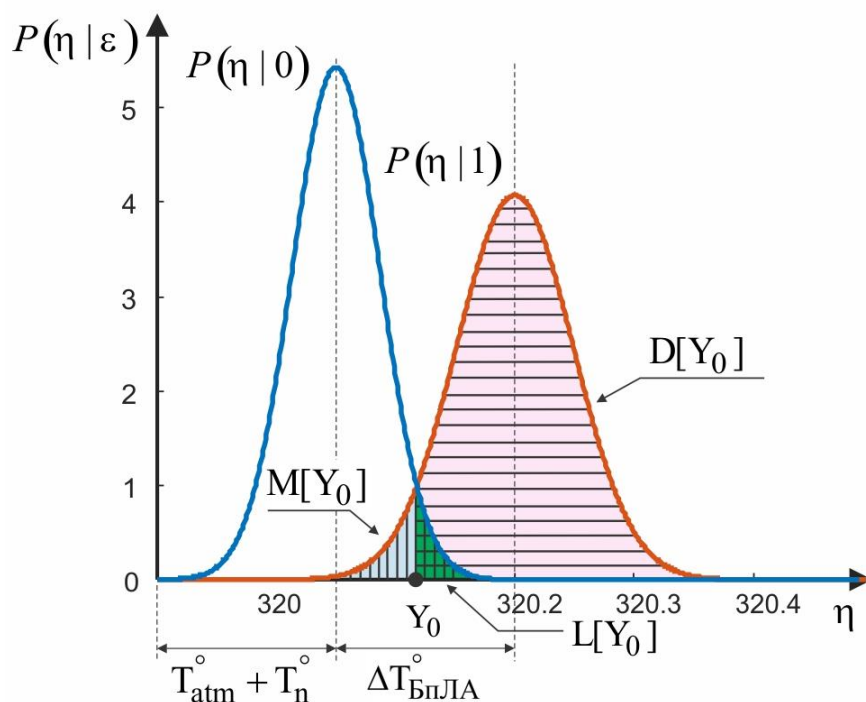


Рисунок 4.2 – Щільності ймовірностей вихідного ефекту радіометричної системи при наявності та відсутності об'єкта на тлі неба

Розглянемо ймовірності попадання випадкової величини Y_{Δ} в межі під кривими $P(\eta|0)$ та $P(\eta|1)$ правіше та лівіше порогу Y_0 , як показано на рис. 4.2. Для практичної реалізації 3-х частотного радіометричного комплексу цей поріг можна обрати у розмірі $Y_0 = T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} + \Delta T_{БПЛЛА}^{\circ} / 2$. На практиці поріг слід вибрати беручи до уваги величини $P(0)$ і $P(1)$, розраховуючи ймовірність хибної тривоги $L(Y_0)$.

Ймовірність правильного виявлення $D(Y_0)$ запишемо наступним чином:

$$D(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(\eta|1) dY = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy. \quad (4.3)$$

Величину y_0 доцільно також записати у наступному вигляді

$$y_0 = \frac{Y_0 - \Delta T_{БнЛА}^\circ}{\sigma_{\eta(u|1)}} = \frac{Y_0}{\sigma_{\eta(u|1)}} - \frac{\Delta T_{БнЛА}^\circ \sqrt{0,5M}}{(T_{atm}^\circ + \Delta T_{БнЛА}^\circ + T_n^\circ)} = \frac{Y_0}{\sigma_{\eta(u|1)}} - \mu. \quad (4.4)$$

В (4.4) величина

$$\begin{aligned} \mu &= \sqrt{0,5M} \frac{\Delta T_{БнЛА}^\circ}{(T_{atm}^\circ + \Delta T_{БнЛА}^\circ + T_n^\circ)} = \frac{\Delta T_{БнЛА}^\circ}{\frac{(T_{atm}^\circ + \Delta T_{БнЛА}^\circ + T_n^\circ)}{\sqrt{0,5M}}} = \\ &= \frac{\Delta T_{БнЛА}^\circ}{\sqrt{2} \frac{(T_{atm}^\circ + \Delta T_{БнЛА}^\circ + T_n^\circ)}{\sqrt{T\Delta F}}} = \frac{\Delta T_{БнЛА}^\circ}{\Delta T_{\min}} \end{aligned}$$

μ – можна вважати відношенням сигнал-завада;

ΔT_{\min} – флуктуаційна чутливість радіометричного приймача;

змінна $y = \frac{Y - \Delta T_{БнЛА}^\circ}{\sigma_{\eta(u|1)}}$;

дисперсія $\sigma_{\eta(u|1)} = \frac{(T_{atm}^\circ + \Delta T_{БнЛА}^\circ + T_n^\circ)}{\sqrt{0,5M}}$.

Ймовірність пропуску цілі $M(Y_0)$ розрахуємо за наступною формулою:

$$M(Y_0) = 1 - \int_{Y_0}^{\infty} P(\eta | 1) dY = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy. \quad (4.5)$$

Ймовірність хибної тривоги запишемо у наступному вигляді

$$L(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(\eta | 0) dY = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (4.6)$$

де $x = \frac{\eta}{\sigma_{\eta(u|0)}}$, $x_0 = \frac{Y_0}{\sigma_{\eta(u|0)}}$, $\sigma_{\eta(u|0)} = \frac{(T_{atm}^\circ + T_n^\circ)}{\sqrt{0,5M}}$.

Для розрахунку величин $D(Y_0)$, $M(Y_0)$, $L(Y_0)$ у якості вихідних значень шумових температур приймачів T_n° визначимо наступні:

- у діапазоні частот 10-12 ГГц $T_n^\circ = 100K$,
- у діапазоні частот 20-22 ГГц $T_n^\circ = 130K$,
- у діапазоні частот 35-36 ГГц $T_n^\circ = 600K$,
- у діапазоні частот 94-96 ГГц $T_n^\circ = 3000K$.

Різні стани та атмосферні явища та величини яскравісних температур в залежності від кутів спостереження за атмосферою θ_{atm} наведені у табл. 4.1-4.4. Початкова точна відліку кута – напрямом горизонту.

Таблиця 4.1. Величини $T_{неба}$ для діапазону 10-12 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 80 | 43 | 23 | 16 | 14,7 | 13,3 | 12 | 10,7 | 9,3 | 8 |
| Наявна хмарність | 103 | 58 | 32 | 22 | 20 | 18 | 16,5 | 14,7 | 12,8 | 11 |
| Дощова погода | 209 | 125 | 73 | 60 | 55 | 49 | 43,5 | 38 | 32,5 | 27 |

Таблиця 4.2. Величини $T_{неба}$ для діапазону 20-22 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|-----|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 176 | 110 | 62 | 45 | 41,3 | 37,7 | 34 | 30,3 | 26,7 | 23 |
| Наявна хмарність | 204 | 134 | 79 | 56 | 52 | 47 | 43 | 38,7 | 34,3 | 30 |
| Дощова погода | 273 | 237 | 170 | 131 | 122 | 113 | 104 | 95 | 86 | 77 |

Таблиця 4.3. Величини $T_{неба}$ для діапазону 35-36 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|------|------|-----|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 179 | 112 | 64 | 46 | 42,5 | 39 | 35,5 | 32 | 28,5 | 25 |
| Наявна хмарність | 252 | 187 | 123 | 92 | 85 | 77 | 70 | 62,7 | 55,3 | 48 |
| Дощова погода | 280 | 278 | 268 | 238 | 226 | 214 | 202 | 190 | 178 | 166 |

Таблиця 4.4. Величини $T_{неба}$ для діапазону 94-96 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-------|------|-------|-------|-------|-----|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 258 | 199 | 130 | 99 | 91,7 | 84,3 | 77 | 69,7 | 62,3 | 55 |
| Наявна хмарність | 280 | 271 | 230 | 196 | 184 | 172 | 160,5 | 148,7 | 136,8 | 125 |
| Дощова погода | 280 | 280 | 280 | 280 | 278,5 | 277 | 275,5 | 274 | 272,5 | 271 |

Згідно проведених експериментальних вимірювань, яскравісні температури БПЛА $T_{БПЛА}^{\circ}$ в більшій мірі зробленого зі склотекстоліту при ясній атмосфері мають наступні значення:

- при робочій частоті 10-12 ГГц $T_{БПЛА}^{\circ} = 86K$ при куті спостереження 40°,
- при робочій частоті 20-22 ГГц $T_{БПЛА}^{\circ} = 96K$ при куті спостереження 40°,
- при робочій частоті 35-36 ГГц $T_{БПЛА}^{\circ} = 120,8K$ при куті спостереження 40° і $T_{БПЛА}^{\circ} = 64K$ при куті спостереження 90°,
- при робочій частоті 94-96 ГГц $T_{БПЛА}^{\circ} = 246,7K$ при куті спостереження 30°.

Через те, що кут спостереження за атмосферою впливає на величину $T_{неба}$, можна зробити висновок, що так само буде змінюватися і температура безпілотних літальних апаратів, особливо при різних атмосферних явищах, наприклад в дощову погоду. Залежність $T_{БПЛА}^{\circ}$ від величини кута спостереження можна описати моделлю

з експоненціального виду, тому було введено модель для $T_{БПЛА}^\circ$ у вигляді:

$$T_{БПЛА}^\circ = \kappa_1 e^{-\kappa_2 \theta} + \kappa_3. \quad (4.7)$$

Використовуючи модель (4.7), експериментальні вимірювання та відомості про коефіцієнти відбиття поверхонь під кутами ковзання, були розраховані значення $T_{БПЛА}^\circ$ зі склотекстоліту для різних частот.

Таблиця 4.5. Значення $T_{БПЛА}^\circ$ зі склотекстоліту для діапазону 10-12 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|-----|------|------|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 103,5 | 99,6 | 93,5 | 89,1 | 86 | 83,8 | 82,2 | 81 | 80,2 | 79,6 |
| Наявна хмарність | 126,5 | 114,6 | 102,5 | 95,1 | 91,5 | 88,8 | 86,7 | 85 | 83,7 | 82,6 |
| Дощова погода | 232,5 | 181,6 | 143,5 | 133 | 126 | 119 | 114 | 108 | 103 | 98,6 |

Таблиця 4.6. Значення $T_{БПЛА}^\circ$ зі склотекстоліту для діапазону 20-22 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 213,6 | 165,9 | 119,4 | 102,3 | 96 | 93,7 | 92,8 | 92,5 | 92,4 | 92,4 |
| Наявна хмарність | 241,6 | 189,9 | 136,4 | 113,3 | 106,3 | 103,4 | 101,8 | 100,9 | 100,1 | 99,36 |
| Дощова погода | 310,6 | 292,9 | 227,4 | 188,3 | 176,7 | 169 | 162,8 | 157,2 | 151,7 | 146,4 |

Таблиця 4.7. Значення $T_{БПЛА}^\circ$ зі склотекстоліту для діапазону 35-36 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 211,9 | 194,7 | 165 | 140,7 | 120,8 | 104,5 | 91,2 | 80,3 | 71,3 | 64 |
| Наявна хмарність | 256,8 | 239,5 | 209,9 | 185,6 | 165,7 | 149,4 | 136 | 125,1 | 116,2 | 108,8 |
| Дощова погода | 280,5 | 279 | 270 | 258,2 | 243,2 | 229,7 | 217,6 | 206,8 | 197,2 | 188,5 |

Таблиця 4.8. Значення $T_{БПЛА}^{\circ}$ зі склотекстоліту для діапазону 94-96 ГГц

| Стан атмосфери | Кут спостереження за атмосферою | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Без хмар | 267,9 | 263,1 | 254,4 | 246,7 | 240 | 234,2 | 229 | 224,6 | 220,6 | 217,2 |
| Наявна хмарність | 284,1 | 272,9 | 252,2 | 233,6 | 217,1 | 202,2 | 189 | 177,1 | 166,4 | 156,9 |
| Дощова погода | 280,3 | 280,3 | 280,3 | 280,3 | 278,8 | 277,5 | 276,3 | 275,2 | 274,2 | 273,4 |

Розміри БПЛА були вибрані такі: $0,5\text{ м}^2$, 1 м^2 , 5 м^2 , 10 м^2 , 20 м^2 . Це сумарна площа нижньої частини БПЛА, яка складається з фюзеляжу та крил. У розрахунках будуть використані площі проекції, перераховані до області антени, що орієнтована під кутом візування θ_{atm} . Геометрія зондування показана на рис. 4.3.

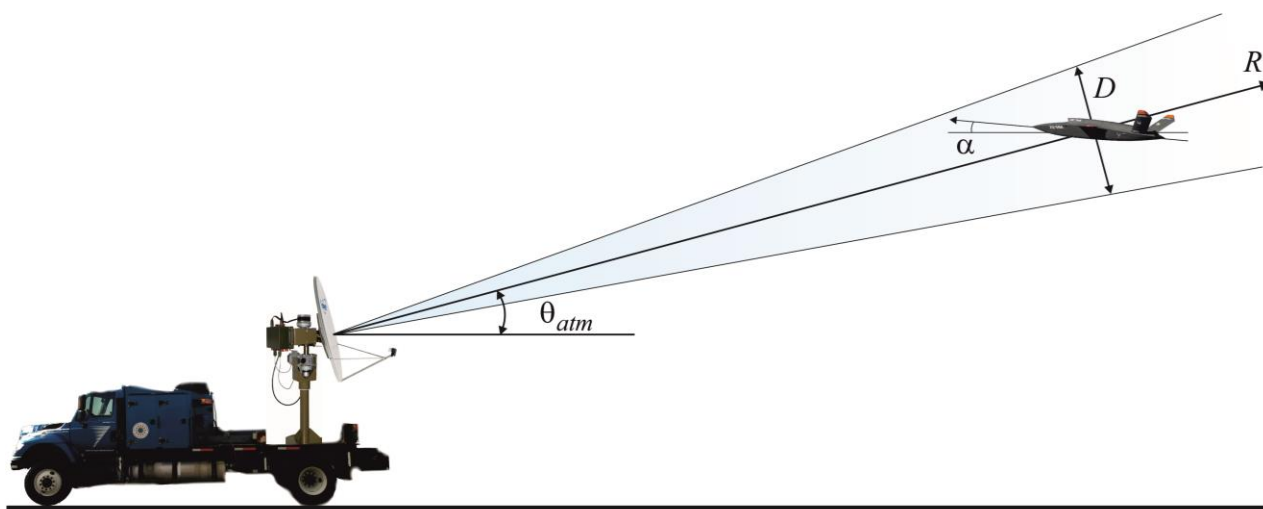


Рисунок 4.3 – Геометрія зондування БПЛА радіометричним комплексом

Відповідно до рис. 4.3, ефективну площу БПЛА $\bar{S}_{\text{БнЛА}}$, що буде впливати на $D(Y_0)$ та $L(Y_0)$ розраховується за формулою:

$$\bar{S}_{\text{БнЛА}} = S_{\text{БнЛА}} \cdot \sin(\theta_{\text{atm}} + \alpha) + K \cdot S_{\text{БнЛА}} \cdot \cos(\theta_{\text{atm}} + \alpha), \quad (4.8)$$

де α – кут атаки БПЛА,

K – коефіцієнт пропорційності площі передньої (тильної) частини БПЛА до площі нижньої частини БПЛА.

Звичайно, що коефіцієнт K є унікальною величиною, яку можна оцінити тільки при проведенні великої кількості вимірювань з різними прикладами БПЛА, проте при збільшенні площі БПЛА цей коефіцієнт зростає. Для моделювання було прийнято, що $K = 0,1$.

Смуга пропускання Δf для різних приймачів буде дорівнювати:

$$\Delta f_{3\text{см}} = 1\text{ГГц}, \Delta f_{1,5\text{см}} = 500\text{МГц}, \Delta f_{8\text{мм}} = 4,5\text{ГГц}, \Delta f_{3\text{мм}} = 1200\text{МГц}.$$

Нехай ДС антен мають однакові розміри у обох площинах. Ширина цих

діаграм для різних діапазонів дорівнює $\Delta\theta_{3см} = 2^\circ$, $\Delta\theta_{1,5см} = 1,4^\circ$, $\Delta\theta_{8мм} = 0,87^\circ$ та $\Delta\theta_{3мм} = 0,66^\circ$.

Виходячи із практичного застосування систем виявлення БПЛА швидкість сканування зафіксуємо на величині 20° за секунду. Постійні часу спостереження для кожної ДС розраховані за формулами:

$$\begin{aligned} T_{3см} &= \frac{\Delta\theta_{3см}}{20^\circ} \cdot 1с = 0,1с, \\ T_{1,5см} &= 70 мс, \\ T_{8мм} &= 43,5 мс, \\ T_{3мм} &= 33 мс. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Отримані величини (4.9) дозволять отримувати радіометричні зображення без втрат в просторовій роздільній здатності.

Приріст $\Delta T_{БПЛА}^\circ$ будемо розраховувати приймаючи до уваги той факт, що для різної дальності R від приймача до БПЛА в діаграму спрямованості буде потрапляти не тільки випромінювання БПЛА, а і випромінювання навколишнього середовища, тобто

$$T_\phi^\circ + \Delta T_{БПЛА}^\circ = T_{атм}^\circ \left(1 - \frac{S_{БПЛА}}{S_{ДН}(R)} \right) + T_{БПЛА}^\circ \frac{S_{БПЛА}}{S_{ДН}(R)}, \text{ для } S_{БПЛА} \leq S_{ДН}(R), \quad (4.10)$$

$$T_\phi^\circ + \Delta T_{БПЛА}^\circ = T_{БПЛА}^\circ, \text{ для } S_{БПЛА} > S_{ДН}(R), \quad (4.11)$$

де $S_{БПЛА}$ буде задано в залежності від типу об'єкта спостереження,

$$S_{ДН}(R) = \pi(D/2)^2 = \pi(\Delta\theta R/2)^2 \quad (4.12)$$

– площа перерізу діаграми спрямованості на дальності R .

Результати моделювання подано в Додатку Б.

Головні таблиці з результатами:

Узагальнені розрахункові дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 на тлі атмосфери без хмар для $L = 10^{-2}$ наведені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9. Значення $D_{\text{виявл.}}$ БПЛА з ймовірністю 0,9 без хмарності.

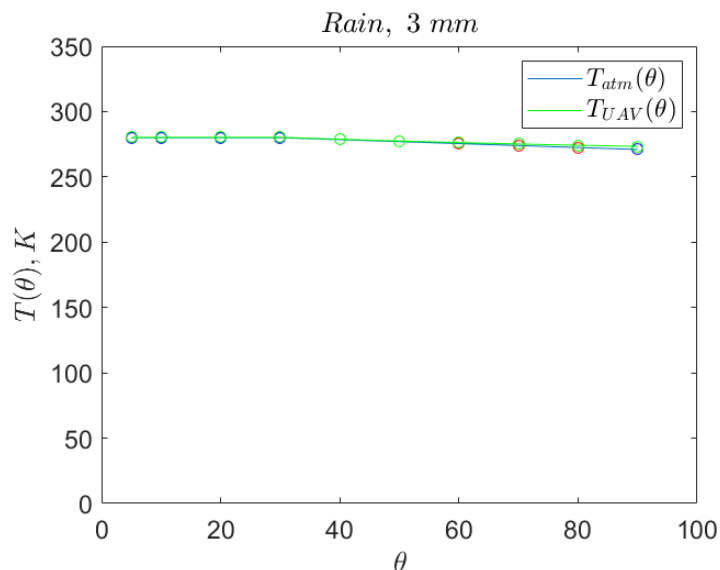
| Діапазони частот радіометрів | Площа БПЛА | | | | |
|------------------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 0,5 м ² | 1 м ² | 5 м ² | 10 м ² | 20 м ² |
| 10-12 ГГц | 771 м | 1090 м | 2436 м | 3445 м | 4872 м |
| 20-22 ГГц | 611 м | 863 м | 1930 м | 2729 м | 3859 м |
| 35-36 ГГц | 1011 м | 1429 м | 3195 м | 4518 м | 6390 м |
| 94-96 ГГц | 510 м | 721 м | 1611 м | 2278 м | 3221 м |

Узагальнені результати розрахунку дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 на тлі хмарної атмосфери для $L = 10^{-2}$ наведені в табл. 4.10. В дужках зазначено на скільки зменшилась дальність в порівнянні з ясною атмосферою.

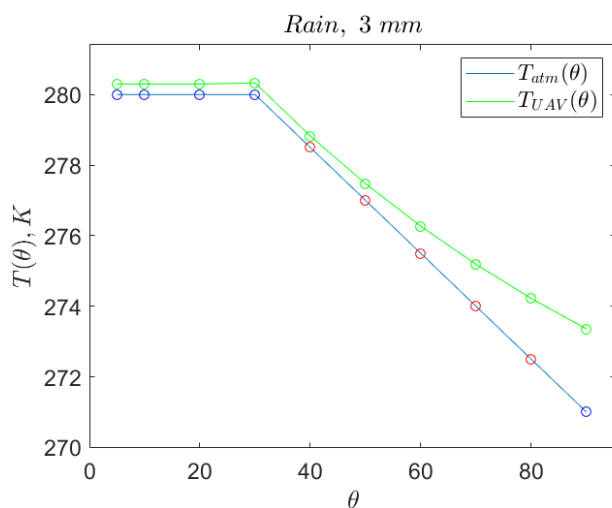
Таблиця 4.10. Значення $D_{\text{виявл.}}$ БПЛА з ймовірністю 0,9 при хмарності

| Діапазони частот радіометрів | Розмір БПЛА | | | | |
|------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | 0,5 м ² | 1 м ² | 5 м ² | 10 м ² | 20 м ² |
| 10-12 ГГц | 752 м (19↓ м) | 1063 (27↓ м) | 2376 м (60↓ м) | 3360 м (85↓ м) | 4751 м (121↓ м) |
| 20-22 ГГц | 592 м (19↓ м) | 837 (26↓ м) | 1872 м (58↓ м) | 2647 м (82↓ м) | 3743 м (116↓ м) |
| 35-36 ГГц | 971 м (40↓ м) | 1373 (56↓ м) | 3069 м (126↓ м) | 4340 м (178↓ м) | 6138 м (252↓ м) |
| 94-96 ГГц | 253 м (257↓ м) | 358 (363↓ м) | 801 м (810↓ м) | 1132 м (1146↓ м) | 1601 м (1620↓ м) |

Для радіометричного приймача 94-96 ГГц не наведено графіки $D(Y_0)$ в залежності від дальності. Це пов'язано з тим, що у цьому діапазоні частот майже відсутній приріст яскравісної температури БПЛА $\Delta T_{\text{БПЛА}}^\circ$ над температурою атмосфери T_{atm}° . Це можна побачити на графіках залежності $\Delta T_{\text{БПЛА}}^\circ$ і T_{atm}° від кутів візування, що показані на рис. 4.4 у різних масштабах.



а



б

Рисунок 4.4 – Залежності $\Delta T_{\text{БПЛА}}^\circ$ і T_{atm}° від кутів візування: а – діапазон температур починається від 0 К, б – діапазон температур починається від 270 К

З аналізу наведених залежностей на рис. 4.4 слідує, що виявити БПЛА у такому діапазоні частот під час дощу можливо тільки у випадку повного

перекриття ним ДС радіометра. Максимальні значення дальності виявлення для таких умов наведені в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Значення $D_{\text{виявл.}}$ БПЛА з ймовірністю 0,9 в дощ для 94-96 ГГц

| Площа БПЛА | | | | |
|--------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 0,5 м ² | 1 м ² | 5 м ² | 10 м ² | 20 м ² |
| 80 м | 90 м | 180 м | 250 м | 360 м |

Узагальнення про $D_{\text{виявл.}}$ БПЛА з ймовірністю 0,9 під час різних станів атмосфери для $L = 10^{-2}$ наведені в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Узагальнені значення $D_{\text{виявл.}}$ БПЛА з ймовірністю 0,9.

| Діапазони частот радіометрів | Стан атмосфери | Розмір БПЛА | | | | |
|------------------------------|----------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | 0,5 м ² | 1 м ² | 5 м ² | 10 м ² | 20 м ² |
| 10-12 ГГц | Без хмар | 771 м | 1090 м | 2436 м | 3445 м | 4872 м |
| | З хмарами | 752 м | 1063 | 2376 м | 3360 м | 4751 м |
| | Дощі | 656 м | 927 м | 2073 м | 2932 м | 4146 м |
| 20-22 ГГц | Без хмар | 611 м | 863 м | 1930 м | 2729 м | 3859 м |
| | З хмарами | 592 м | 837 | 1872 м | 2647 м | 3743 м |
| | Дощі | 500 м | 707 м | 1580 м | 2235 м | 3160 м |
| 35-36 ГГц | Без хмар | 1011 м | 1429 м | 3195 м | 4518 м | 6390 м |
| | З хмарами | 971 м | 1373 м | 3069 м | 4340 м | 6138 м |
| | Дощі | 410 м | 580 м | 1296 м | 1833 м | 2591 м |
| 94-96 ГГц | Без хмар | 510 м | 721 м | 1611 м | 2278 м | 3221 м |
| | З хмарами | 253 м | 358 м | 801 м | 1132 м | 1601 м |
| | Дощі | 80 м | 90 м | 180 м | 250 м | 360 м |

Для перевірки умов встановлення системи та впливу місцевих об'єктів був розрахований мінімальний кут спостереження за атмосферою при якому можливе виявлення БПЛА розміром 1 м^2 з ймовірністю 0,9 для різних погодних умов. Для всіх діапазонів частот, крім 94-96 ГГц $D_{\text{виявл.}}$ складала 800 м.

Таблиця 4.13. Мінімальний кут спостереження за БПЛА з площею 1 м^2

| Стан атмосфери | Діапазони частот радіометрів | | | |
|------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| | 10-12 ГГц | 20-22 ГГц | 35-36 ГГц | 94-96 ГГц |
| Ясна атмосфера | 28,3° | 39° | 9,2° | 28,9° |
| Хмарна атмосфера | 28,4° | 40,6° | 10,2° | 29,4° (відстань 400 м) |
| Дощ | 29,7° | 46,9° | 78° | 76,5° (відстань 100 м) |

Результати розрахунку мінімальної площі БПЛА, при яких можливе виявлення з ймовірністю 0,9 для різних станів атмосфери, наведені в табл. 4.14. В таблиці для діапазону 94-96 ГГц відсутні значення, оскільки щоб виявити БПЛА в цьому діапазоні необхідно, щоб він повністю перекрив ДС радіометру.

Таблиця 4.14. Мінімальні значення площ БПЛА

| Стан атмосфери | Діапазони частот радіометрів | | | |
|----------------|------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | 10-12 ГГц | 20-22 ГГц | 35-36 ГГц | 94-96 ГГц |
| Без хмарності | 1,87 м ² | 2,98 м ² | 1,09 м ² | 4,28 м ² |
| З хмарами | 1,97 м ² | 3,17 м ² | 1,18 м ² | 17,31 м ² |
| Дощ | 2,58 м ² | 4,44 м ² | 6,6 м ² | – |

Отримані результати розрахунку дальності надійного виявлення БПЛА мають той же порядок, що й дальність виявлення передових оптичних,

радіолокаційних та акустичних систем. При цьому закладені характеристики каналів радіометричних приймачів можуть бути покращені в разі використання елементної бази світових компаній RPG-Radiometer Physics GmbH (RPG) — члена групи компаній ROHDE & SCHWARZ [51], Pasternack Company [52], Millimeter Wave Products Inc. (Mi-Wave) [53]. З урахуванням проривних результатів розробки мікрохвильових компонентів була розрахована ймовірність правильного виявлення БПЛА та визначені граничні відстані правильного виявлення. Усі отримані результати наведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Відстань виявлення БПЛА для високоякісних мікрохвильових компонентів пасивного радара

| L | Стан атмосфери | | |
|-----------|----------------|--------|--------|
| | Ясно | Хмарно | Дощ |
| 10^{-2} | 8200 м | 8000 м | 6800 м |
| 10^{-3} | 7450 м | 7200 м | 6150 м |
| 10^{-4} | 6970 м | 6800 м | 5700 м |

З аналізу усіх отриманих результатів слідує, що для атмосфери без хмар та дощу найкращі показники виявлення має радіометр 35-36 ГГц. Поява атмосферних явищ не значним чином впливає на виявлення для радіометрів 10-12 ГГц та 20-22 ГГц. Радіометр діапазону 94-96 ГГц показав гірші результати, проте це пов'язано в вузькою ДС такого радіометра. Для обраної швидкості сканування час спостереження значно зменшується в порівнянні з іншими радіометрами, що призводить до зниження потенційної флуктуаційної чутливості. В той самий час цей приймач має найкращу просторову роздільну здатність, що покращує показники функціонування всієї системи при формуванні зображень області спостереження.

Висновки до розділу

З результатів аналізу існуючих досягнень у галузі розробки радіометричних систем в Україні та елементної бази компонентів НВЧ, що є на ринку, можна зробити висновок, що діапазони Ku та K мають найгірші характеристики просторової роздільної здатності, проте їх основною перевагою є всепогодність. В той самий час Ka- та W-діапазони високочутливі до радіотеплового випромінювання на тлі ясного неба, але при хмарній атмосфері та в дощ мають низькі показники дальності виявлення.

Враховуючи експериментальні результати, виконано розрахунок дальностей виявлення із ймовірністю 0,9 з використанням компонентів вітчизняних компаній. Результати показують, що залежно від стану атмосфери дистанція виявлення лежить у межах від 1 до 3 км. Ці результати збігаються з відомими дальностями виявлення оптичних, акустичних та радіолокаційних систем, але вибрані параметри приймачів не відповідають потенційним світовим досягненням і можуть бути покращені. З огляду на результати розробки компонентів НВЧ у компаніях GmbH (RPG), Pasternack Company, Millimeter Wave Products Inc. було отримано граничні дистанції виявлення БПЛА. Такий багаточастотний радіометричний комплекс може виявляти легкі БПЛА у діапазоні від 6 до 8 км.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна задача підвищення ймовірності виявлення БПЛА в будь-яких погодних та тактичних умовах проведення вимірювань за допомогою пасивної радіометричної системи. Наявні системи та методи виявлення ряд недоліків, зокрема:

- оптичні системи найкраще застосовуються вдень в ясну погоду, але при поганій погоді та вночі втрачають свої переваги. Частково цей недолік можна перекрити використанням інфрачервоних та телевізійних методів. Проте при цьому ставляться високі вимоги до комплексування результатів вимірювань різної природи.

- активні радіолокаційні системи виявлення хоч і мають найбільшу дальність виявлення, проте мають і сліпу зону, а також не ефективні при виявленні малорозмірних об'єктів. А нові композитні матеріали з яких виробляють БПЛА, можуть буди спеціально розроблені, щоб знижувати помітність при активному зондуванні.

Тому пропонується доповнити існуючі системи виявлення пасивною радіометричною системою, яка використовує радіотеплові контрасти об'єктів на тлі атмосфери для всепогодного виявлення БПЛА, має високий рівень скритності, оскільки нічого не випромінює.

При виконанні дисертаційного завдання отримані наступні найбільш важливі наукові результати:

- вперше синтезовано та досліджено метод оптимальної обробки сигналів в багаточастотних радіометричних комплексах виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери, що на відміну від існуючих методів відповідає основним вимогам до радіотехнічних вимірювань – високій просторовій роздільній здатності та високій флуктуаційній чутливості (яка визначає дальність роботи радару) за умов всепогодності;

– вперше у вигляді табличних даних узагальнено результати аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання дальностей виявлення БПЛА в багатоканальних радіометричних комплексах, що на відміну від існуючих охоплюють широке коло можливих погодних та тактичних умов проведення вимірювання, а також враховують багаторічні результати вимірювань параметрів приймачів та атмосфери у діапазонах частот 10-12 ГГц, 20-22 ГГц, 35-36 ГГц, 94-96 ГГц;

– вперше в результаті експериментальних вимірювань у широкому діапазоні хвиль отримана база радіометричних зображень і контрастів різних типів та класів БПЛА, які спостерігаються при різних тактичних та погодних умовах. До цього більшість вимірювань проводились на тестових об'єктах простої форми;

– отримали подальшого розвитку структури радіометричних комплексів формування радіометричних зображень, що на відміну від існуючих одразу у чотирьох діапазонах частот враховують в основних етапах обробки операції модуляції корисних сигналів, періодичне калібрування приймачів та термостабілізацію вхідних трактів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

– узагальнення інформації про дальності виявлення БПЛА на тлі неба в багатоканальних радіометричних системах надає важливу інформацію для потенційного удосконалення наявних систем, а також впровадження нових підходів до розробок комплексів;

– отримані результати спостережень доцільно використовувати при дослідженні локальних особливостей моделей атмосфери в Україні, що безумовно стане необхідним перед впровадженням 5G систем телекомунікацій;

– отримані на основі експериментальних даних модельні оцінки вірогідності виявлення різних об'єктів на тлі неба можуть бути використані при виборі апаратних параметрів радіометричних пристроїв і режимів їх роботи, наприклад, в завданнях охорони об'єктів критичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Артюшин, Л. М. Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів на основі аналізу фрактальної розмірності / Л. М. Артюшин, М. В. Бугайов // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2018. – № 2(32). – С. 23-28.
2. Ways for copter drone acoustic detection / Jakub Vilímek; Ladislav Buřita // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT), 2017. – Pp. 349 – 353.
3. Drone Detection Based on an Audio-Assisted Camera Array / Hao Liu; Zhiqiang Wei; Yitong Chen; Jie Pan; Le Lin; Yunfang Ren // 2017 IEEE Third International Conference on Multimedia Big Data (BigMM), 2017. – Pp. 402 – 406.
4. Euclidean distance based algorithm for UAV acoustic detection/ Beomhui Jang; Yoojeong Seo ; Baeksan On ; Sungbin Im // Proc. of 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), 2018. – Pp. 1 – 2.
5. Y. Zhang, L. Shen, X. Wang and H. -M. Hu, "Drone Video Object Detection using Convolutional Neural Networks with Time Domain Motion Features," 2020 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR), Shenzhen, China, 2020, pp. 153-156, doi: 10.1109/MIPR49039.2020.00039.
6. V. Mehta, F. Dadboud, M. Bolic and I. Mantegh, "A Deep Learning Approach for Drone Detection and Classification Using Radar and Camera Sensor Fusion," 2023 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Ottawa, ON, Canada, 2023, pp. 01-06, doi: 10.1109/SAS58821.2023.10254123.
7. Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera / Petar Andraši, Tomislav Radišić, Mario Muštra, Jurica Ivošević // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 28. – P. 183-190.
8. Вишневський, С. Д. Потенційні можливості РЛС РТВ з виявлення оперативно-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів / С. Д. Вишневський, Л. В. Бейліс, В. Й. Климченко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2 (27). – С. 92–98.

9. An Improved Unauthorized Unmanned Aerial Vehicle Detection Algorithm Using Radiofrequency-Based Statistical Fingerprint Analysis / Shengying Yang, Huibin Qin, Xiaolin Liang, Thomas Aaron Gulliver // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19(274). – P. 1-22.
10. Micro-UAV detection using DAB-based passive radar / ChristofSchüpbach; Christian Patry; Francois Maasdorp; UrsBöniger; Peter Wellig // 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), 2017. – Pp. 1037 – 1040.
11. Experimental Research of Multistatic Passive Radar With a Single Antenna for Drone Detection / Gao Fang; Jianxin Yi ; Xianrong Wan ; Yuqi Liu ; Hengyu Ke // *IEEE Access*, 2018 , Vol. 6. – Pp. 33542 - 33551.
12. On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system / Benjamin Knoedler; RedaZemmari; Wolfgang Koch / 2016 17th International Radar Symposium (IRS), 2016. – Pp. 1 – 4.
13. Єрилкін А. Г., Гур'єв Д. О., Карлов Д. В., Коробецький О. В., Шевченко Ю. А. Огляд та аналіз світового досвіду боротьби з ударною безпілотною авіацією. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2022. № 4 (49). С. 15-22. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.49.02>.
14. A Survey of Computer Vision Methods for 2D Object Detection from Unmanned Aerial Vehicles / Dario Cazzato, Claudio Cimorelli, Jose Luis Sanchez-Lopez, Holger Voos, Marco Leo // *Journal of Imaging*. – 2020. – Vol. 6(78). – P. 1-380.
15. Чи складно зробити дрон-перехоплювач проти рашистських "Орлан-10" та ZALA [Електронний ресурс] / *Defence-Express*. Режим доступу: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/chi_skladno_zrobiti_dron_perehopljuvach_proti_rashistskih_orlan_10_ta_zala-14936.html – 05.04.2024.
16. В Україні представили новий безпілотник Leleka LR [Електронний ресурс] / *Мілітарний*. Режим доступу: <https://mil.in.ua/uk/news/v-ukrayini-predstavlyu-novuj-bezpilotnyk-leleka-lr/> – 22.01.2024.
17. А1-СМ Фурія – Технічні характеристики [Електронний ресурс] / *Атлон Авіа*. Режим доступу: <https://athlonavia.com/uk-furia/> – 23.05.2021

18. Павлюк, В. В. Алгоритм виявлення радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти каналів дистанційного керування безпілотними літальними апаратами / В. В. Павлюк, М. В. Бугайов // Збірник наукових праць ЖВІ НАУ. – Житомир: ЖВІ НАУ, Випуск 14, 2017. – С. 5–15.

19. Волков А.Ф., Лезік О.В., Корсунов С.І., Левагін Г.А., Яновський О.В., Івахненко К.В. Аналіз застосування БПЛА у вірмено- азербайджанському воєнному конфлікті та можливі шляхи боротьби з ними. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 4(64). С. 7-17. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.01>.

20. Зенитный ракетно-пушечный комплекс Панцирь-С1 [Електронний ресурс] / Ракетная техника. Режим доступу: <https://missilery.info/missile/panz/panz-soc-s> – 12.03.2022

21. Christian Wolff. 48Ya6-K1 “Podlet K1” [Електронний ресурс] / Radartutorial. Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/02.surv/karte040.en.html> – 12.03.2022.

22. Військовим Білорусі передали комплекси РЕБ [Електронний ресурс] / Мілітарний. Режим доступу: <https://mil.in.ua/uk/news/vijskovym-bilorusi-peredaly-kompleksy-reb/> – 29.07.2023.

23. Модернизированная «Кольчуга» СКБ «Таргет» может быть интегрирована в существующую систему ПВО страны [Електронний ресурс] / Оборонно-промисловий кур'єр. Режим доступу: <http://surl.li/tjwph> – 12.03.2022.

24. Система обнаружения БПЛА [Електронний ресурс] / GloryAIR. Режим доступу: <https://www.glory-air.ru/uav-detection4Detection-system> –

25. Система Бастион [Електронний ресурс] / Карпенко. Режим доступу: <http://bastion-karpenko.ru/bastion-avtomatika-antibla/> – 13.03.2022.

26. Кривоніс О. П. Системи виявлення дронів і протидронні системи [Електронний ресурс] / Bezpeka Shop. Режим доступу: <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/obzor/sistemy-obnaruzheniya-dronov-i-protivodronnye-sistemy/> – 22.04.2023.

27. Радиолокационный комплекс обнаружения маловысотных целей «Роса-РБ» [Электронный ресурс] / BelTechExport. Режим доступа: <http://surl.li/tjxie> – 22.04.2023.
28. Радари для виявлення БПЛА AARTOS [Электронный ресурс] / AirUnit. Режим доступа: <https://airunit.com.ua/systemy-i-versii-old/> – 12.03.2022.
29. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников [Электронный ресурс] / RoboTrends. Режим доступа: <https://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov> – 21.03.2021.
30. AUDES FIELD-MAST SYSTEMS [Электронный ресурс] / AUDES. Режим доступа: <https://www.auds.com/configurations/auds-field-mast-systems/> – 25.08.2023.
31. Н. Аллилуева Системы антидрон [Электронный ресурс] / Технологии Защиты. Режим доступа: <http://surl.li/tjxqj> – 20.02.2022.
32. Optical Drone Detection [Электронный ресурс] / Olvitech Corporation. Режим доступа: <https://olvitech.com/ru/home/security-solutions/optical-drone-detection/> 25.01.2023.
33. Optical drone detection system [Электронный ресурс] / AeroExpo. Режим доступа: <https://www.aeroexpo.online/prod/skylock-avnon-group/product-187317-63156.html> – 15.10.2021
34. Kelsey D. Atherton Skynet Anti-Drone Rifle Can Jam Signals In The Air [Электронный ресурс] / Popular Science. Режим доступа: <https://www.popsci.com/skynet-is-an-anti-drone-rifle-with-weird-name/> – 12.12.2023.
35. SkyWall 100 – базука проти дронів від компанії Openworks Engineering [Электронный ресурс] / УкрІнформ. Режим доступа: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/1979184-skywall-100-bazuka-proti-droniv-vid-kompanii-openworks-engineering.html> – 25.03.2021.
36. DroneBullet побудований для пошуку та знищення інших дронів [Электронный ресурс] / Wfoojjaec. Режим доступа: <https://wfoojjaec.eu.org/uk/projects/news/2019-05-06-the-dronebullet-is-built-to-seek-and-destroy-other-drones.html> – 12.05.2023.

37. Проект системы вооружения «направленной энергии» Raytheon PHASER для армии США: краткие подробности [Электронный ресурс] / «НПК «ИНТЕГРАЛ». Режим доступа: <http://surl.li/tjynq> –17.02.2023.
38. R. Dicke The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies // The review of Scientific Instruments – 1946. – V.17. – N 7. – pp.268-275.
39. Николаев, А. Г. Радиотеплолокация [Текст] / А. Г. Николаев, С. В. Перцов. – М. : Воениздат, 1970. – 132 с.
40. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн.1 [Текст] / Б. Р. Левин. – М. : Советское радио, 1969. – 752 с
41. Методы оптимальной обработки сигналов в пассивных радиометрических устройствах и системах [Текст] : учеб. пособие: в 3 ч. / В. К. Волосюк, В. В. Павликов, С. С. Жила. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – Ч. 2. – 210 с.
42. Method of Detection of Thermal Microwave Radiation Increments. [Text] / V. K. Volosyuk, V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, S. S. Zhyla, O. V. Odokienko and A. D. Sobkolov // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4-7 September 2018. – Odessa, 2018. – P. 269-274.
43. Optimal Radiometric Detection of BandLimited Noise Signal [Text] / V. K. Volosyuk, V. V. Pavlikov, S. S. Zhyla, and O. V. Odokienko // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 18-20 April 2017. – Kyiv, 2017. – P. 517-522.
44. An Optimal Algorithm for the Formation of Unbiased Estimates of the Effective Noise Temperature of a Stochastic Radio Thermal Signal [Text] / V. K. Volosyuk, V. F. Kravchenko, A. V. Odokienko, V. V. Pavlikov, V. I. Pustovoit // Doklady Physics. – 2018. – Vol. 63(6). – P. 227–230.
45. Optimum Algorithm for Estimating Radio Brightness in Spatially Distributed Radiometer Systems [Text] / V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, V. V. Pavlikov, A. D. Abramov, V. G. Yakovlev // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – Vol. 77(18). – P. 1649- 1658.

46. Шум вида $1/f$ в радиометре полной мощности / Цыбулев П. Г., Дугин М. В., Берлин А. Б. и др. *Астрофизический бюллетень*. 2014. 69(2). С. 256-262.

47. В.К. Волосюк, С.С. Жила, А.Д. Собколов, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, Д.С. Сальников, А.А. Мерзликин, А.И. Цопа *Аппаратурно-методическое обеспечение научно-прикладной радиометрии атмосферы // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2019. – Выпуск № 196. – С. 5 - 21.*

48. Nikolay Ruzhentsev, Vladimir Pavlikov, Valerii Volosyuk , Eduard Tserne, Anatoliy Popov et al "Radio-Heat Contrasts of UAVs and Their Weather Variability at 12 GHz, 20 GHz, 34 GHz and 94 GHz Frequencies " \\ *ESTI Transaction on Electrical Engineering, Electronics and Communication*, v.20, N2, june 2022, p. 163-173

49. Valerii Volosyuk, Simeon Zhyla, Vladimir Pavlikov, Nikolay Ruzhentsev, Eduard Tserne, Anatoliy Popov, Oleksandr Shmatko, Kostiantyn Dergachov, Olena Havrylenko et al. “Optimal Method for Polarization Selection of Stationary Objects Against the Background of the Earth’s Surface” \\ *International Journal of Electronics and Telecommunications (IJET) quarterly* vol. 68 no 1/2022, P. 83-89

50. Simeon Zhyla, Valerii Volosyuk, Vladimir Pavlikov, Nikolay Ruzhentsev, Eduard Tserne et al. Statistical synthesis of aerospace radars structure with optimal spatio-temporal signal processing, extended observation area and high spatial resolution. \\ February 2022 *Radioelectronic and Computer Systems* no. 1(101) p. 178-194

51. Oleksandr Solomentsev, Maksym Zaliskyi, Yuliya Averyanova, Ivan Ostroumov, Nataliia Kuzmenko, et al. Method of Optimal Threshold Calculation in Case of Radio Equipment Maintenance \\ in Springer book: *Data science and security, Proc. of the IDSCS'22 (3rd International Conference on Data Science, Computation and Security)* edited by: Samiksha Shukla, Xiao-Zhi Gao, Joseph Varghese Kureethara, Durgesh Mishra: p. 69-79

52. Nikolay Ruzhentsev, Simeon Zhyla, Vladimir Pavlikov, Gleb Cherepnin, Anatoliy Popov and Eduard Tserne Block diagram of a multifrequency radiometric complex for UAV detection in different meteorological conditions \\ *Information and telecommunication sciences*, volume 12, number 2, july–december 2021 c 50-57

53. Nikolay Ruzhentsev; Simeon Zhyla; Vladimir Pavlikov; Gleb Cherepnin; Tserne Eduard; Volodymyr Kosharskyi Theoretical Bases of Multi frequency Radiometric Systems Development for UAV Detection Against The Background of Atmospheric Radiation \ \ Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, Lviv-Slavske, Ukraine 2022, p. 20–24

54. International Telecommunications Union, Radiocommunications Sector. Recommendation 618-9: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Geneva. 2007. pp. 23.

55. ITU-R: Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling, Recommendation P.837-4. ITU-R Recommendations, P Series, International Telecommunications Union, Geneva, 2003.

56. Olexiy Odokienko, Anatolii Merzlikin, V.Pavlikov, Nikolay Ruzhentsev, Anton Sobkolov, Oleksandr Tsopa, Dmitry Salnikov, Simeon Zhyla Cumulative Distribution of Rain Rate and Rain Attenuation in Ukraine \ \ 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT) Lviv, Ukraine from 2 to 6 July, 2019 p. 62-66

57. Merzlikin A.A., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V., Sobkolov A.D., Tsopa A.I., Zhyla S.S. Peculiarities of Microwaves Attenuation Statistics for Ukrainian Region \ \ 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, p.761-764

58. Liebe H. J. MPM — an atmospheric millimeter waves propagation model. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1989.

59. Recommendation ITU-R P.840-3 Attenuation due to clouds and fog, Geneva: International Telecommunications Union.

60. Climate of Ukraine / (edited by V. Lipinsky)–Kiev, from Raevsky, 2003, 343p. (in Russian).

61. Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V., Sobkolov A.A., Tsopa A.I., Zhyla S.S., Merzlikin A.A., The cumulative atmosphere attenuation for the «worst months» in

Ukraine The 2019 IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (IEEE AICT), Lviv, 2 - 6 July, Ukraine, 5pp.

62. Zhyla, S.S., Merzlikin, A.A., Odokienko, A.V., Pavlikov, V.V., Ruzhentsev, N.V., Sobkolov, A.D. and Tsopa A.I., (2019) Cumulative functions of vertical atmospheric attenuation of millimeter radio waves over Kharkov, Radiotekhnika, 4(199), pp. 83-90. (in Russian).

63. New Approach of UAV Movement Detection and Characterization Using Advanced Signal Processing Methods Based on UWB Sensing [Text] / A. Digulescu, C. Despina-Stoian, D. Stănescu, F. Popescu, F. Enache, I. Cornel, E. Rădoi, I. Rîncu, A. Serbănescu // Sensors. – 2020. – Vol. 20(5904). – P. 1–18.

64. Poullin, D. UAV Detection and Localization Using Passive DVB-T Radar MFN and SFN [Text] / D. Poullin // The sensors and electronic technology panel. – 2016. – P. 18.1-18.10.

65. LTE-based passive radar for drone detection and its experimental results [Text] / D. Yangpeng, Y. Jianxin, W. Xianrong, R. Yunhua, W. Benjing // The Journal of Engineering. – 2019. – Vol. 10. – P. 1-4. DOI: 10.1049/joe.2019.0583.

66. GNSS Based Passive Radar for UAV Monitoring [Text] / C. V. Ilioudis et al. // 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), 22-26 April 2019. – Boston, 2019. – P. 1-6.

ДОДАТОК А

Залежності для БПЛА зі склопластику. Ясно, ВП

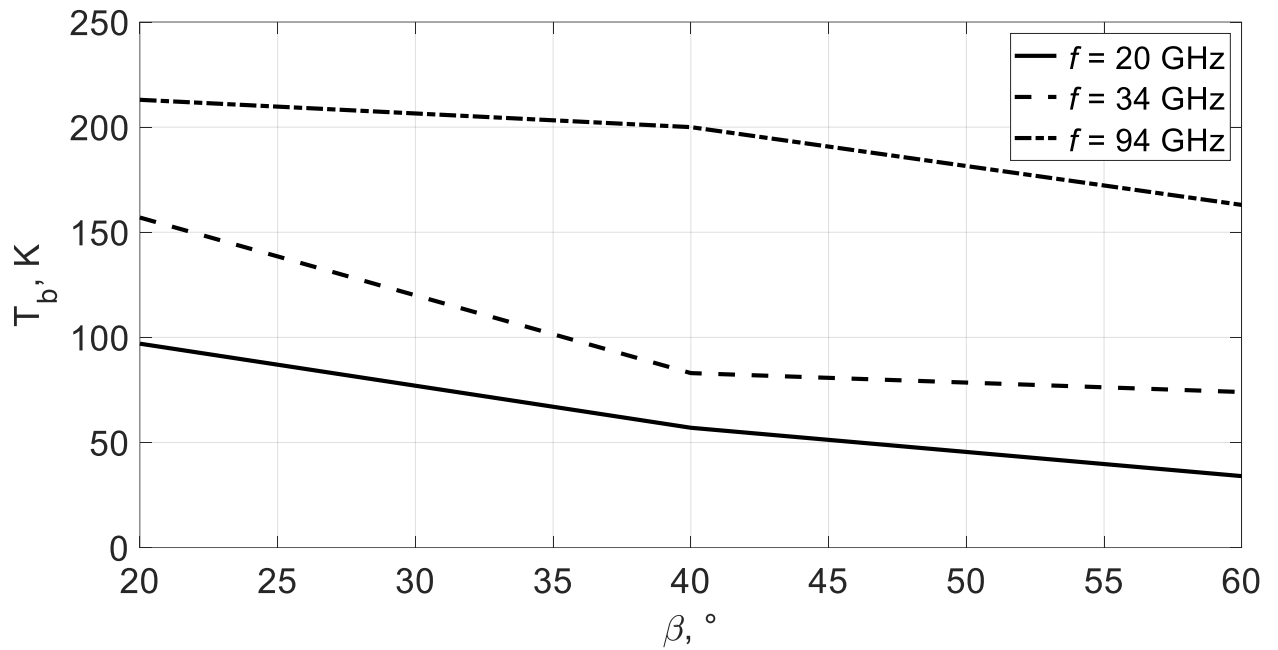


Рисунок А.1 — кутова залежність яскравісної температури склопластика при вертикальній поляризації при ясній погоді

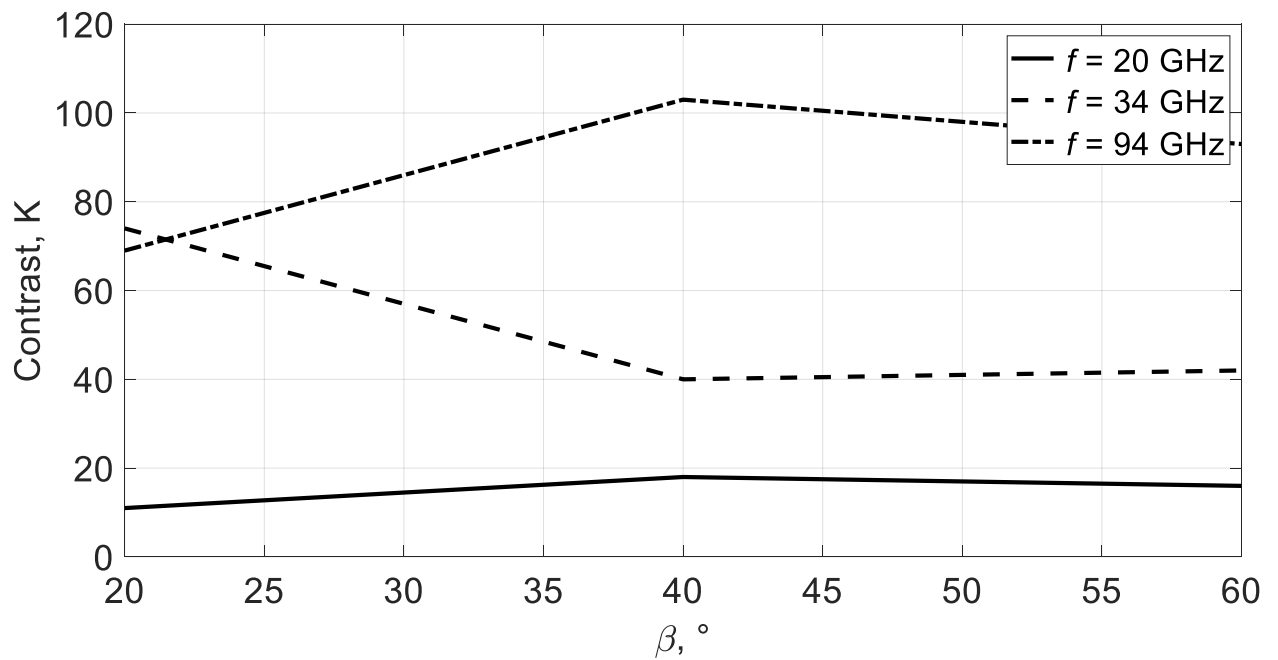


Рисунок А.2 — кутова залежність контрасту склопластика при вертикальній поляризації при ясній погоді

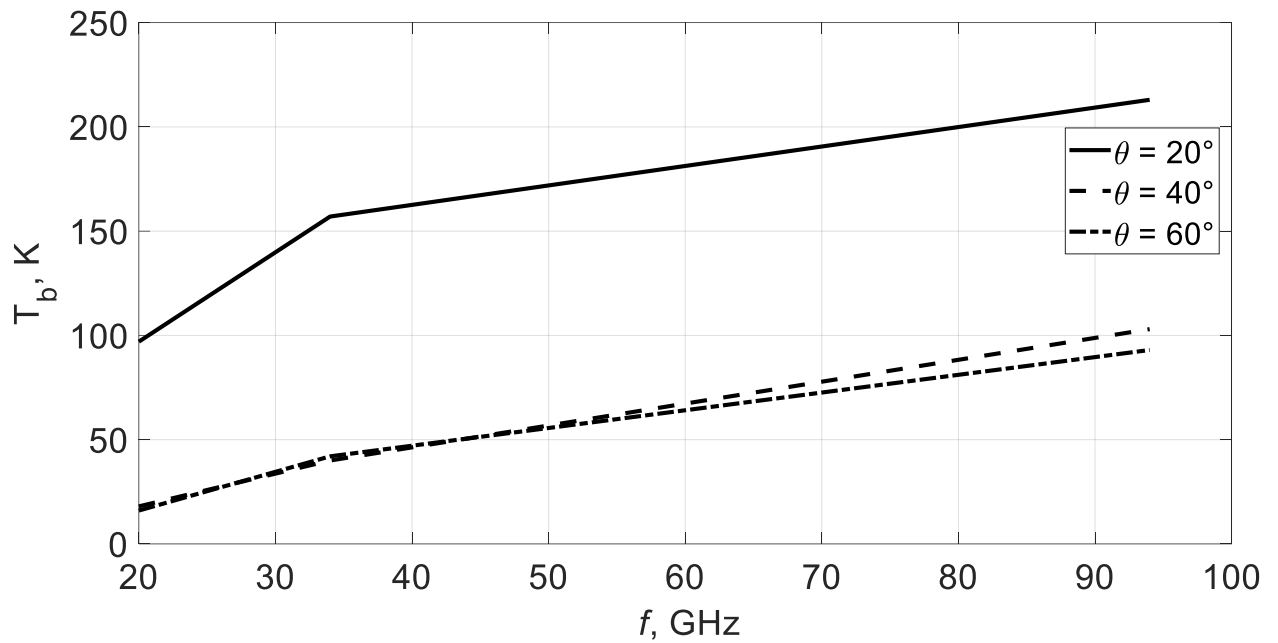


Рисунок А.3 — частотна залежність яскравісної температури склопластика при вертикальній поляризації при ясній погоді

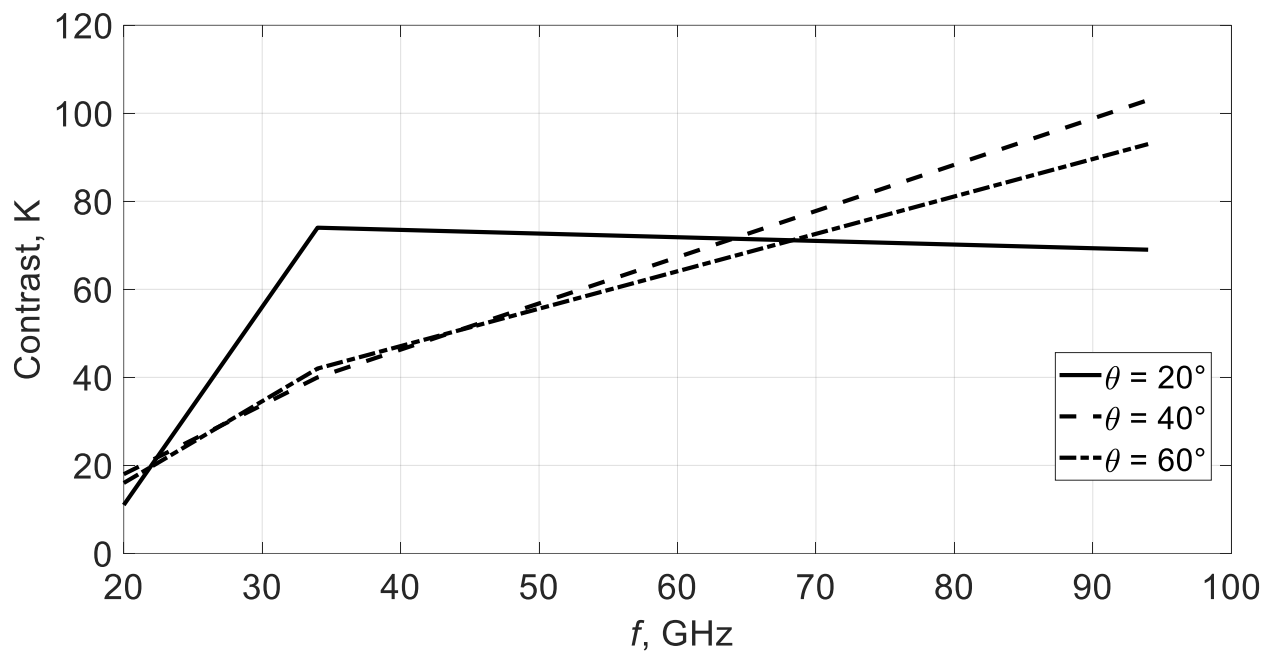


Рисунок А.4 — частотна залежність контрасту склопластика при вертикальній поляризації при ясній погоді

Залежності для БПЛА зі склопластику. Хмарність, ВП

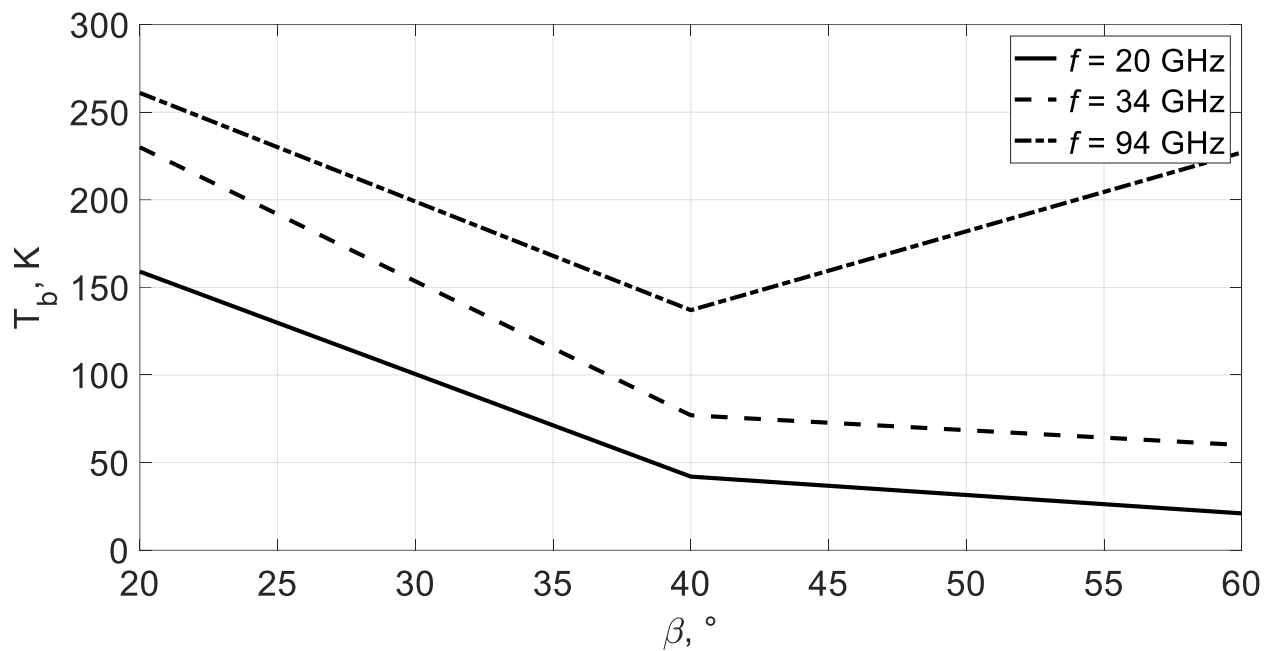


Рисунок А.5 — кутова залежність яскравісної температури склопластика при вертикальній поляризації при хмарній погоді

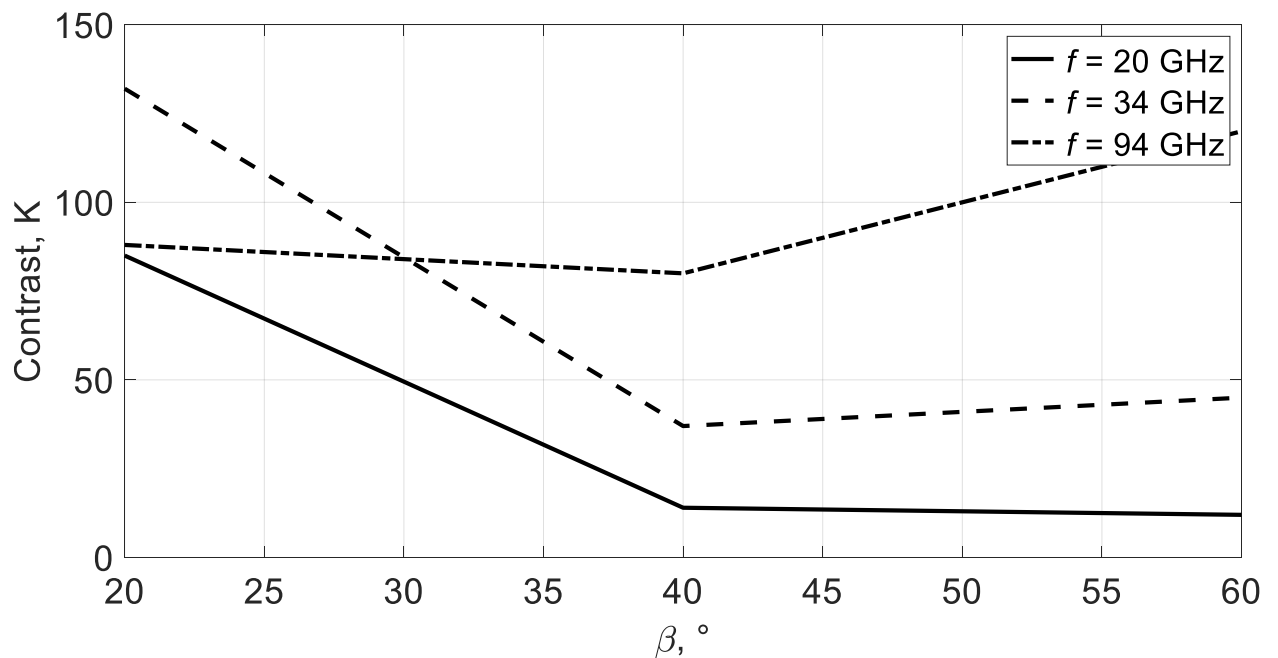


Рисунок А.6 — кутова залежність контрасту склопластика при вертикальній поляризації при хмарній погоді

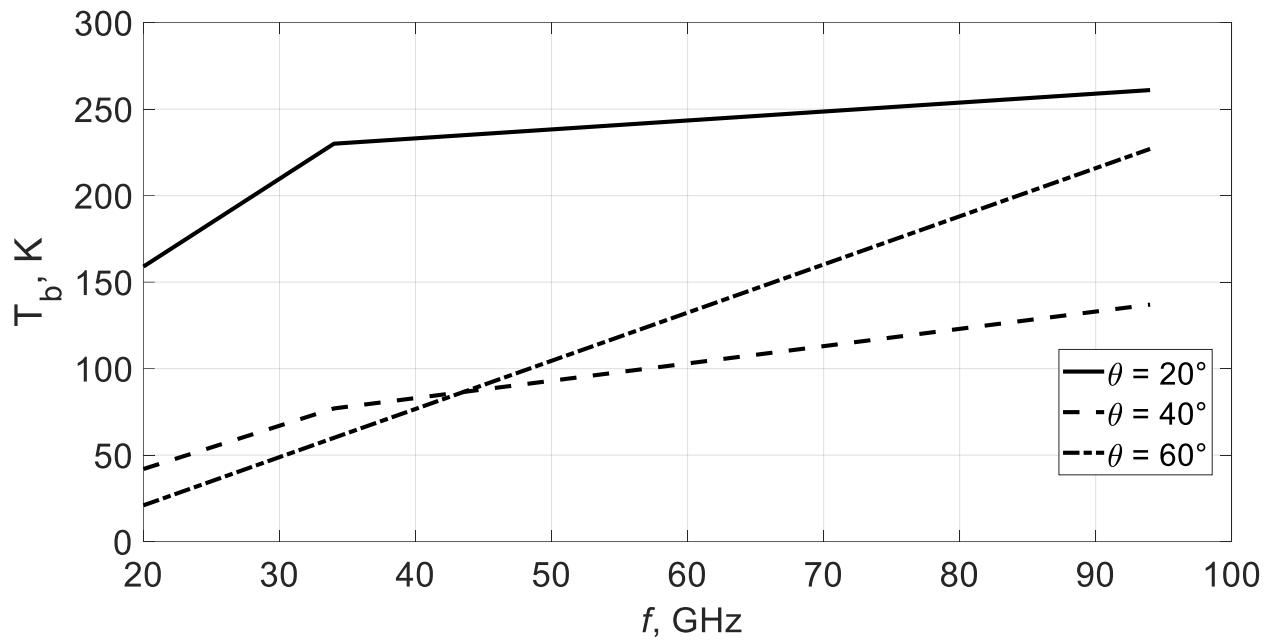


Рисунок А.7 — частотна залежність яскравісної температури склопластика при вертикальній поляризації при хмарній погоді

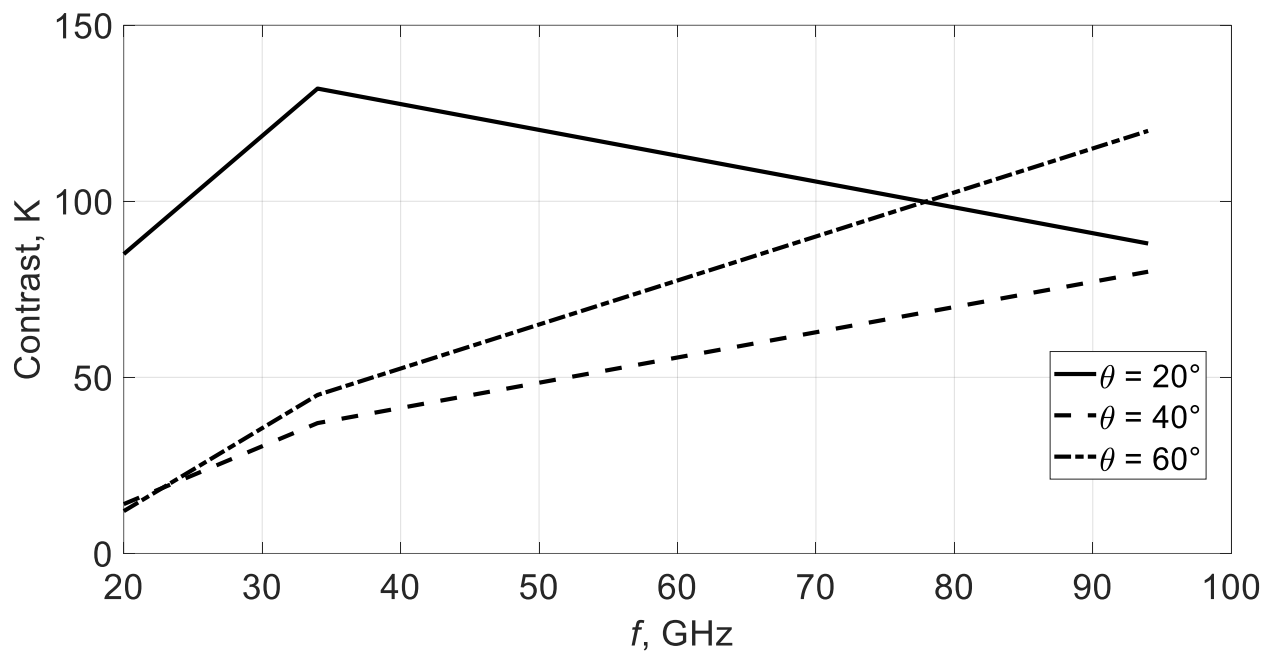


Рисунок А.8 — частотна залежність контрасту склопластика при вертикальній поляризації при хмарній погоді

Залежності для БПЛА зі склопластику. Хмарно, ГП.

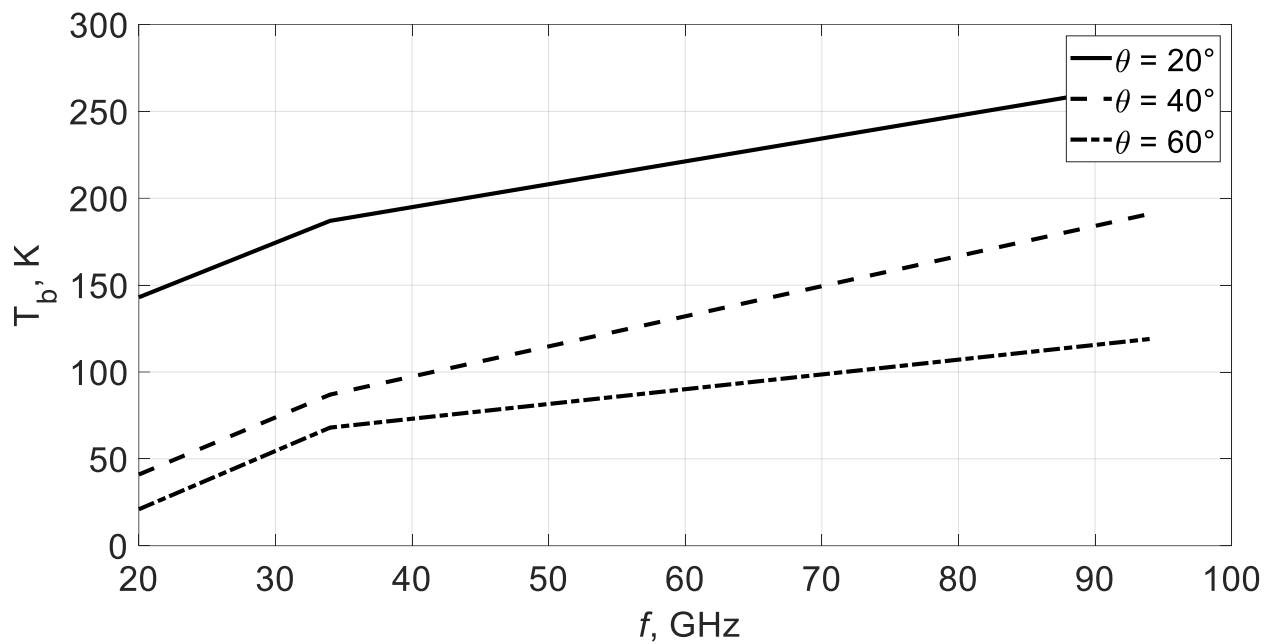


Рисунок А.9 — частотна залежність яскравісної температури склопластика при горизонтальній поляризації при хмарній погоді

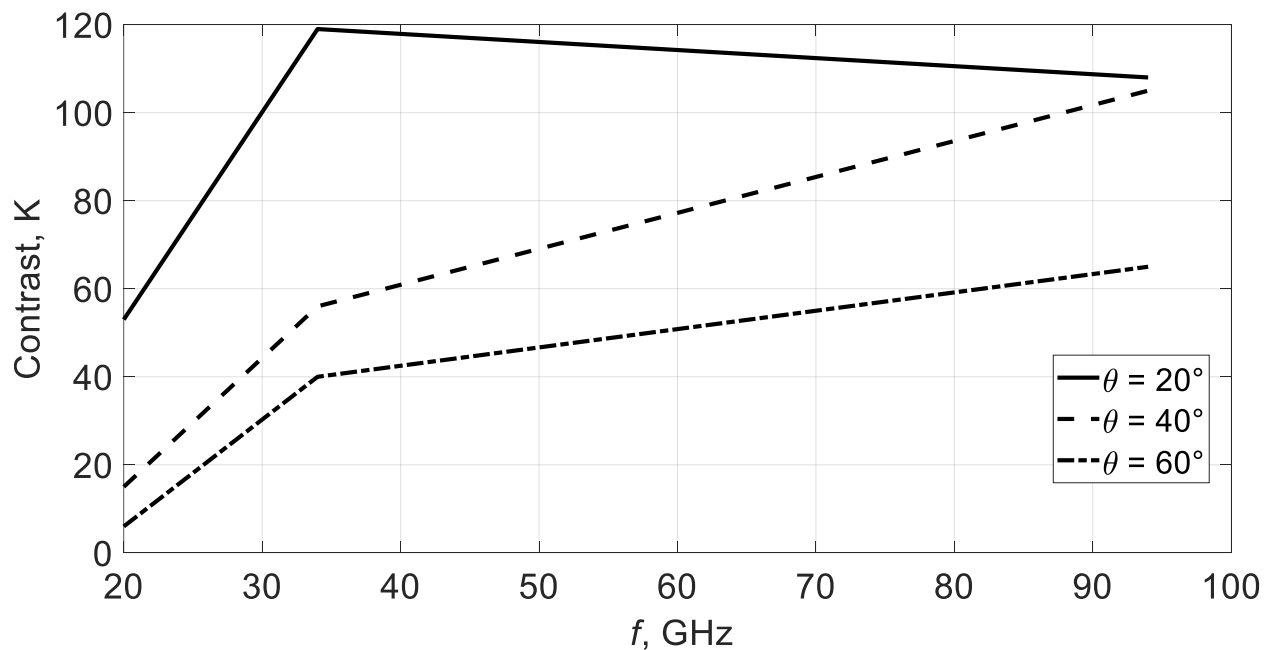


Рисунок А.10 — частотна залежність контрасту склопластика при горизонтальній поляризації при хмарній погоді

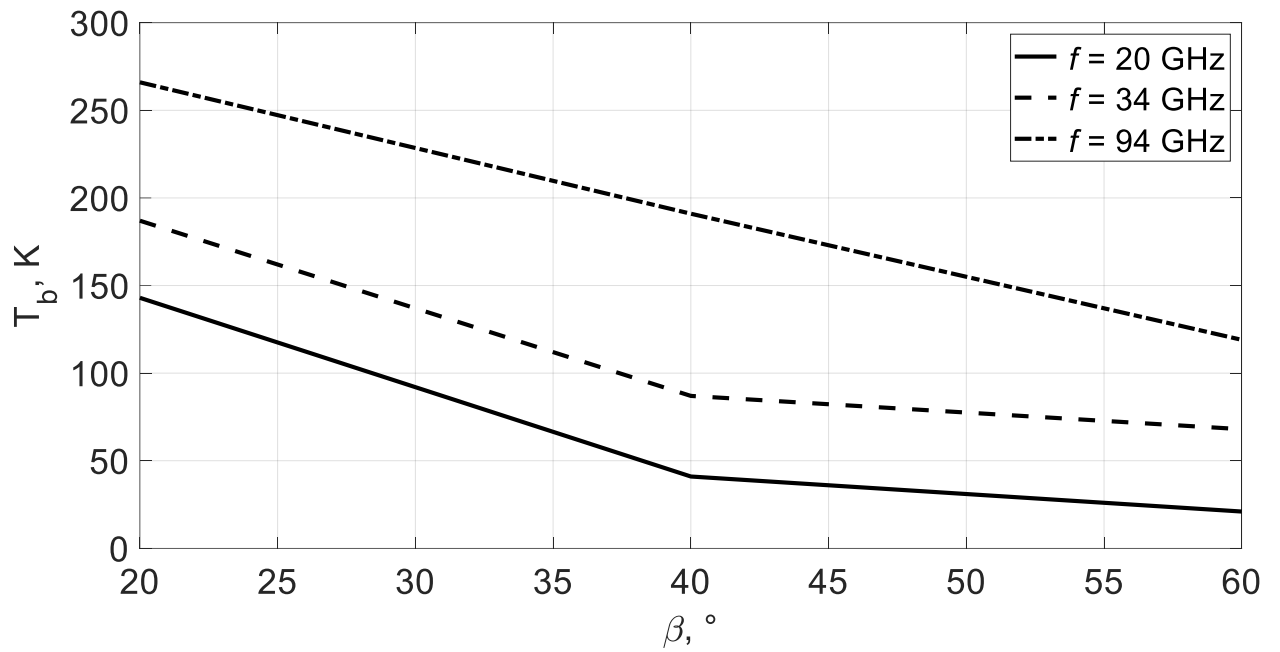


Рисунок А.11 — кутова залежність яскравісної температури склопластика при горизонтальній поляризації при хмарній погоді

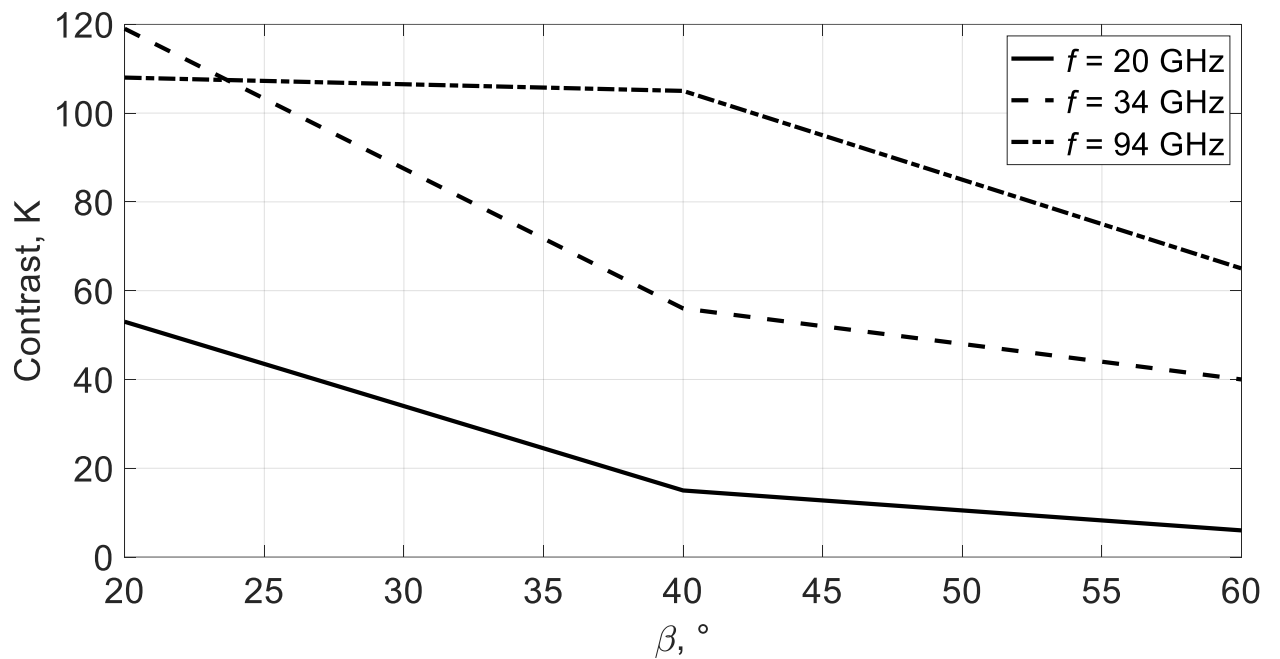


Рисунок А.12 — кутова залежність контрасту склопластика при горизонтальній поляризації при хмарній погоді

Залежності для БПЛА «Укрнафтогаз». Ясно, ВП

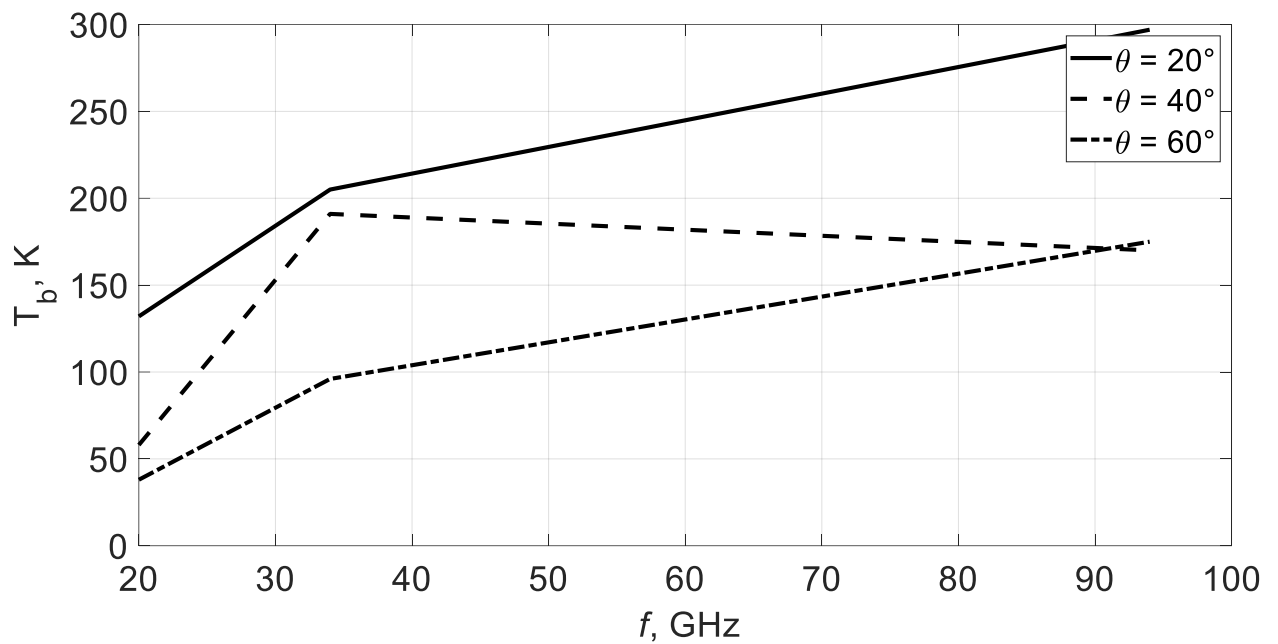


Рисунок А.13 — частотна залежність яскравісної температури БПЛА Укрнафтогаз при вертикальній поляризації при ясній погоді

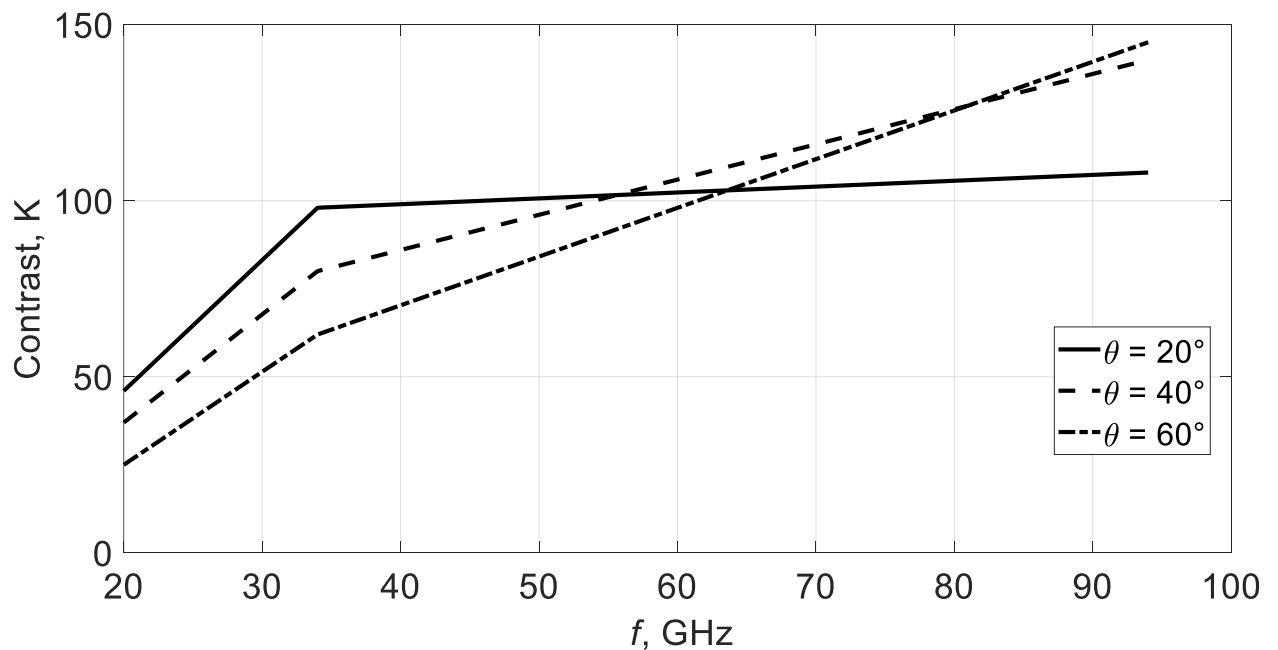


Рисунок А.14 — частотна залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при вертикальній поляризації при ясній погоді

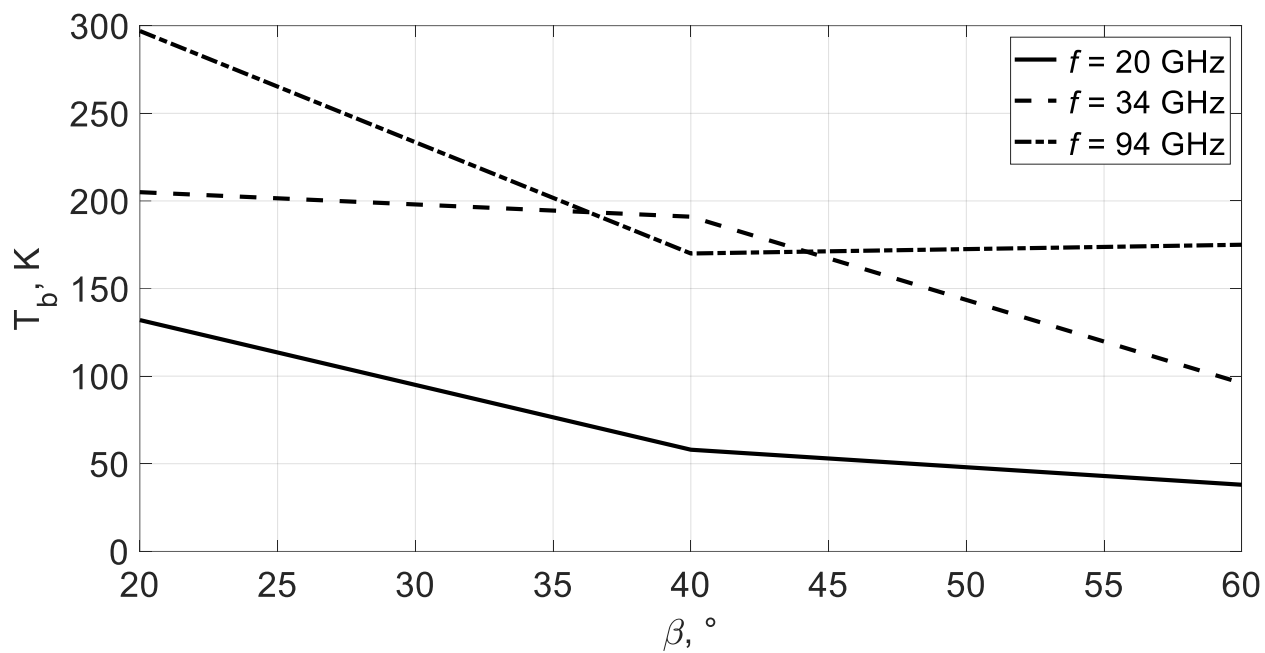


Рисунок А.15 — кутова залежність яскравісної температури БПЛА
Укрнафтогаз при вертикальній поляризації при ясній погоді

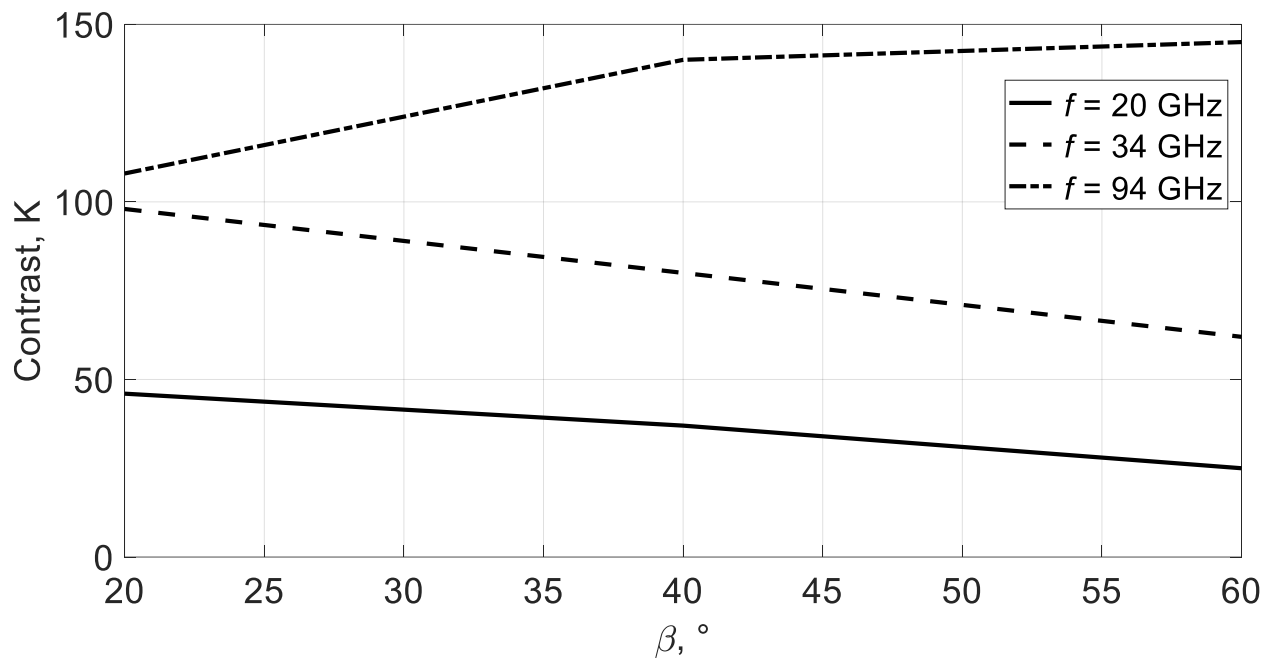


Рисунок А.16 — кутова залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при
вертикальній поляризації при ясній погоді

Залежності для БПЛА «Укрнафтогаз». Хмарно, ВП

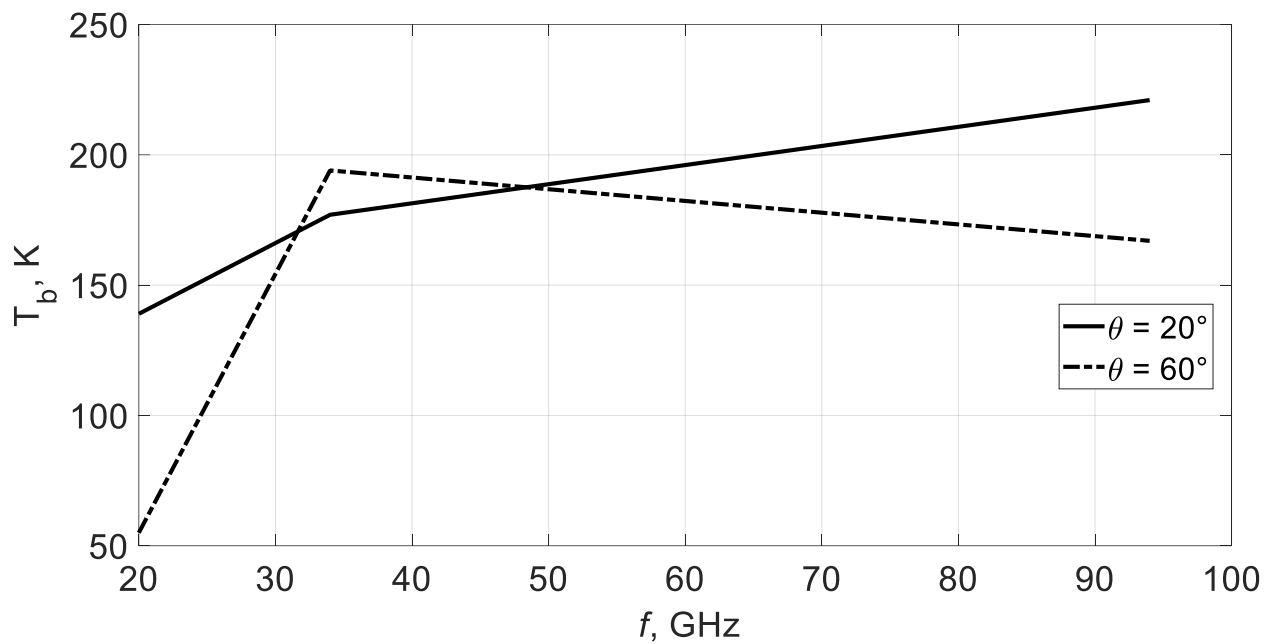


Рисунок А.17 — частотна залежність яскравісної температури БПЛА Укрнафтогаз при вертикальній поляризації при хмарній погоді

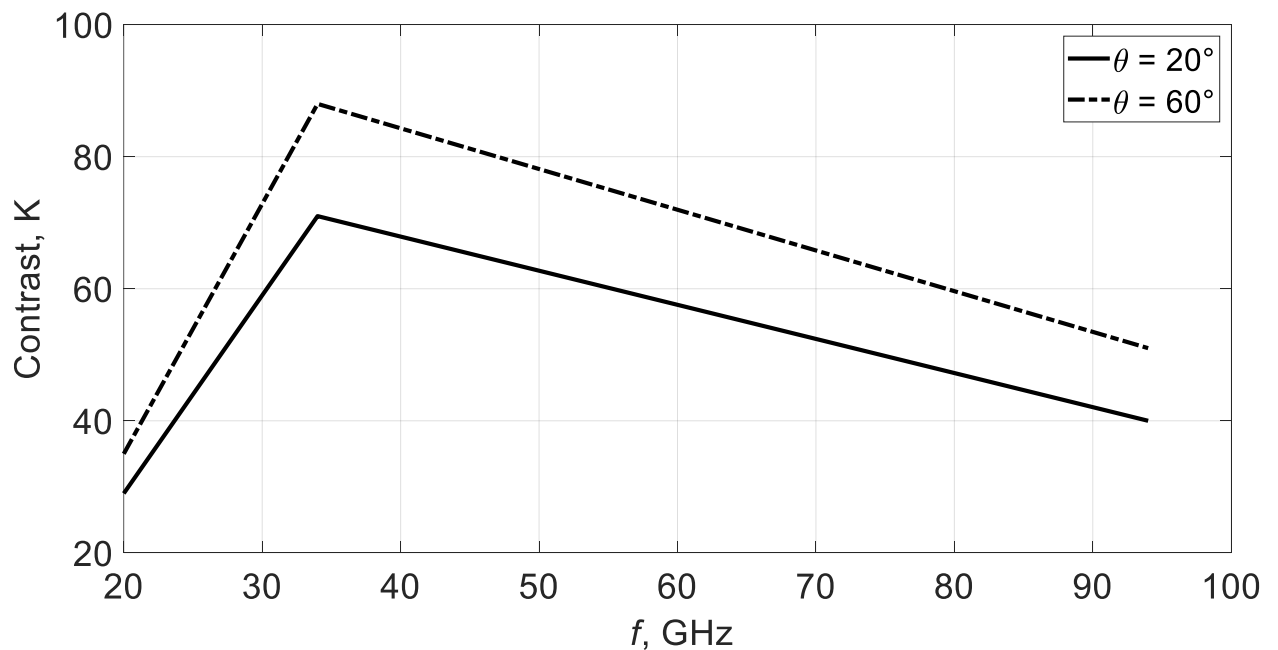


Рисунок А.18 — частотна залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при вертикальній поляризації при хмарній погоді

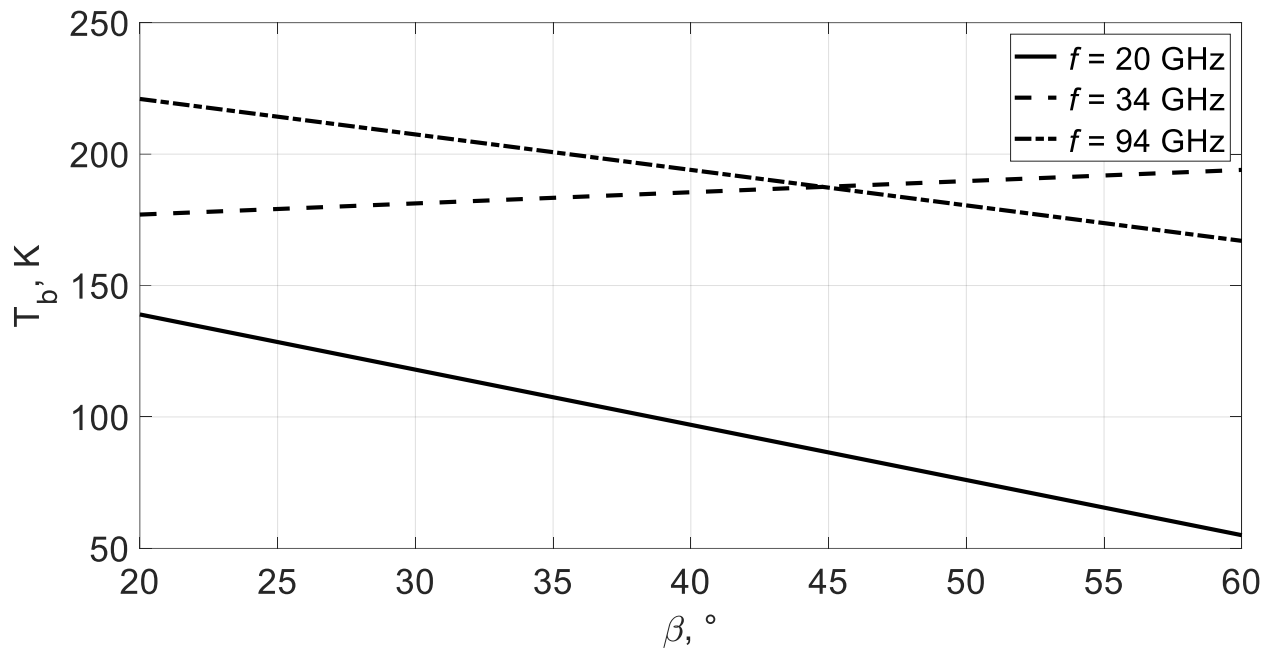


Рисунок А.19 — кутова залежність яскравісної температури БПЛА
Укрнафтогаз при вертикальній поляризації при хмарній погоді

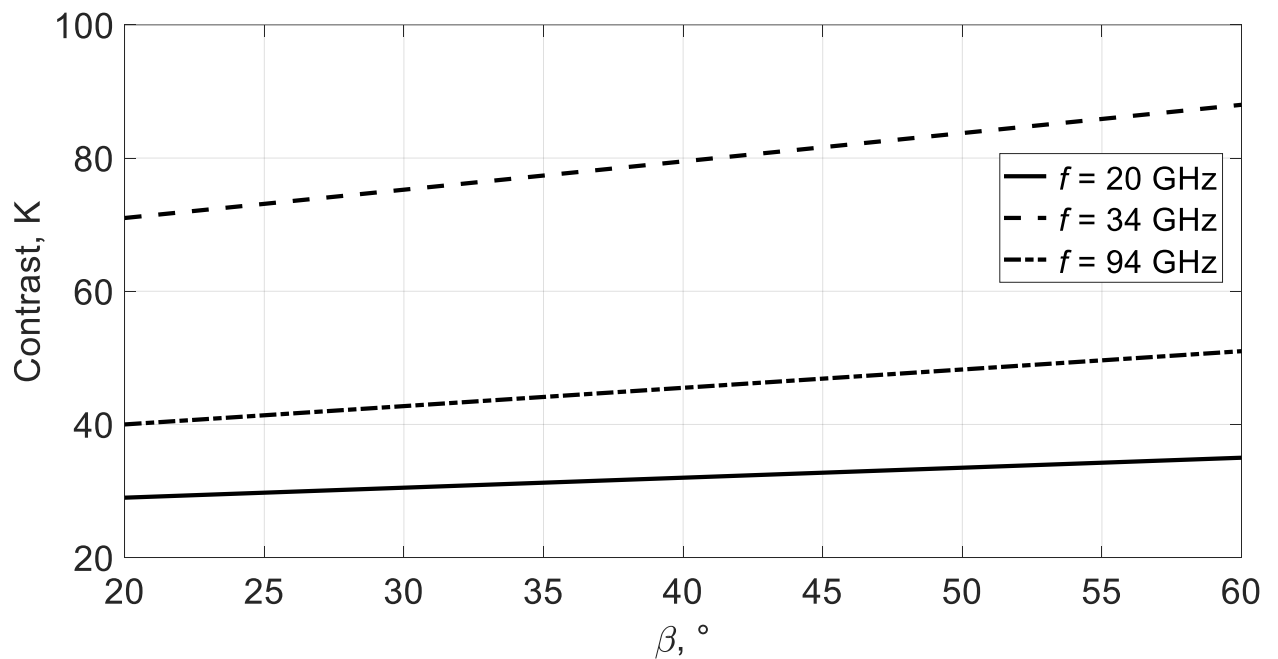


Рисунок А.20 — кутова залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при
вертикальній поляризації при хмарній погоді

Залежності для БПЛА «Укрнафтогаз». Ясно, ГП

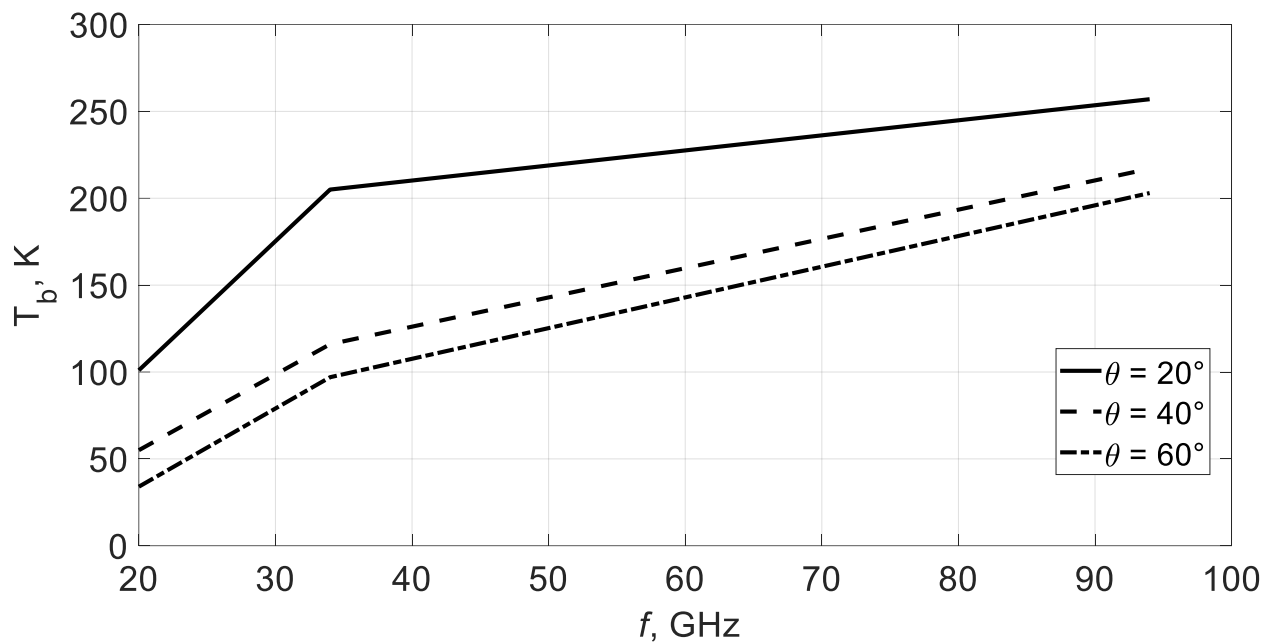


Рисунок А.21 — частотна залежність яскравісної температури БПЛА Укрнафтогаз при горизонтальній поляризації при ясній погоді

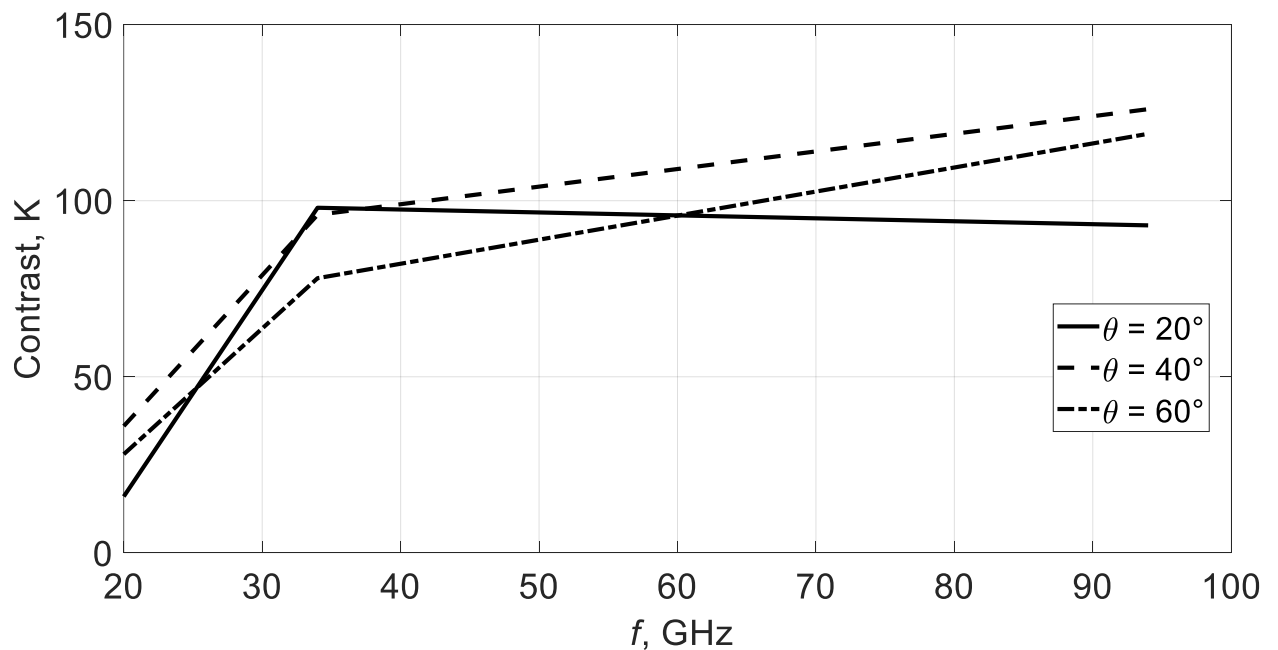


Рисунок А.22 — частотна залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при горизонтальній поляризації при ясній погоді

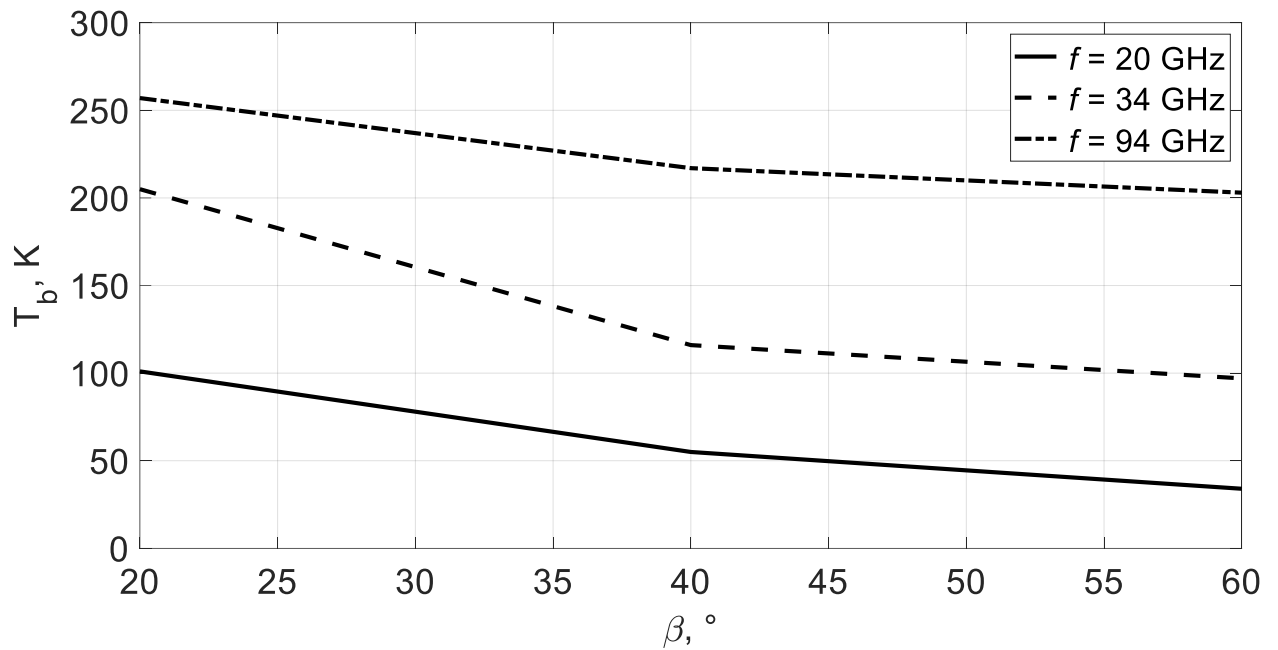


Рисунок А.23 — кутова залежність яскравісної температури БПЛА
Укрнафтогаз при горизонтальній поляризації при ясній погоді

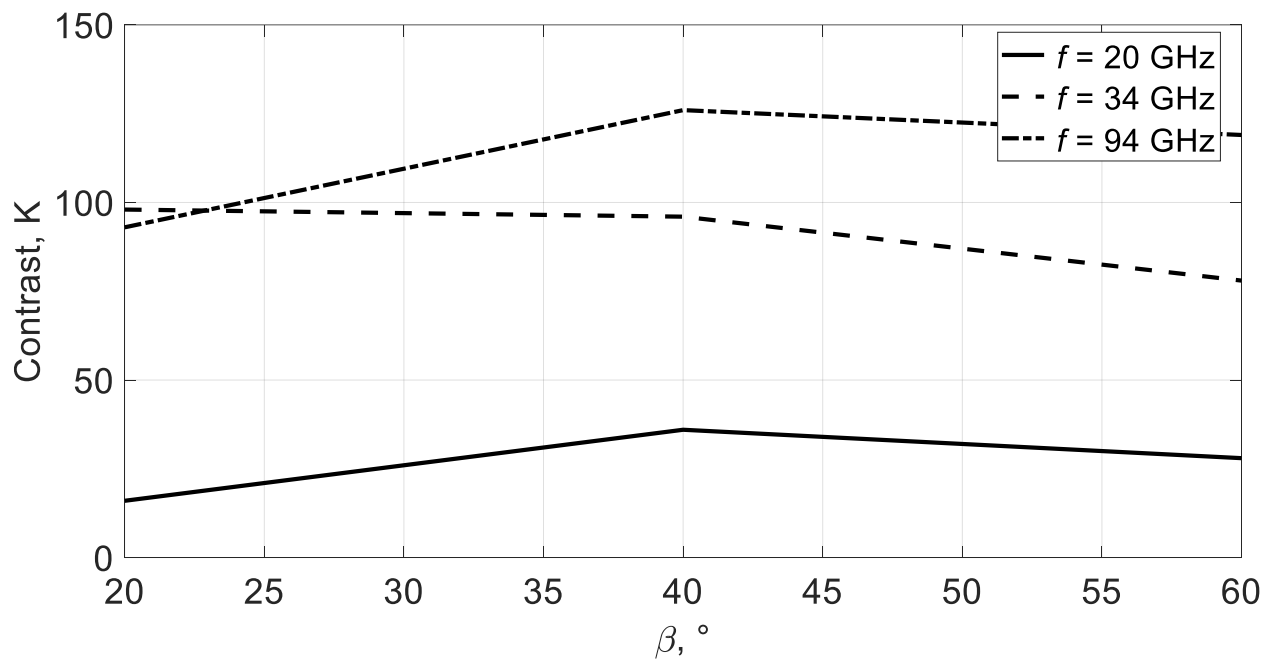


Рисунок А.24 — кутова залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при
горизонтальній поляризації при ясній погоді

Залежності для БПЛА «Укрнафтогаз». Хмарно, ГП

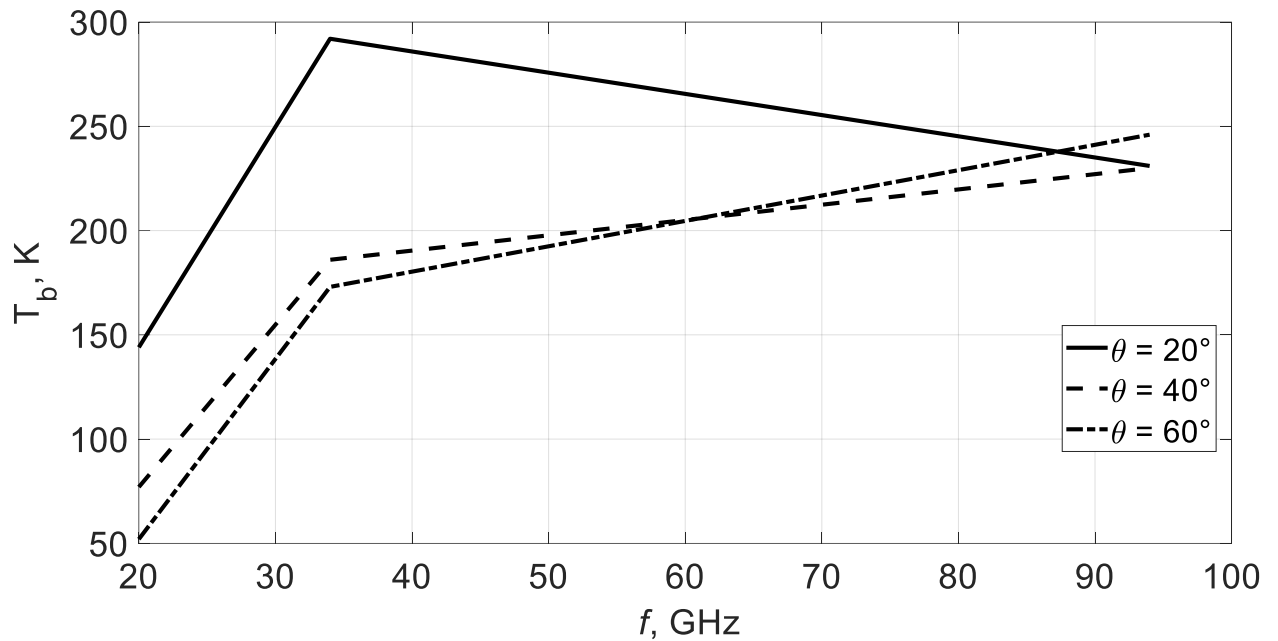


Рисунок А.25 — частотна залежність яскравісної температури БПЛА Укрнафтогаз при горизонтальній поляризації при похмурій погоді

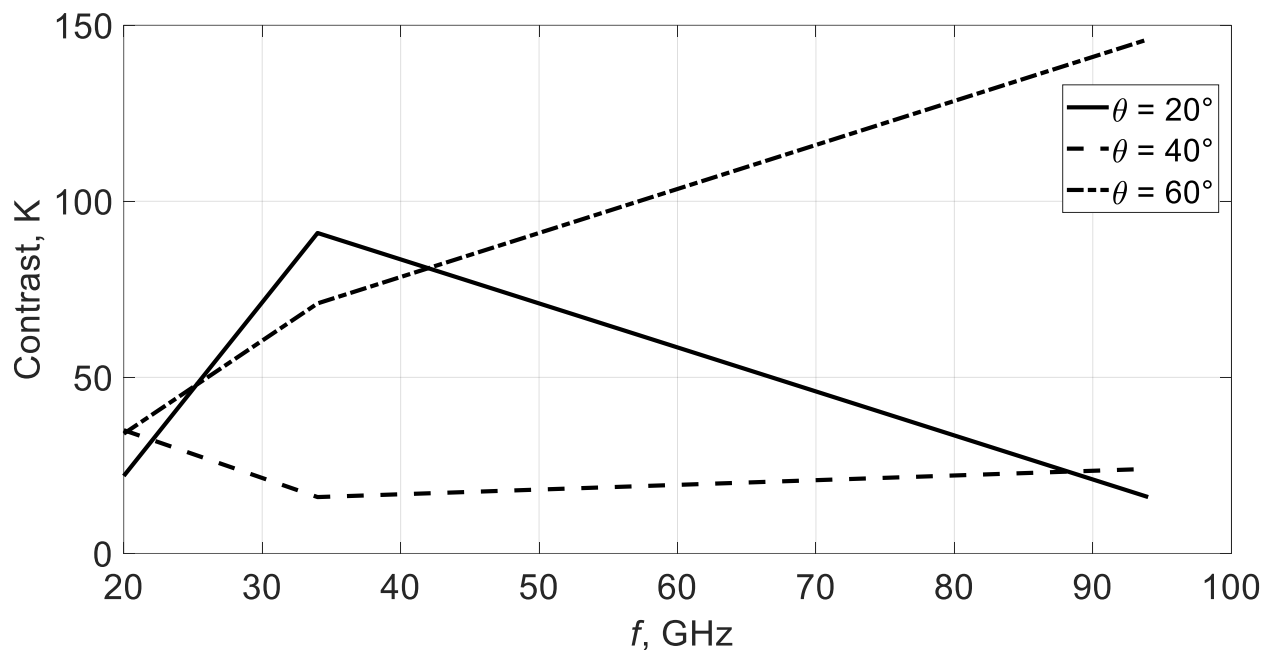


Рисунок А.26 — частотна залежність контрасту БПЛА Укрнафтогаз при горизонтальній поляризації при похмурій погоді

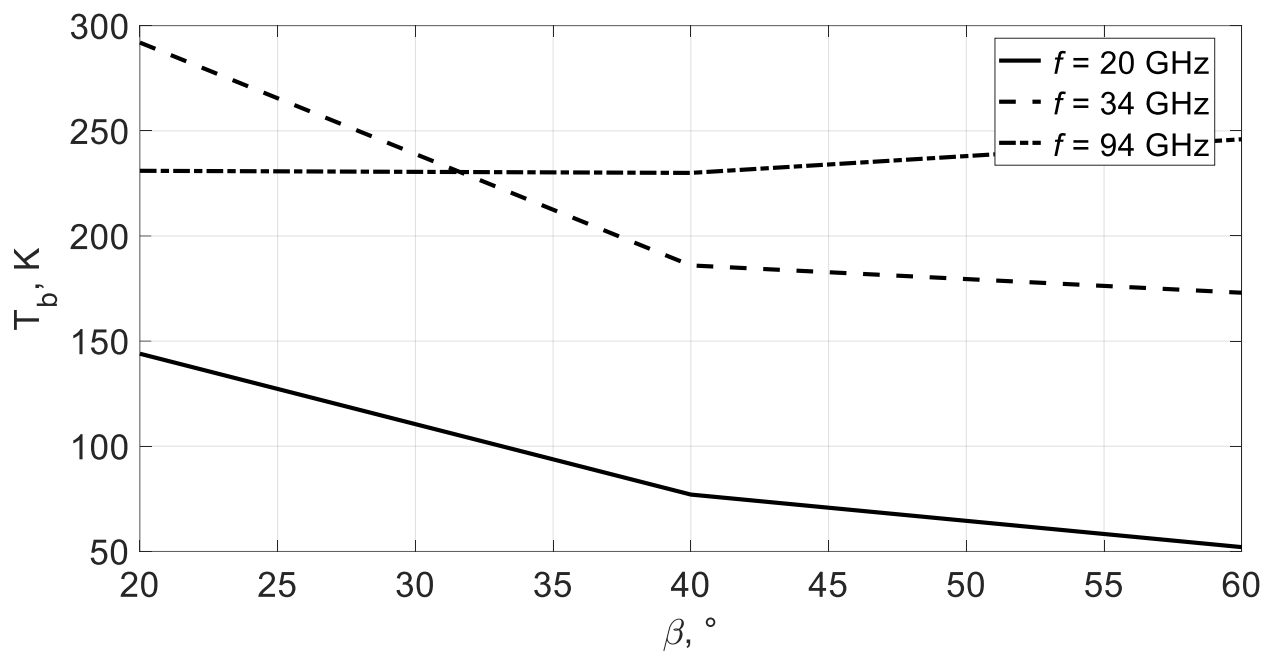


Рисунок А.27 — кутова залежність яскравісної температури БПЛА

Украфтогаз при горизонтальній поляризації при похмурій погоді

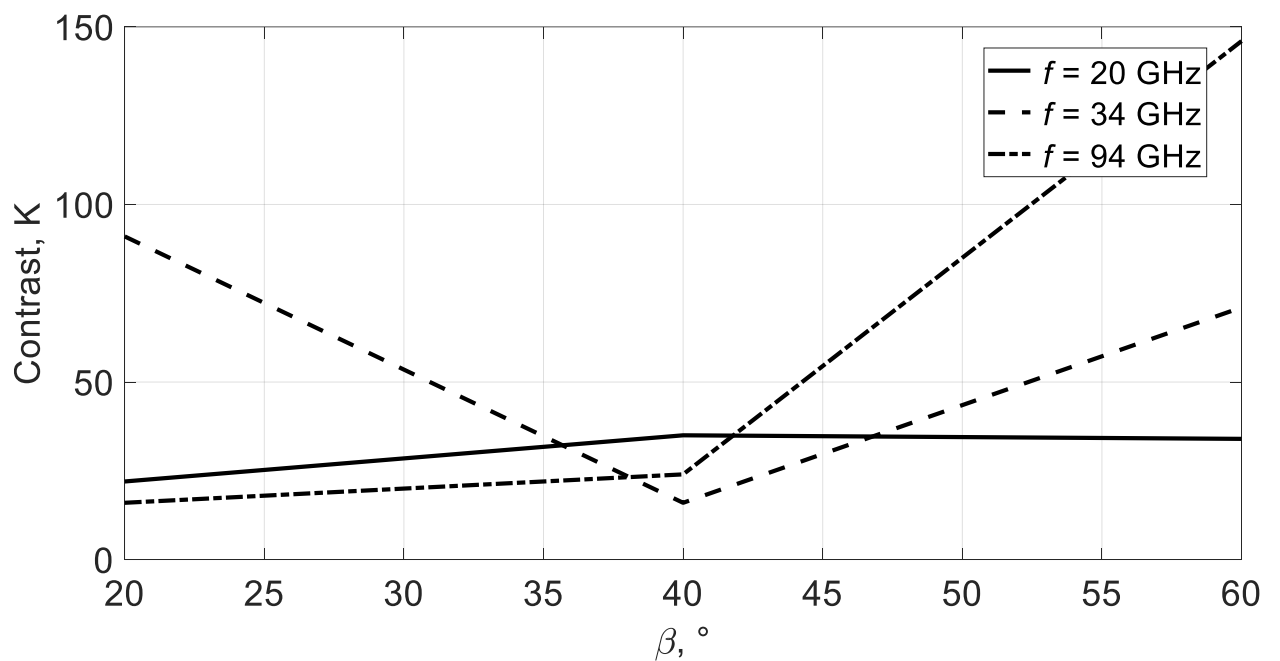


Рисунок А.28 — кутова залежність контрасту БПЛА Украфтогаз при

горизонтальній поляризації при похмурій погоді

Залежності для масштабної копії СУ-27. Ясно, ВП

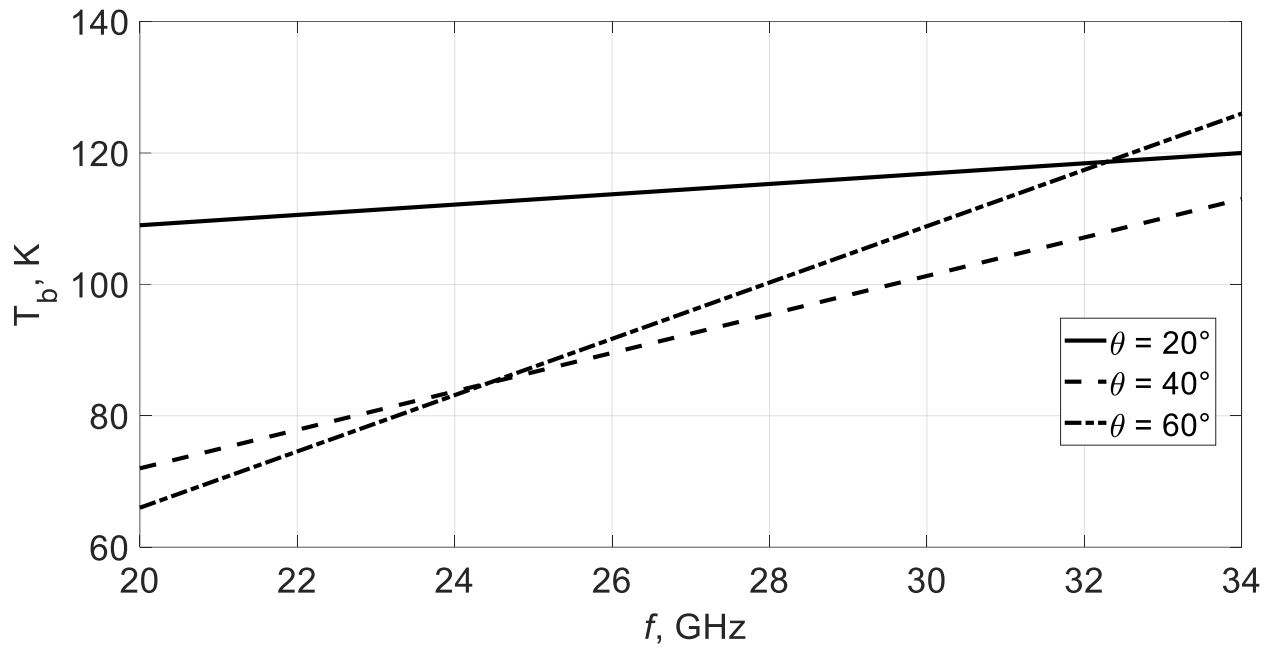


Рисунок А.29 — частотна залежність яскравісної температури БПЛА СУ-27 при вертикальній поляризації при ясній погоді

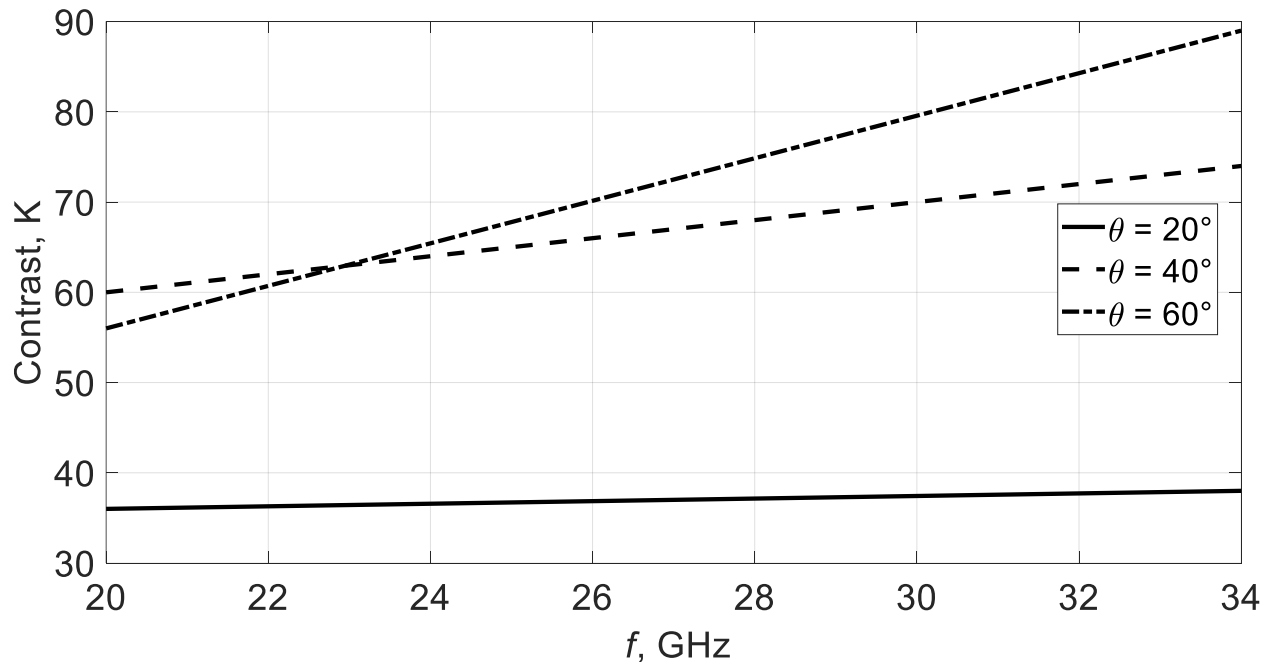


Рисунок А.30 — частотна залежність контрасту БПЛА СУ-27 при вертикальній поляризації при ясній погоді

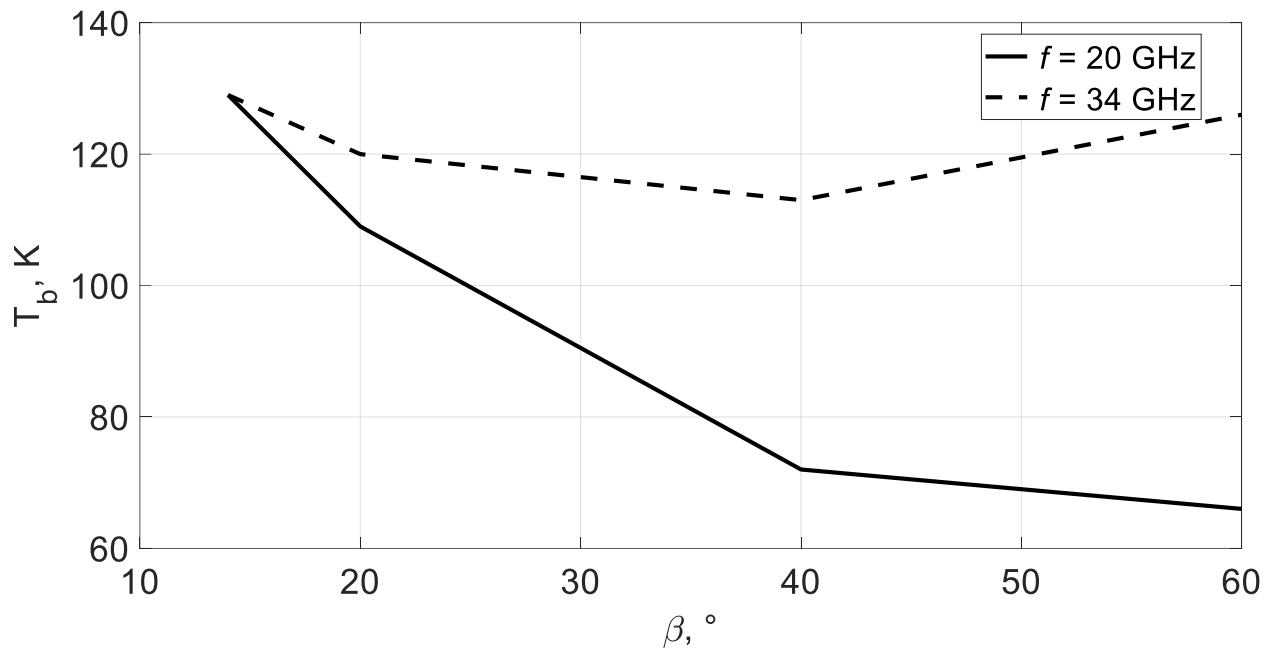


Рисунок А.31 — кутова залежність яскравісної температури БПЛА СУ-27 при вертикальній поляризації при ясній погоді

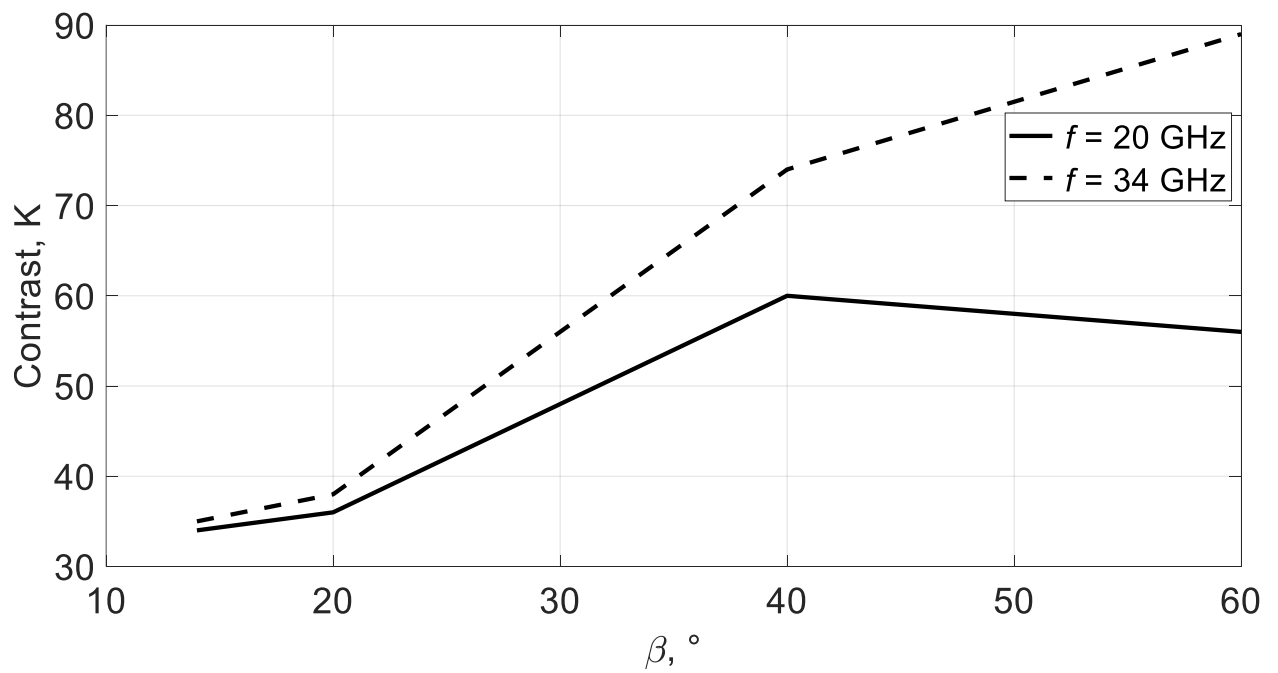


Рисунок А.32 — кутова залежність контрасту БПЛА СУ-27 при вертикальній поляризації при ясній погоді

Залежності для масштабної копії СУ-27. Ясно, ГП

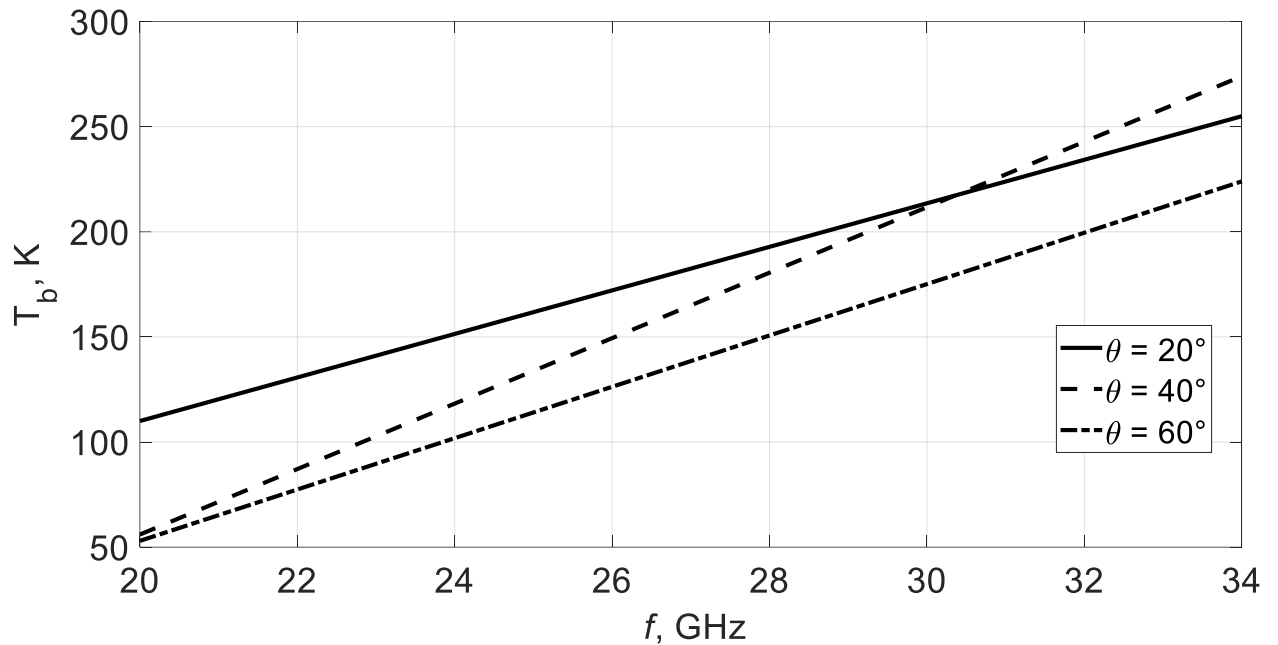


Рисунок А.33 — частотна залежність яскравісної температури БПЛА СУ-27 при горизонтальній поляризації при ясній погоді

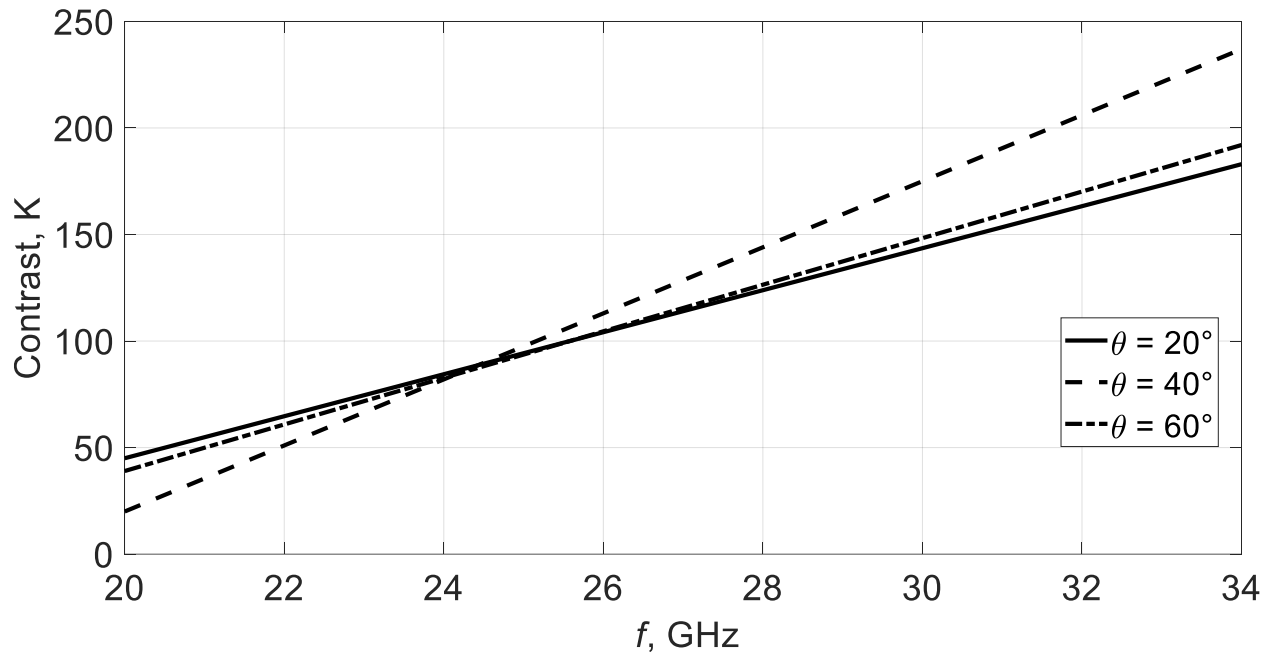


Рисунок А.34 — частотна залежність контрасту БПЛА СУ-27 при горизонтальній поляризації при ясній погоді

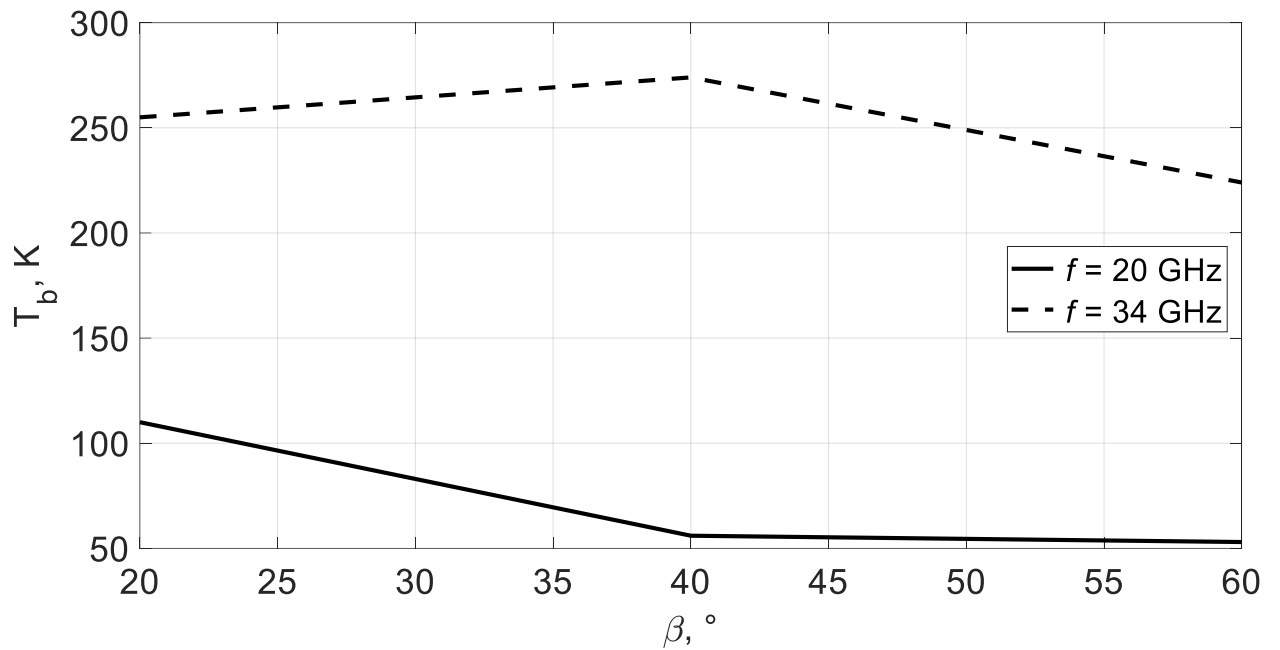


Рисунок А.35 — кутова залежність яскравісної температури БПЛА СУ-27 при горизонтальній поляризації при ясній погоді

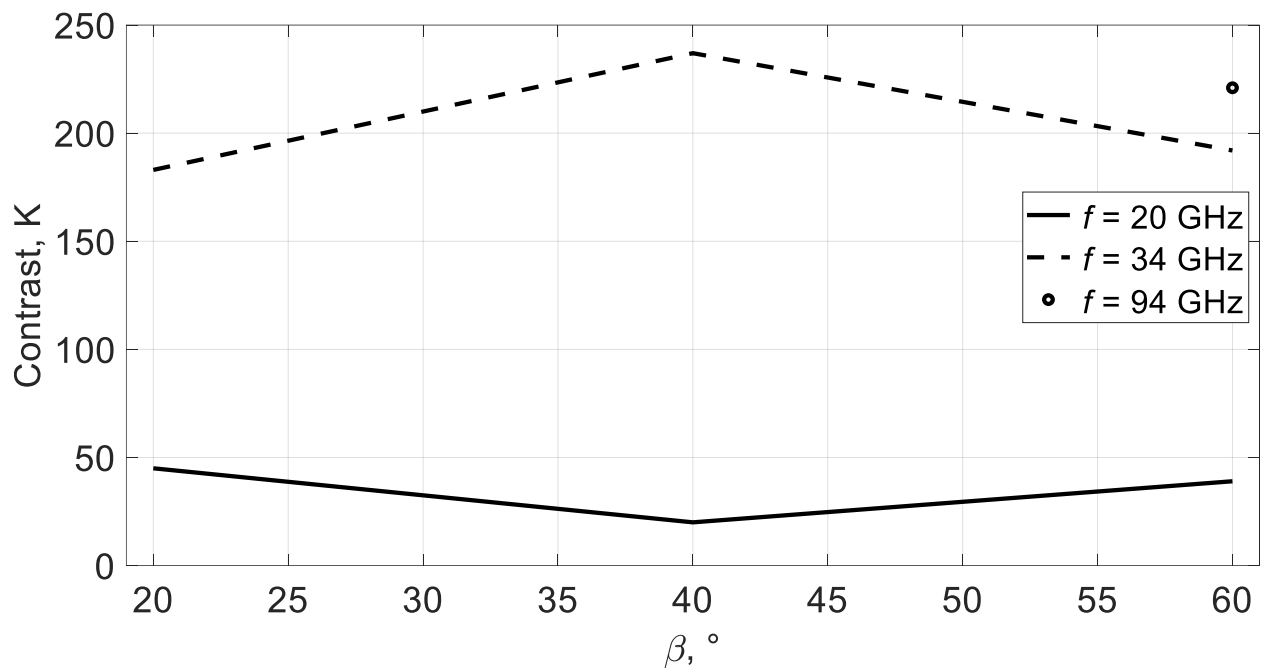


Рисунок А.36 — кутова залежність контрасту БПЛА СУ-27 при горизонтальній поляризації при ясній погоді

Залежності для Квадрокоптеру. Ясно, ВП.

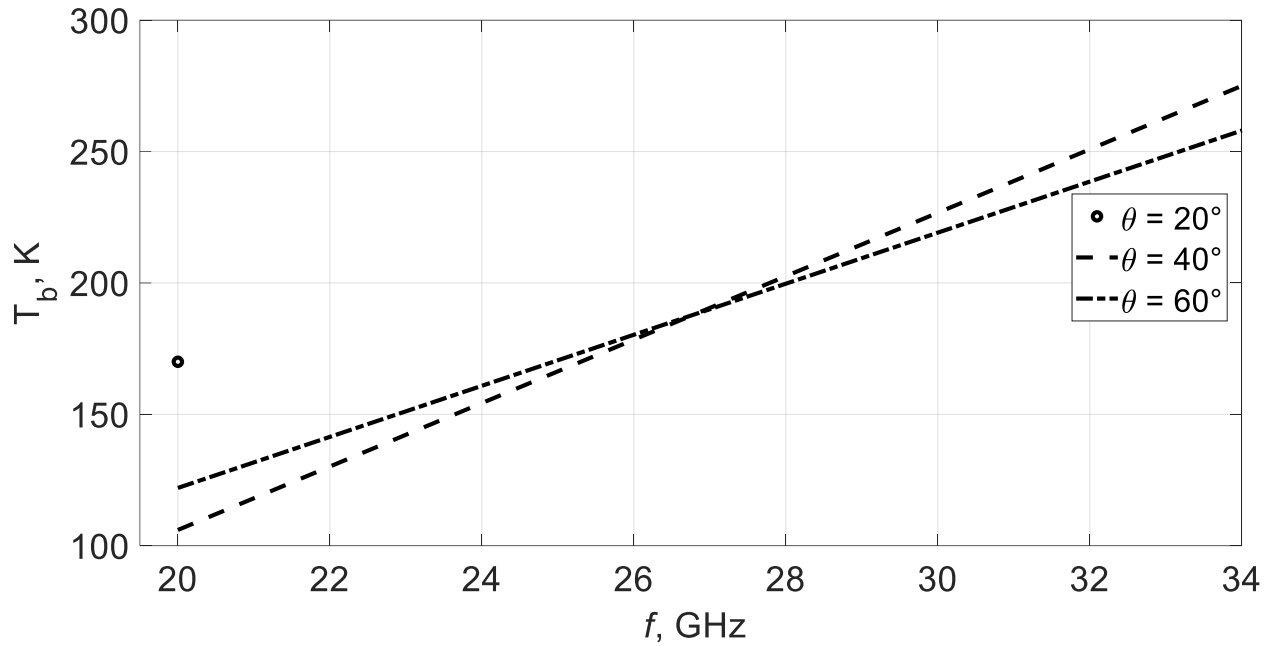


Рисунок А.37 — частотна залежність яскравісної температури квадрокоптеру при вертикальній поляризації

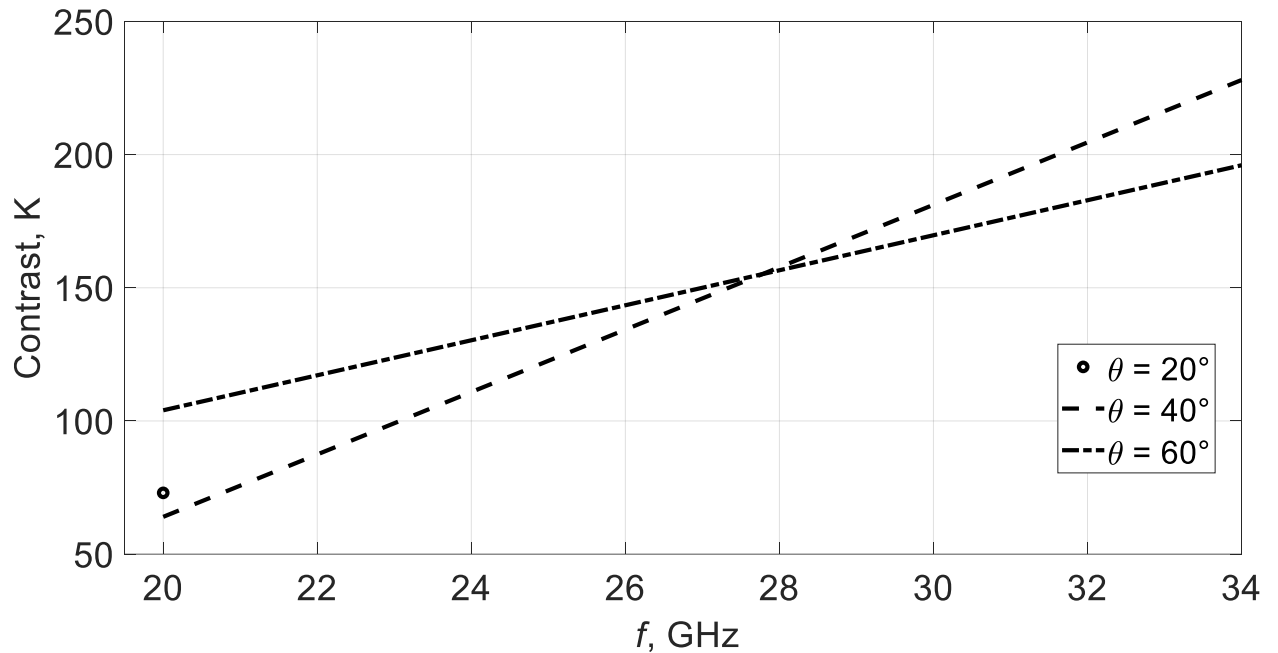


Рисунок А.38 — частотна залежність контрасту квадрокоптеру при вертикальній поляризації

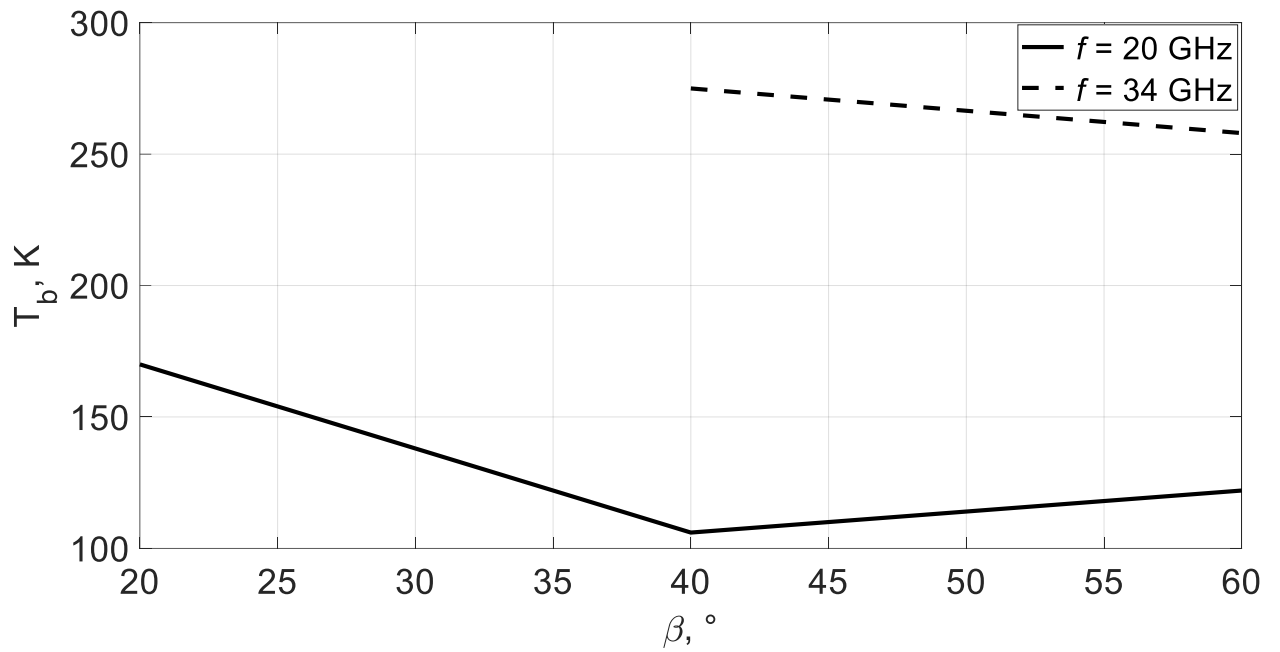


Рисунок А.39 — кутова залежність яскравісної температури квадрокоптеру при вертикальній поляризації

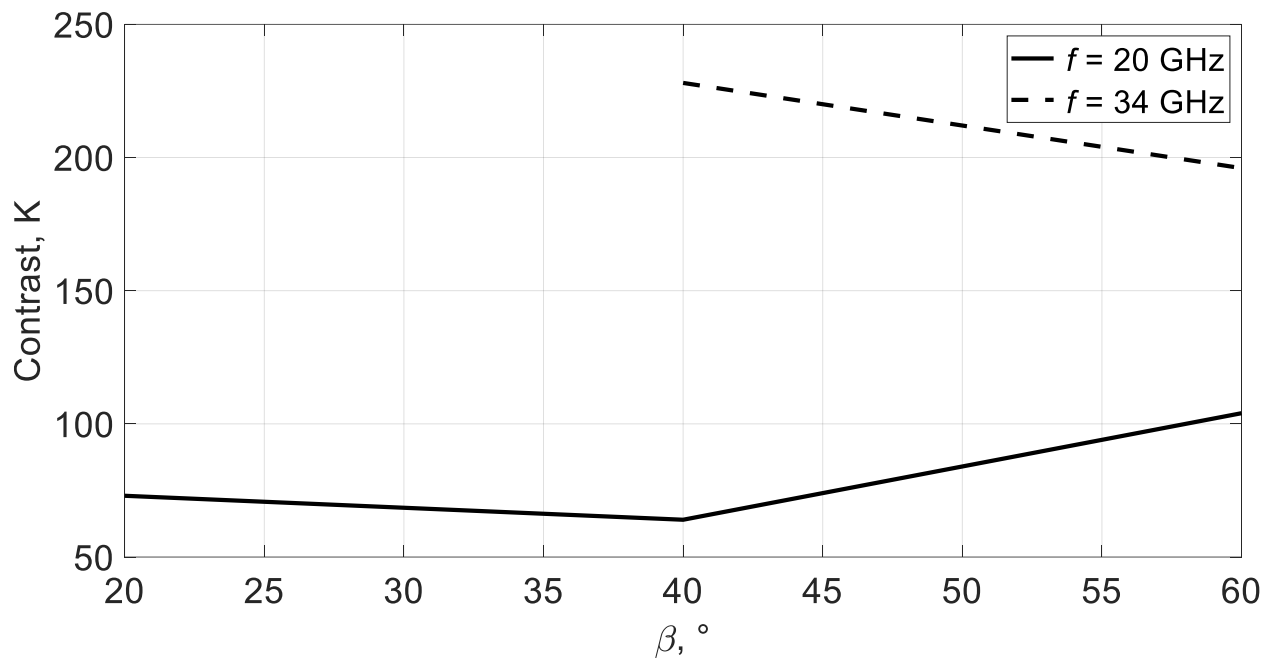


Рисунок А.40 — кутова залежність контрасту квадрокоптеру при вертикальній поляризації

Залежності для Квадрокоптеру. Ясно, ГП.

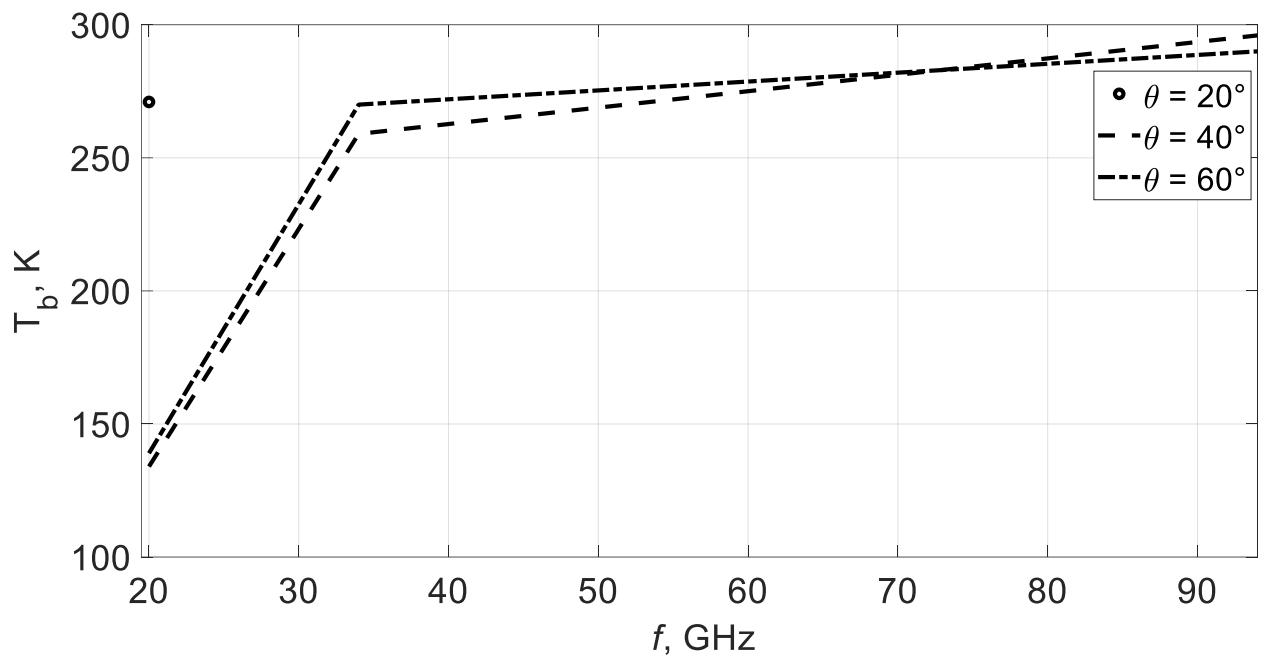


Рисунок А.41 — частотна залежність яскравісної температури квадрокоптеру при горизонтальній поляризації

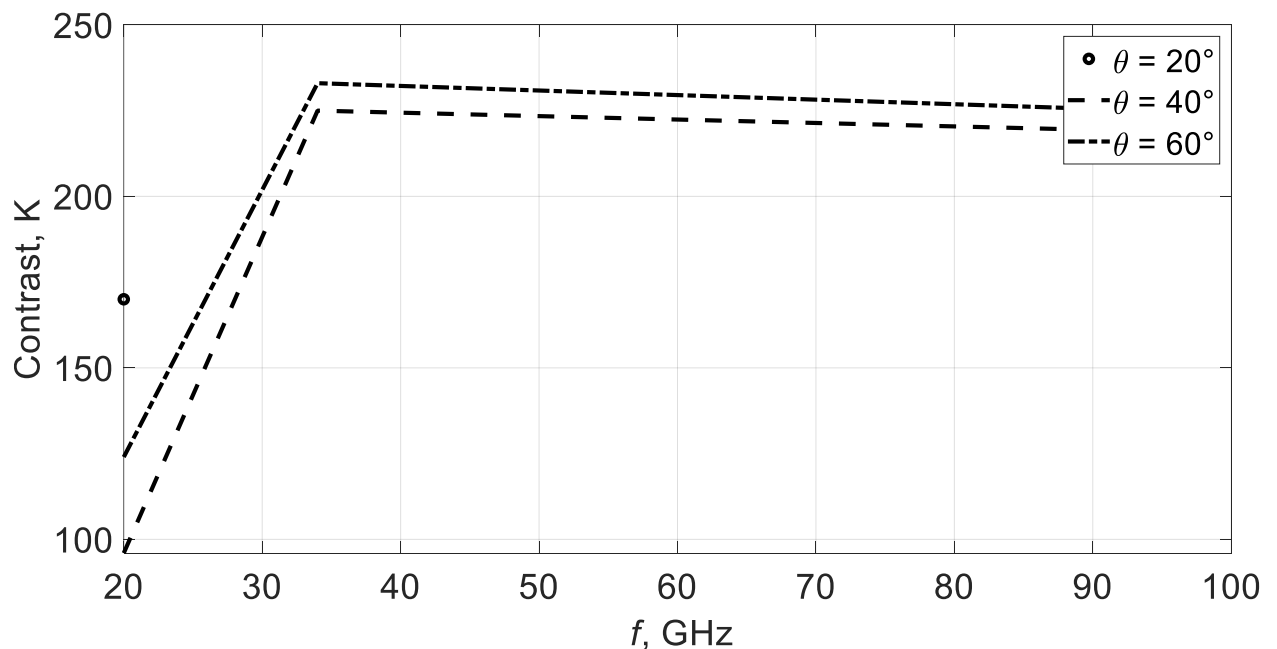


Рисунок А.42 — частотна залежність контрасту квадрокоптеру при горизонтальній поляризації

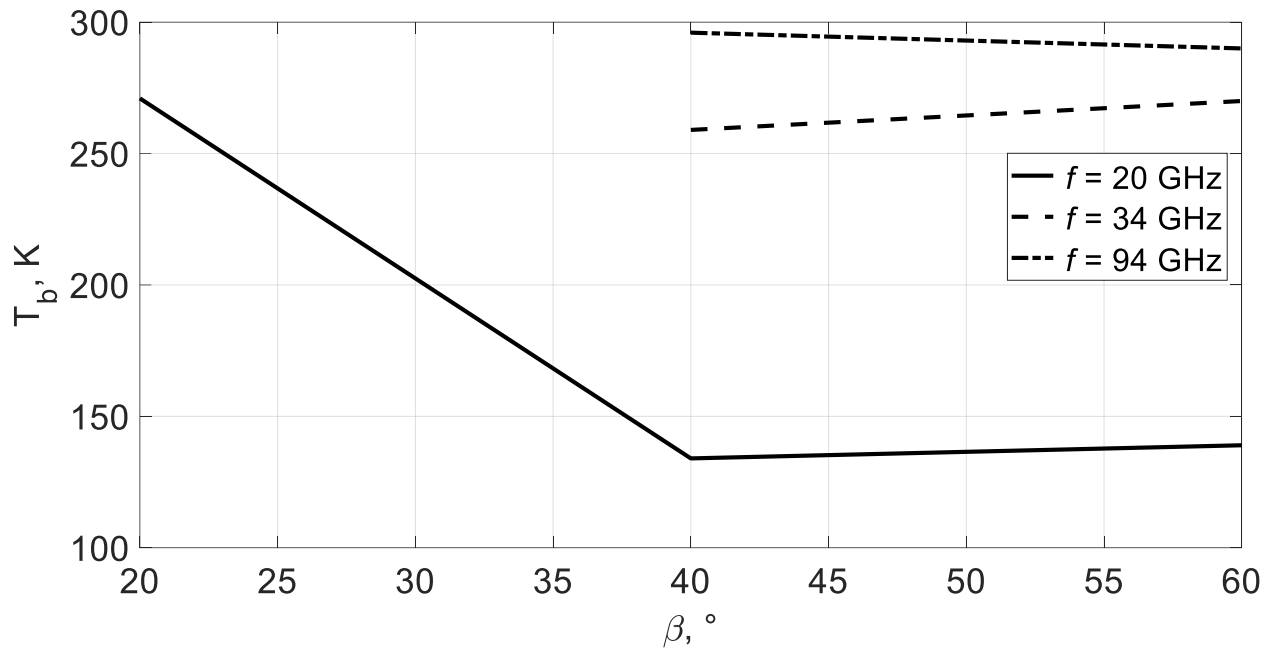


Рисунок А.43 — кутова залежність яскравісної температури квадрокоптеру при горизонтальній поляризації

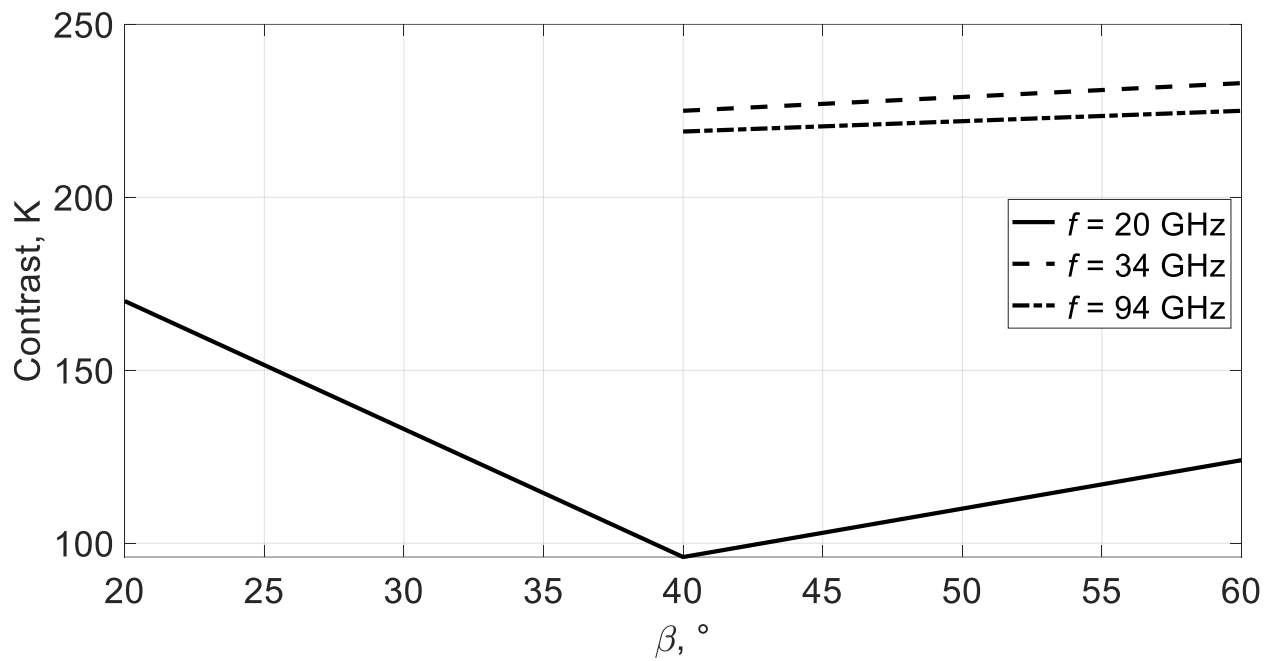


Рисунок А.44 — кутова залежність контрасту квадрокоптеру при горизонтальній поляризації

Залежності для листа з Оргскла. Майже ясно, ВП

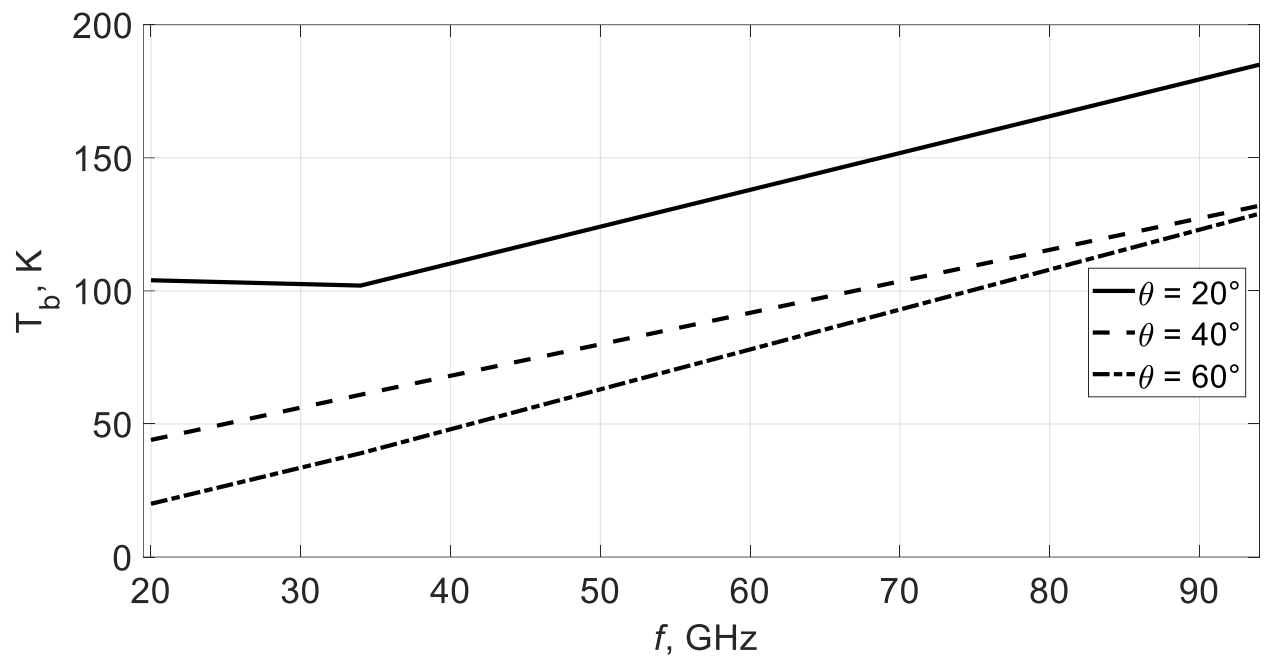


Рисунок А.45 — частотна залежність яскравісної температури листа оргскла при вертикальній поляризації (майже ясна погода)

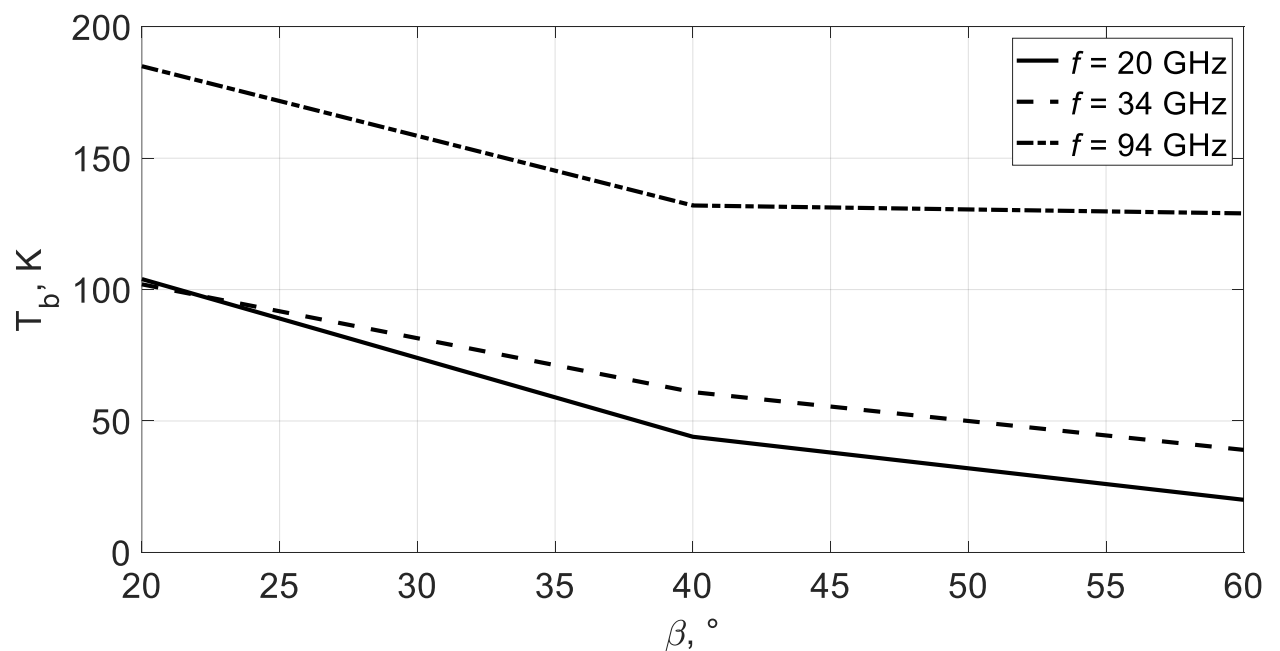


Рисунок А.46 — кутова залежність яскравісної температури листа оргскла при вертикальній поляризації

Залежності для листа з Оргскла. Похмура погода, ГП.

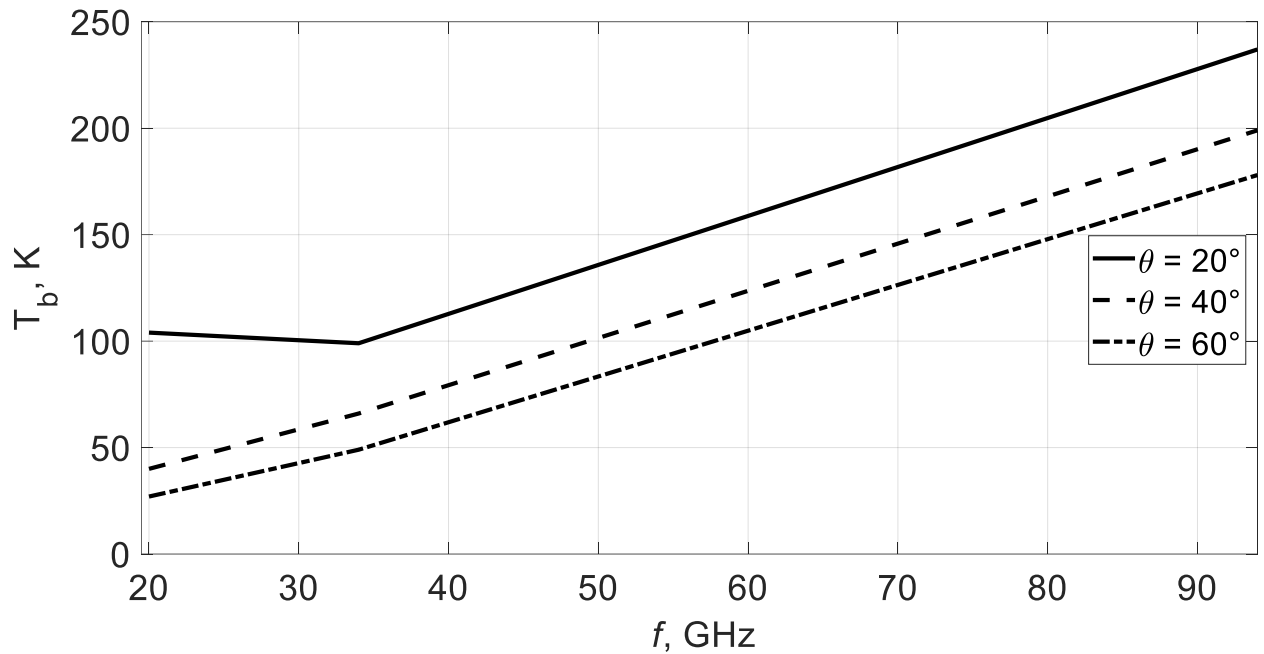


Рисунок А.47 — частотна залежність яскравісної температури листа оргскла при горизонтальній поляризації

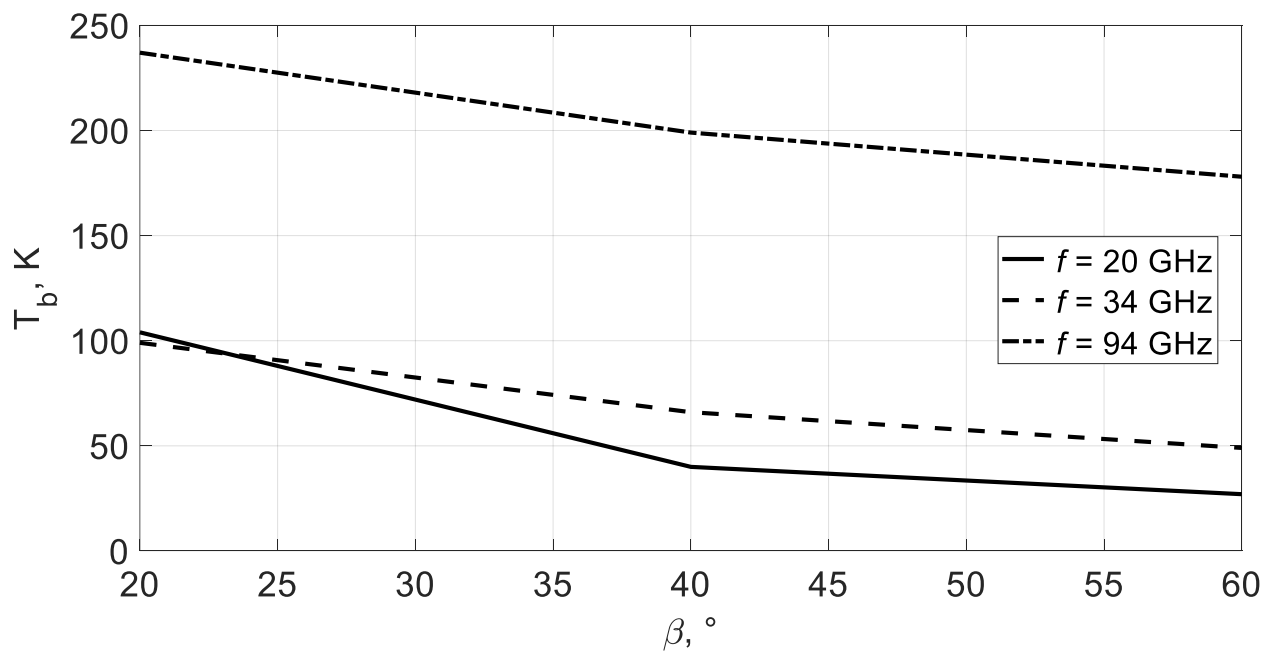


Рисунок А.48 — кутова залежність яскравісної температури листа оргскла при горизонтальній поляризації

Залежності для металевого листа. Ясно, ВП.

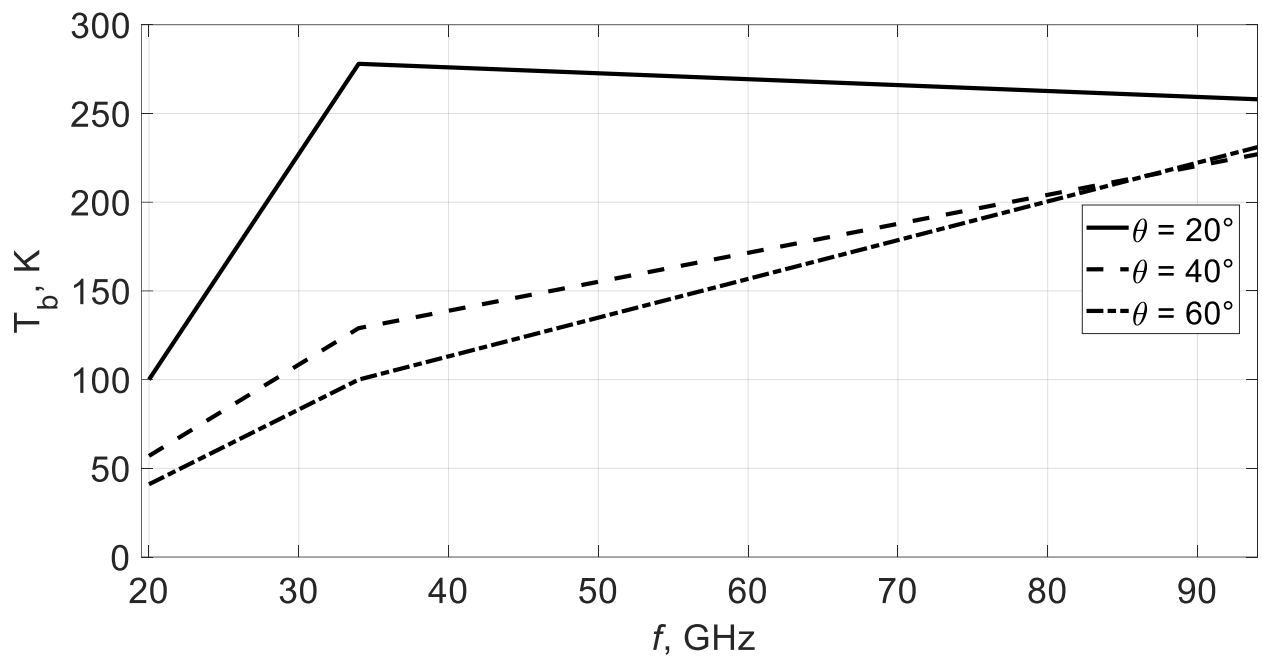


Рисунок А.49 — частотна залежність яскравісної температури листа металу при вертикальній поляризації (ясна погода)

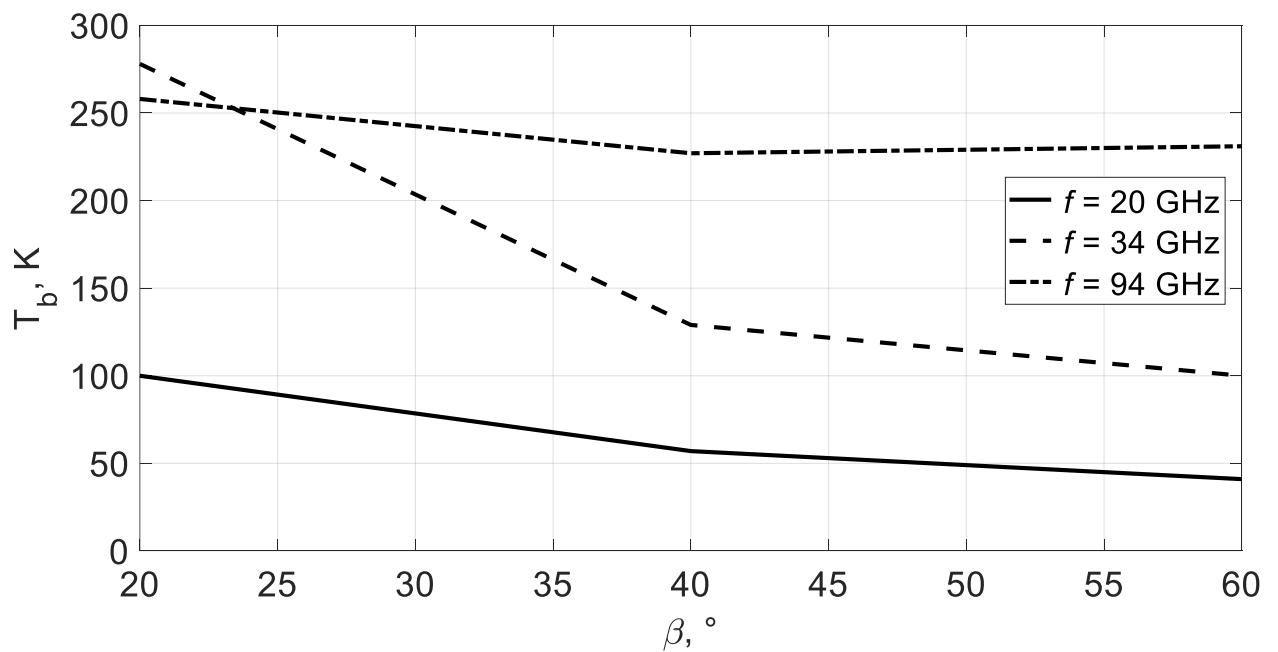


Рисунок А.50 — кутова залежність яскравісної температури листа металу при вертикальній поляризації

Окремі випадки вимірювань для листа з оргскла.

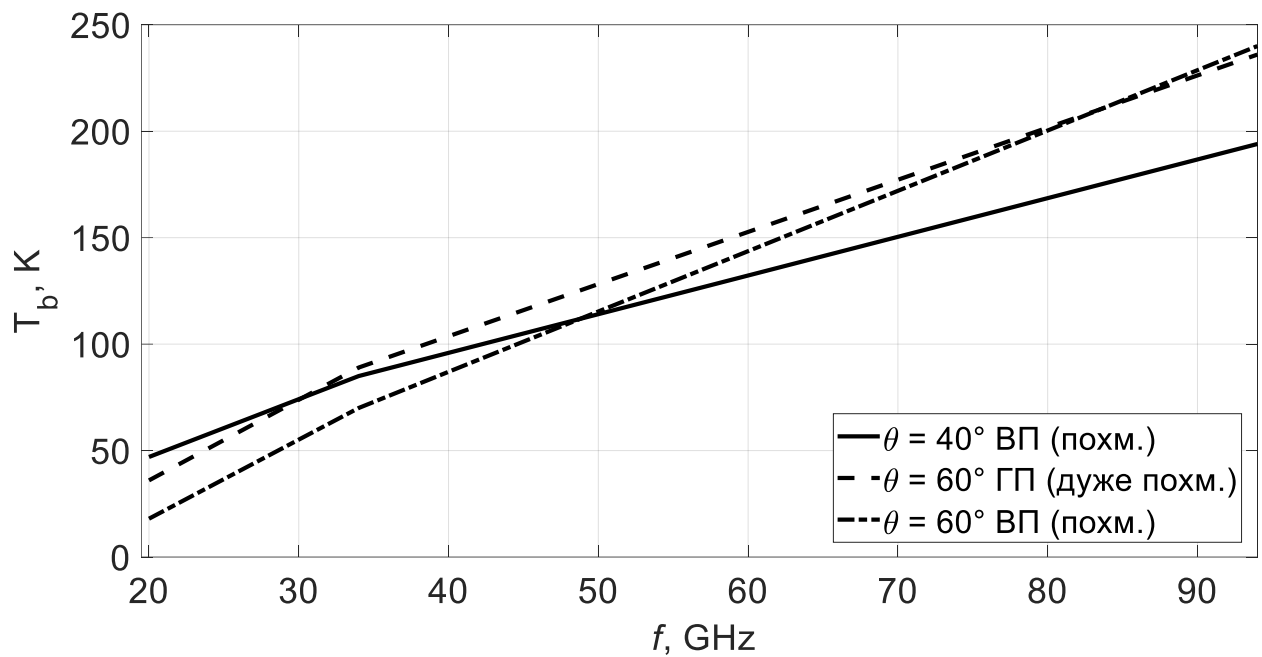


Рисунок А.51 — частотна залежність яскравісної температури листа оргскла при похмурій погоді

Окремі випадки вимірювань для листа металу з краплями на поверхні

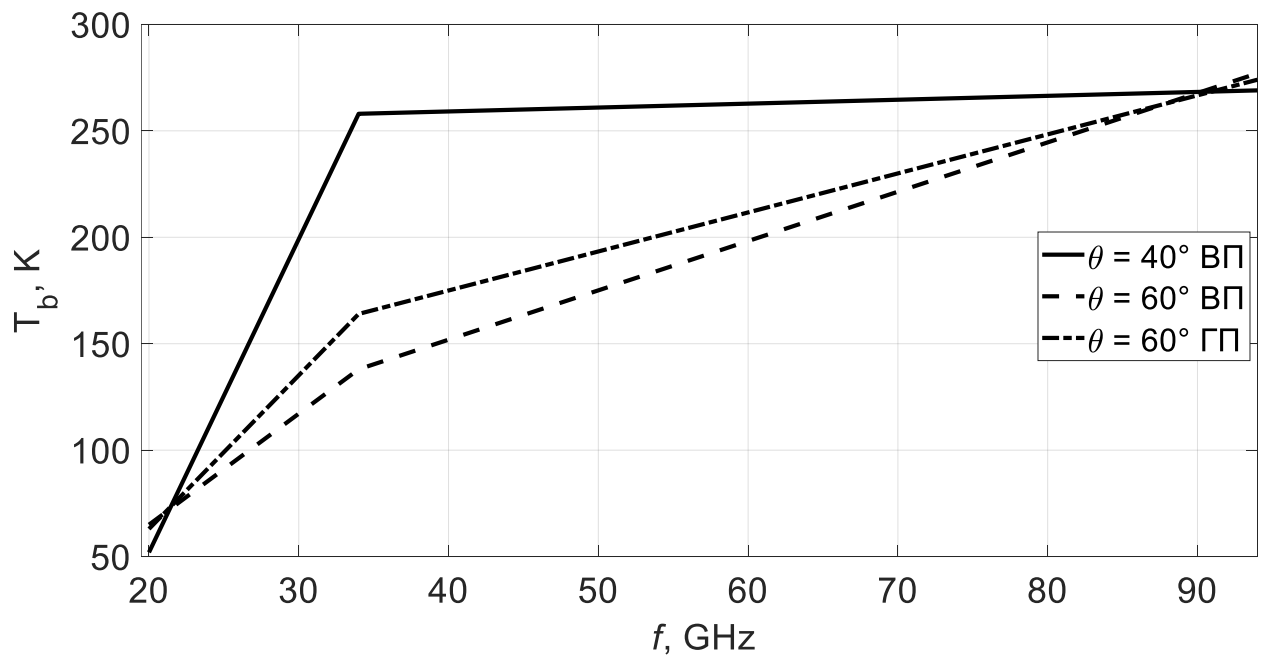


Рисунок А.52 — частотна залежність яскравісної температури листа металу з краплями при похмурій погоді

ДОДАТОК Б

Розрахунок $D_{виявл}(R)$. Ймовірність $D_{виявл}(R)$ БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **безхмарної атмосфери** показані на рис. Б.6-Б.9.

Ймовірність $D_{виявл}(R)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **безхмарної атмосфери** показані на рис. Б.10-Б.13.

Ймовірність $D_{виявл}(R)$ БПЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **безхмарної атмосфери** показані на рис. Б.14-Б.17.

Ймовірність $D_{виявл}(R)$ БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **безхмарної атмосфери** показані на рис. Б.18-Б.21.

Ймовірність $D_{виявл}(R)$ БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **безхмарної атмосфери** показані на рис. Б.22-Б.25.

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}, \quad \Delta F = 1 \text{ GHz}, \quad T = 0.1 \text{ s},$
 $T_n = 100 \text{ K}, \quad T_{UAV} = 89.1 \text{ K}, \quad \Delta\theta = 2^\circ,$
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2, \quad \theta_{atm} = 30^\circ, \quad T_{atm} = 16 \text{ K}, \quad \Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}.$

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 771 \text{ m}.$
For $L = 0.001, D = 0.9, R = 701 \text{ m}.$
For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 656 \text{ m}.$

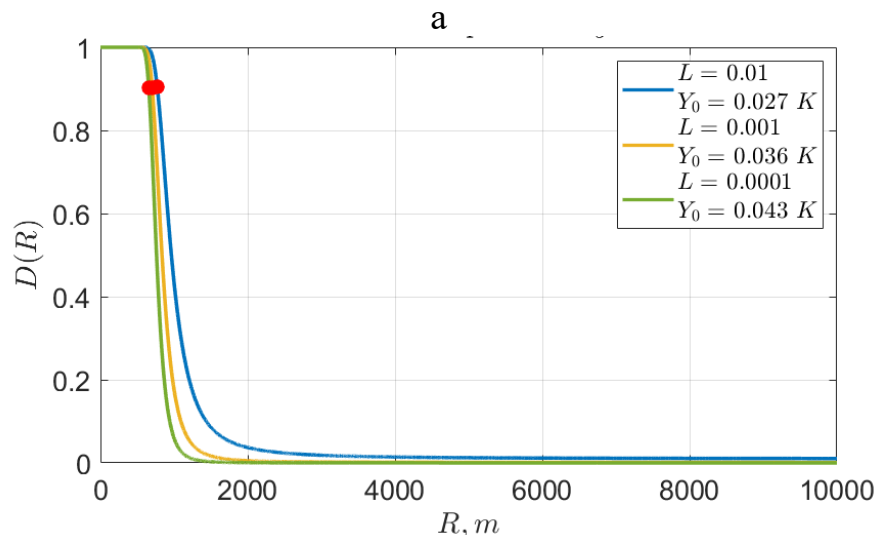


Рисунок Б.6 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею $0,5 \text{ м}^2$ зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 102.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 45 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 611 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 555 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 519 \text{ m}$.

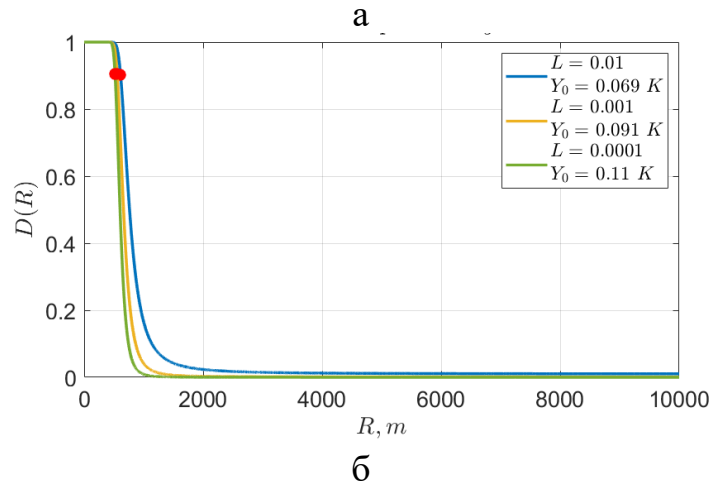


Рисунок Б.7 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею $0,5 \text{ м}^2$ зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 140.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 46 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1011 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 919 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 860 \text{ m}$.

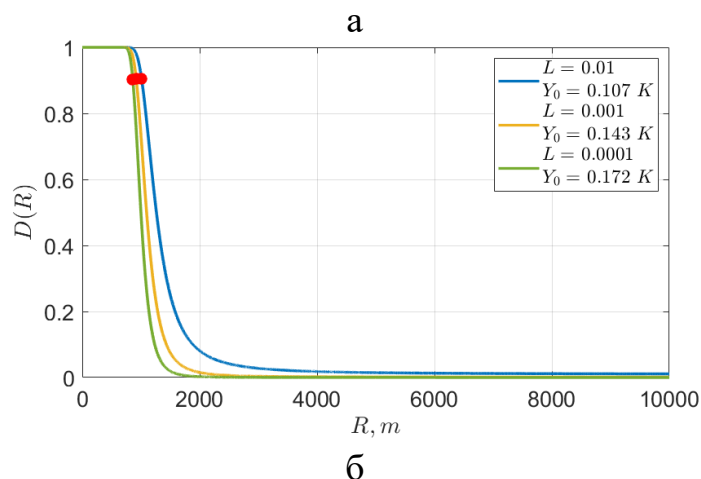
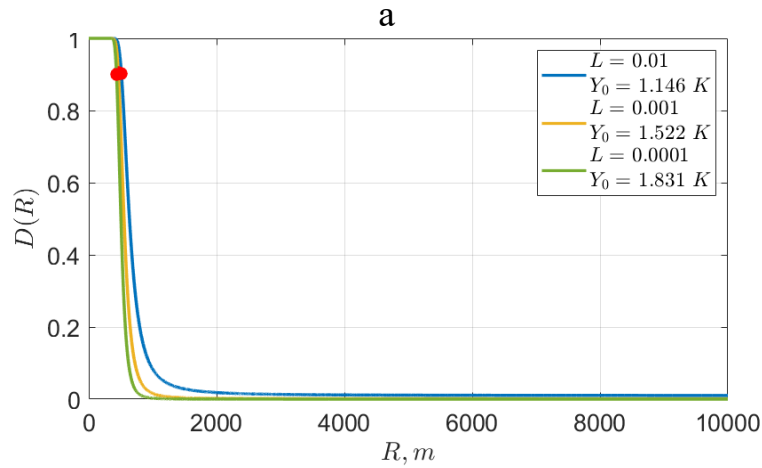


Рисунок Б.8 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею $0,5 \text{ м}^2$ зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 246.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 99 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 510 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 463 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 434 \text{ m}$.

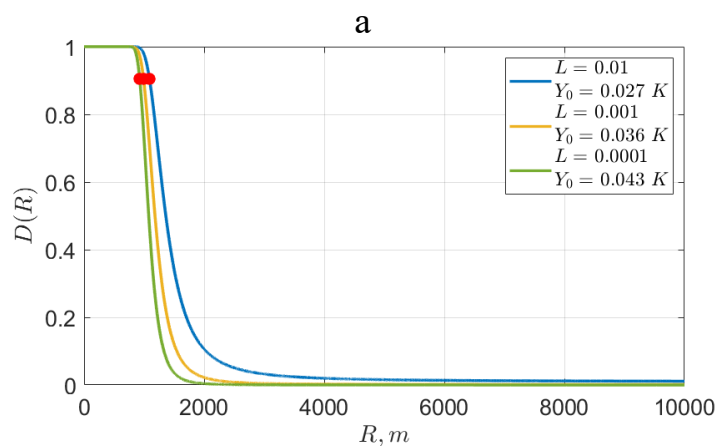


б

Рисунок Б.9 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею $0,5 \text{ м}^2$ зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 89.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 16 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1090 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 991 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 927 \text{ m}$.

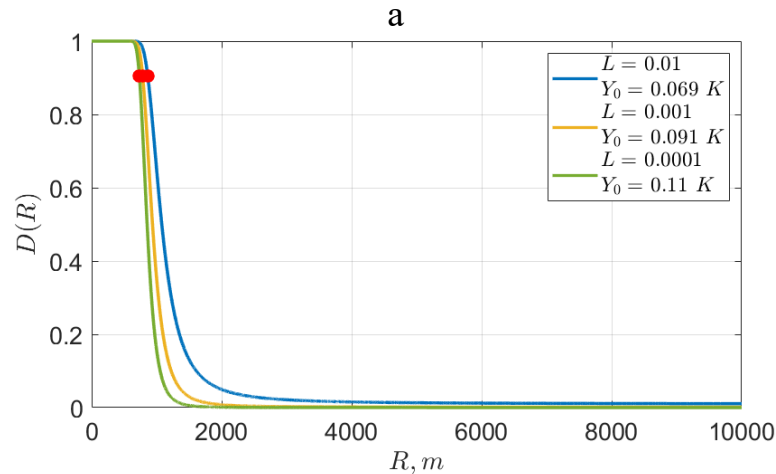


б

Рисунок Б.10 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 1 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 102.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 45 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 863 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 785 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 734 \text{ m}$.

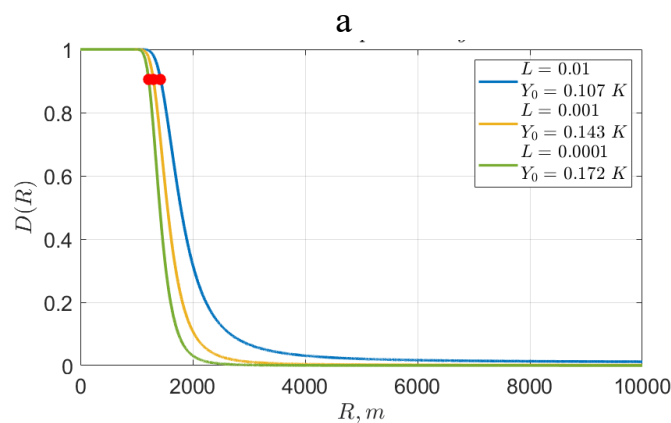


б

Рисунок Б.11 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 1 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 140.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 46 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1429 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 1299 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 1215 \text{ m}$.



б

Рисунок Б.12 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 1 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 246.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 99 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 721 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 655 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 613 \text{ m}$.

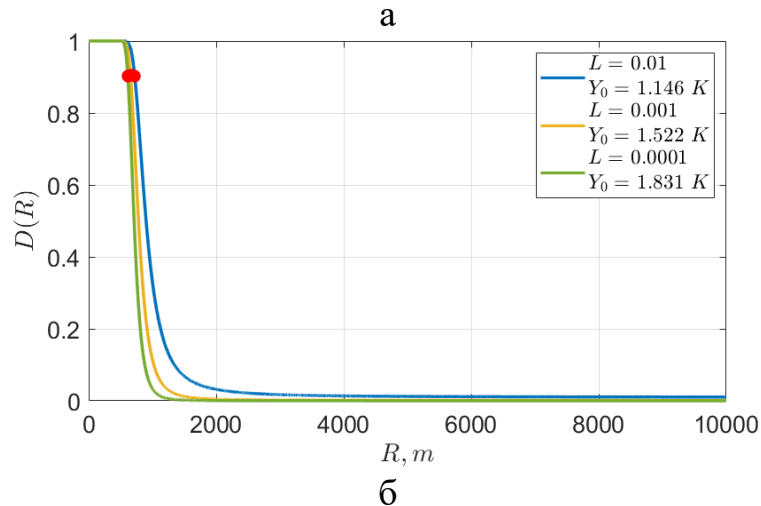


Рисунок Б.13 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА площею 1 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 89.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 16 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 2436 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 2215 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 2072 \text{ m}$.

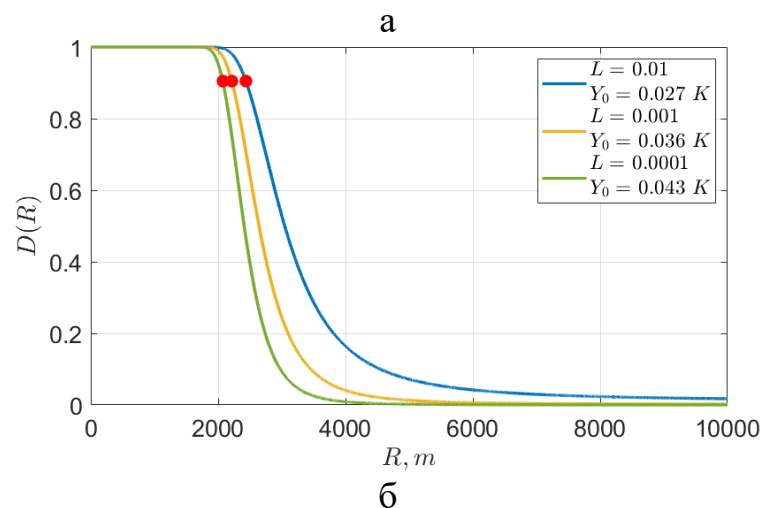


Рисунок Б.14 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА площею 5 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

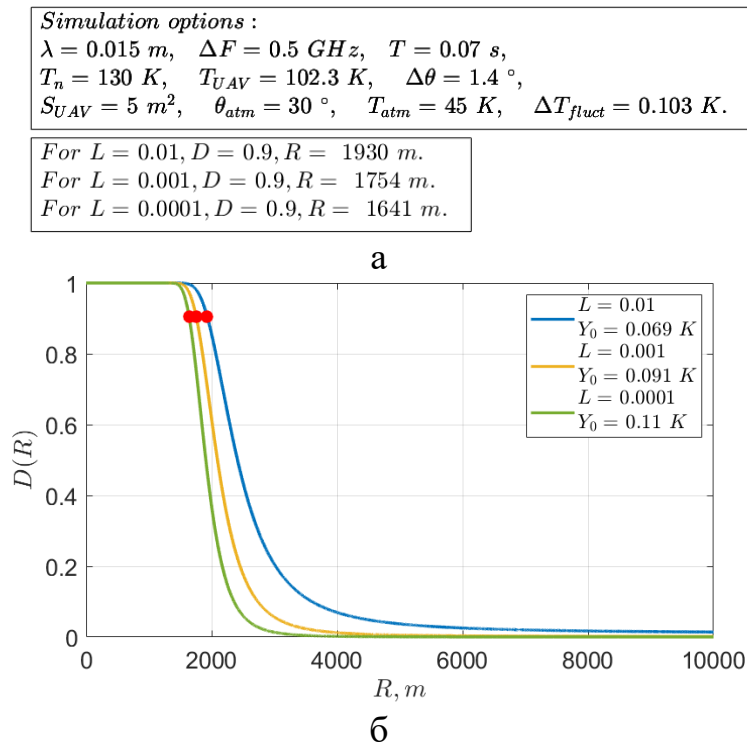


Рисунок Б.15 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 5 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

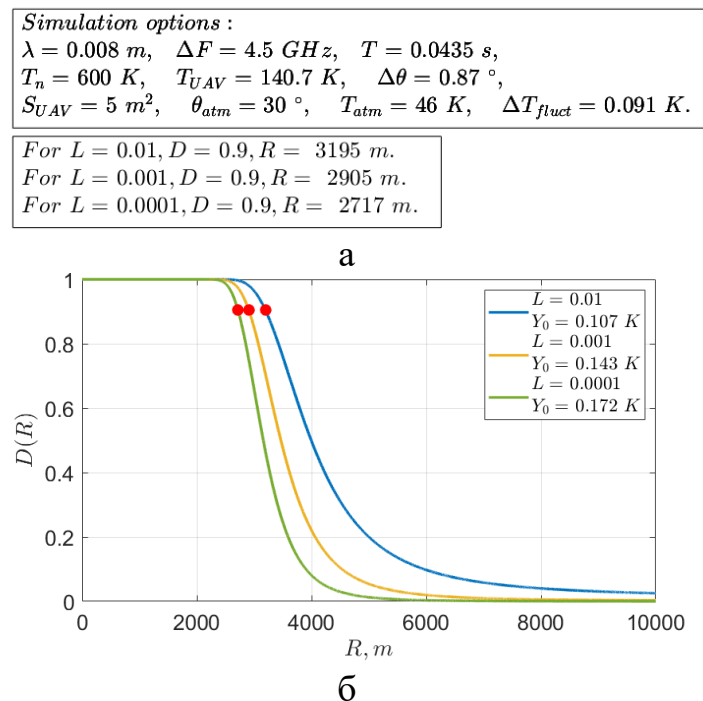


Рисунок Б.16 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 5 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

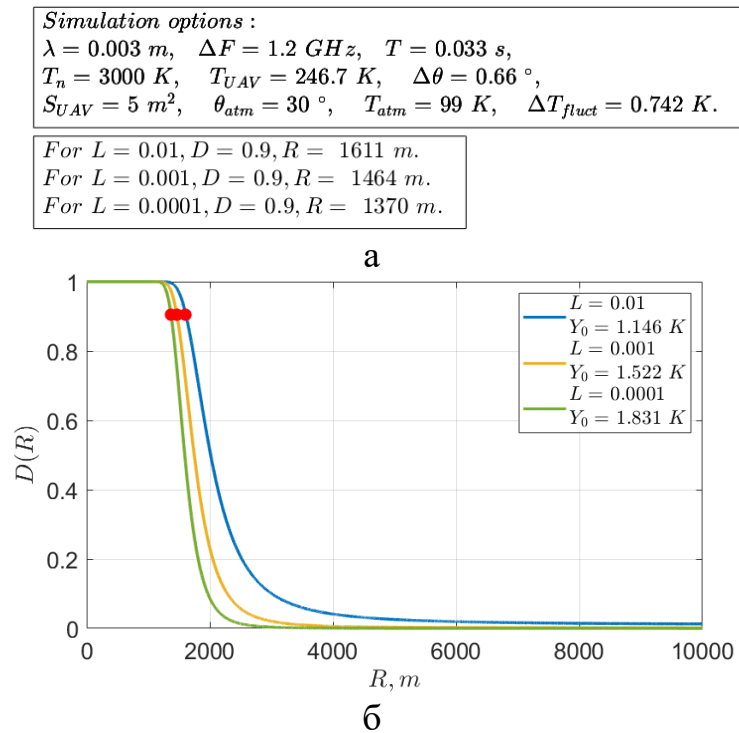


Рисунок Б.17 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА площею 5 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

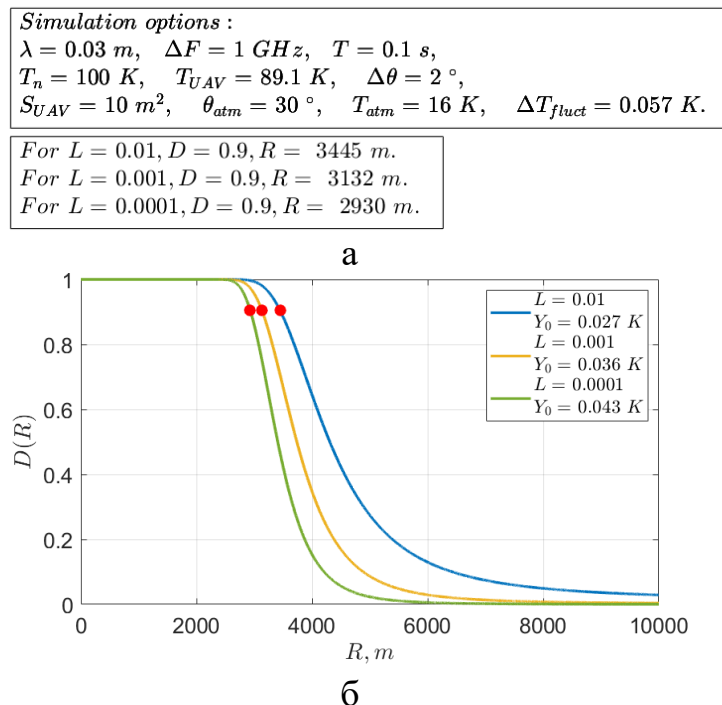


Рисунок Б.18 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА площею 10 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 102.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 10 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 45 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 2729 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 2481 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 2321 \text{ m}$.

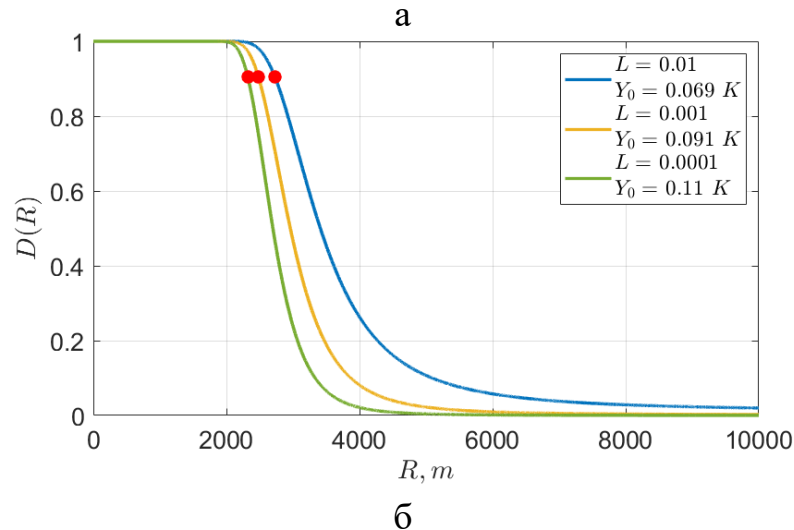


Рисунок Б.19 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 10 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 140.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 10 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 46 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 4518 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 4108 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 3842 \text{ m}$.

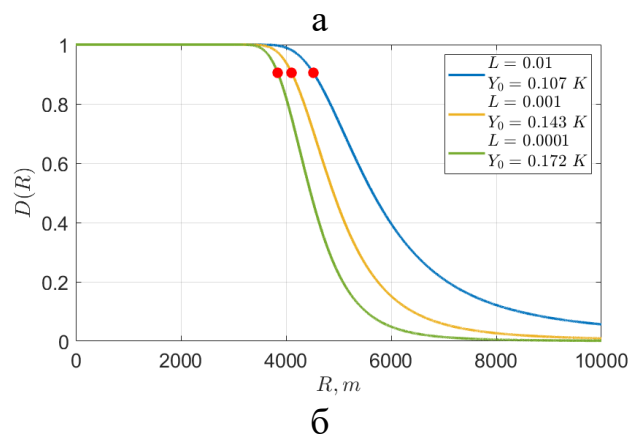
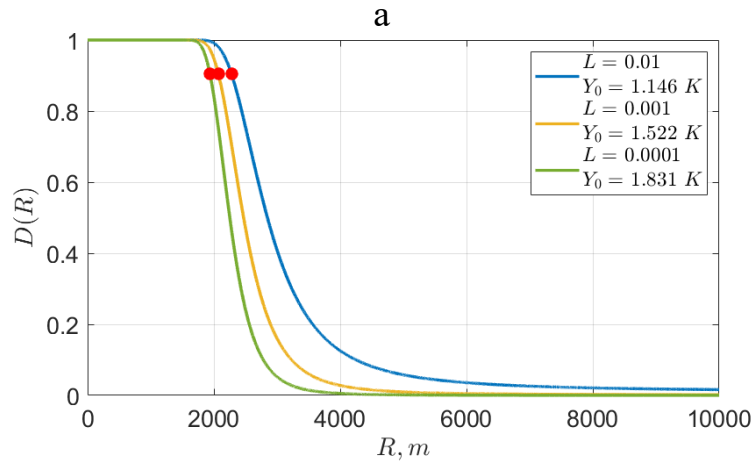


Рисунок Б.20 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 10 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 246.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $S_{UAV} = 10 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 99 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 2278 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 2071 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 1937 \text{ m}$.

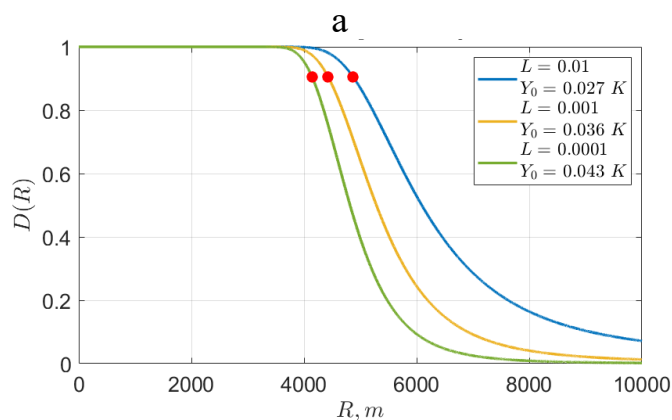


б

Рисунок Б.21 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА площею 10 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 89.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 16 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 4872 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 4429 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 4143 \text{ m}$.



б

Рисунок Б.22 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА площею 20 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для безхмарної атмосфери в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

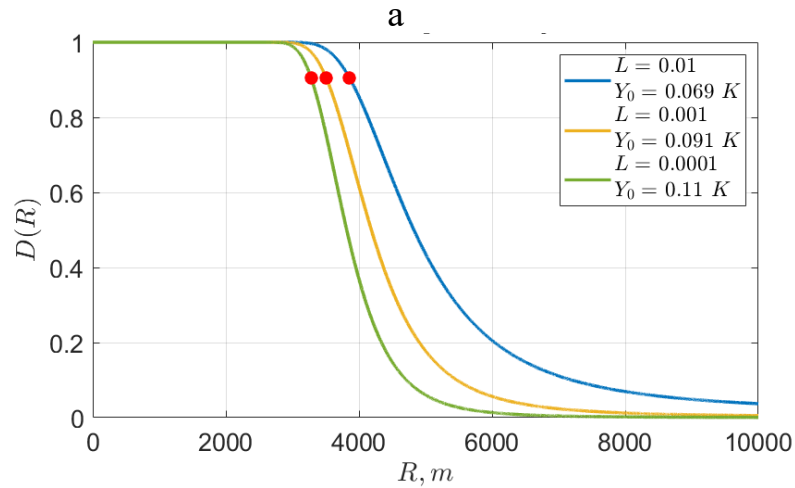
Simulation options :

$\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 102.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 45 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 3859 \text{ m}$.

For $L = 0.001, D = 0.9, R = 3508 \text{ m}$.

For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 3282 \text{ m}$.



б

Рисунок Б.23 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 20 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

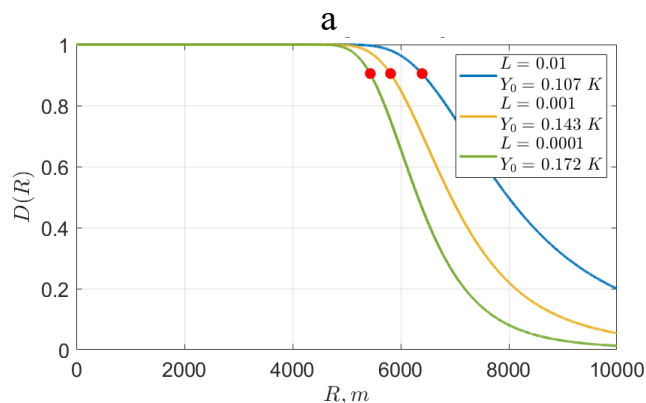
Simulation options :

$\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 140.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 46 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 6390 \text{ m}$.

For $L = 0.001, D = 0.9, R = 5809 \text{ m}$.

For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 5434 \text{ m}$.



б

Рисунок Б.24 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА площею 20 м^2 зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 246.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 99 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 3221 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 2928 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 2739 \text{ m}$.

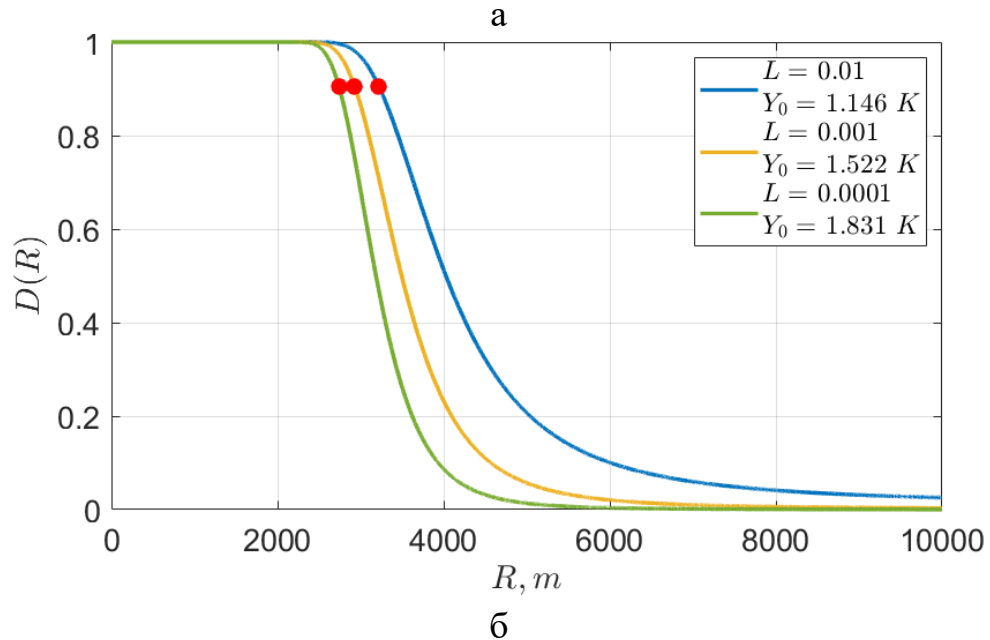


Рисунок Б.25 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА **площею 20 м^2** зі скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° для **безхмарної атмосфери** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від дальності показані на рис. Б.25-Б.28.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від дальності показані на рис. Б.29-Б.32.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від дальності показані на рис. Б.33-Б.36.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від дальності показані на рис. Б.37-Б.40.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від дальності показані на рис. Б.41-Б.44.

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 95.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 22 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 752 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 683 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 639 \text{ m}$.

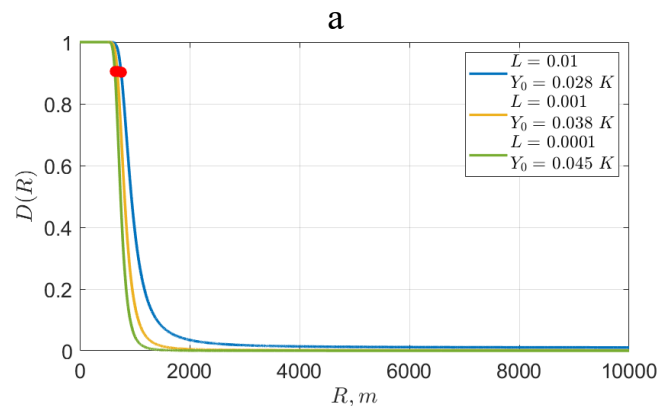


Рисунок Б.25 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ m}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 113.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 56 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 592 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 538 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 504 \text{ m}$.

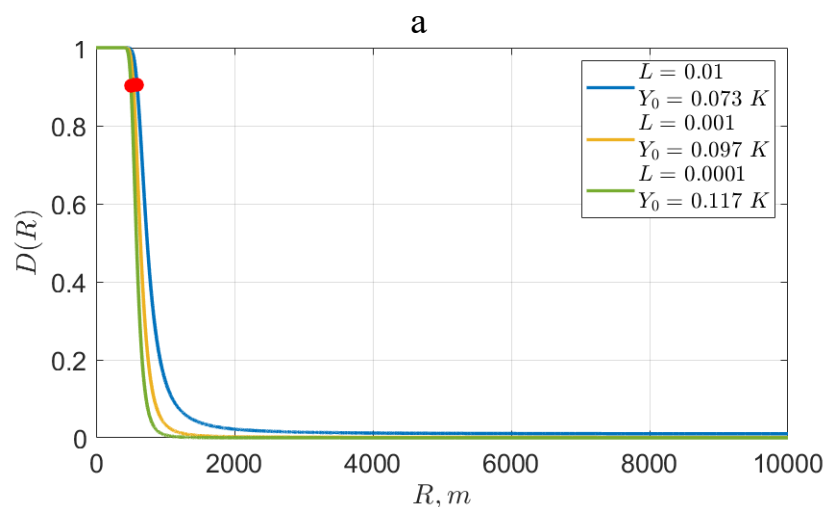


Рисунок Б.26 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ m}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в

залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :

$\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 185.6 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 92 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 971 \text{ m}$.

For $L = 0.001, D = 0.9, R = 883 \text{ m}$.

For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 826 \text{ m}$.

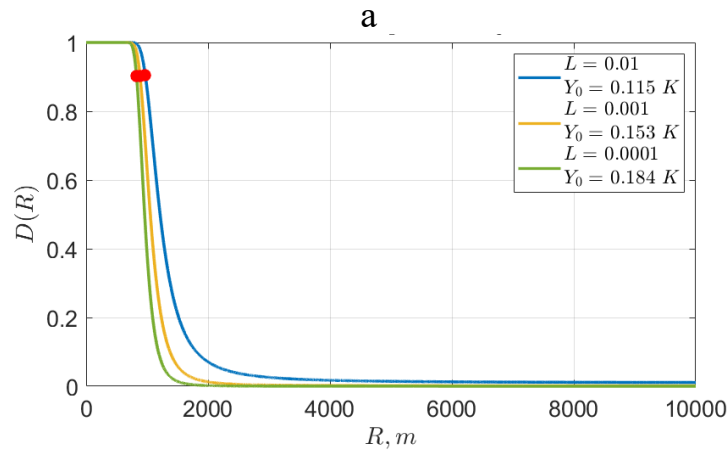


Рисунок Б.27 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :

$\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 233.6 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 196 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 253 \text{ m}$.

For $L = 0.001, D = 0.9, R = 230 \text{ m}$.

For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 216 \text{ m}$.

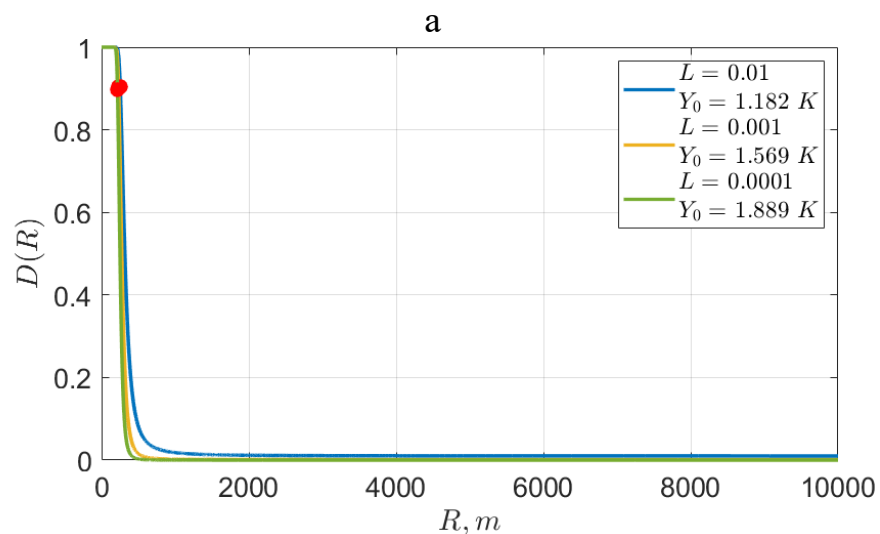


Рисунок Б.28 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в

залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Simulation options :

$\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 95.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 22 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1063 \text{ m}$.

For $L = 0.001, D = 0.9, R = 966 \text{ m}$.

For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 904 \text{ m}$.

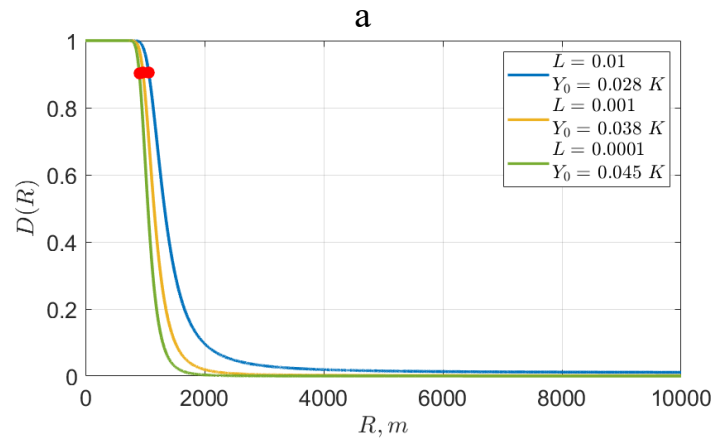


Рисунок Б.29 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :

$\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 113.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 56 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 837 \text{ m}$.

For $L = 0.001, D = 0.9, R = 761 \text{ m}$.

For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 712 \text{ m}$.

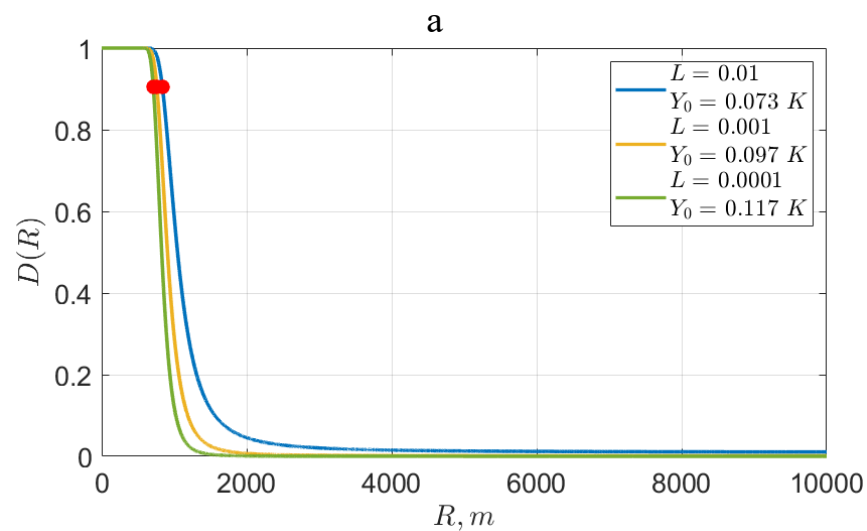


Рисунок Б.30 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в

залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 185.6 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 92 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1373 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 1248 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 1167 \text{ m}$.

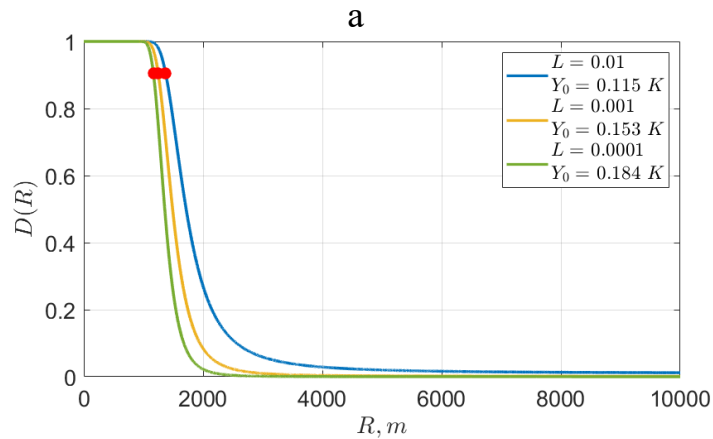


Рисунок Б.31 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 233.6 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 196 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 358 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 326 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 305 \text{ m}$.

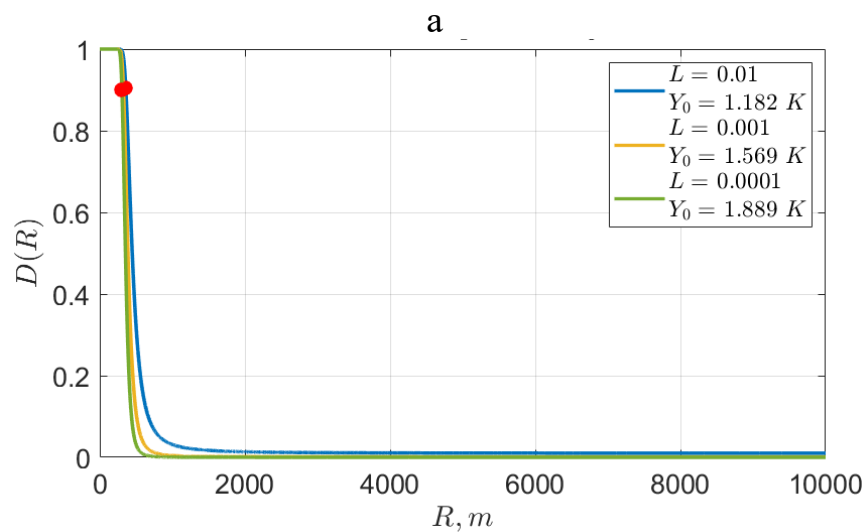


Рисунок Б.32 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в

залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 95.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 22 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 2376 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 2160 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 2020 \text{ m}$.

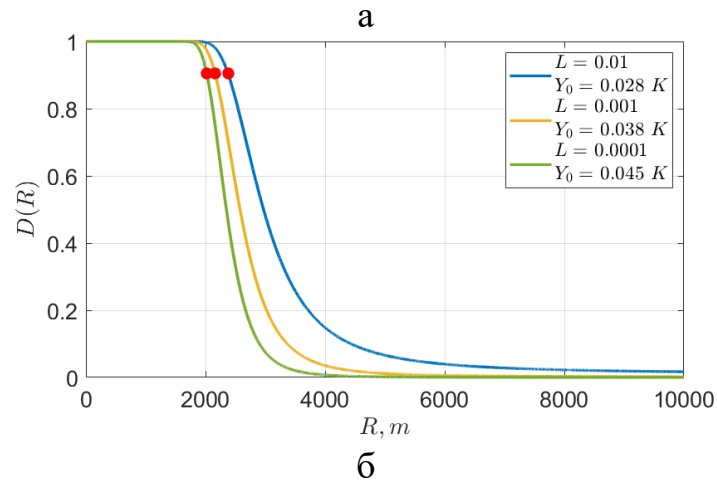


Рисунок Б.33 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі хмар в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 113.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 56 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1872 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 1702 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 1592 \text{ m}$.

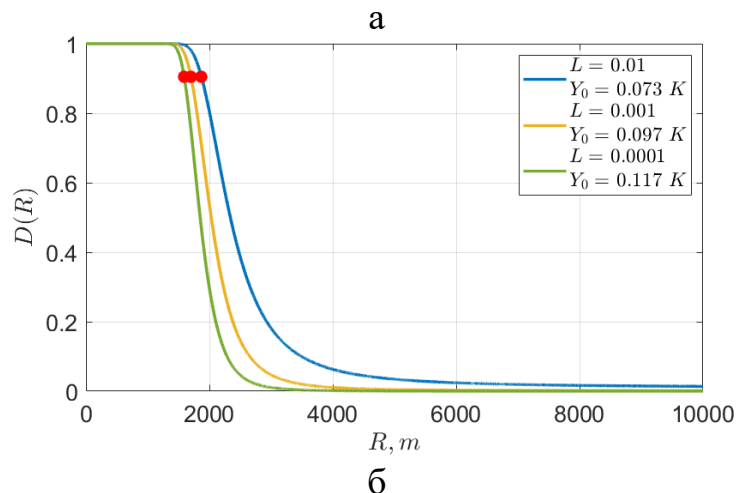


Рисунок Б.34 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі хмар в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

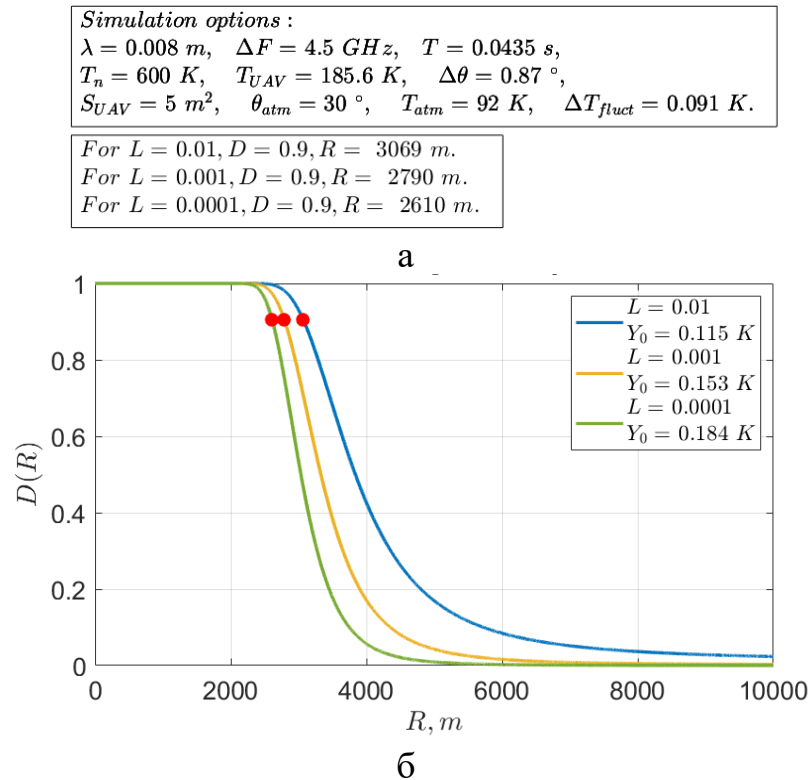


Рисунок Б.35 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 5 м^2 з склволоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

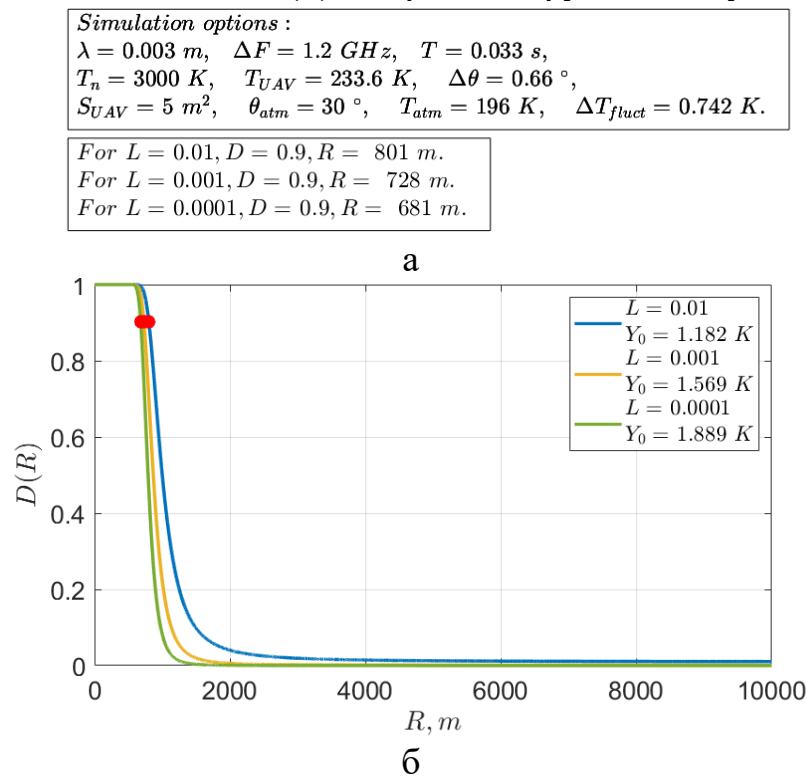


Рисунок Б.36 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 5 м^2 з склволоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

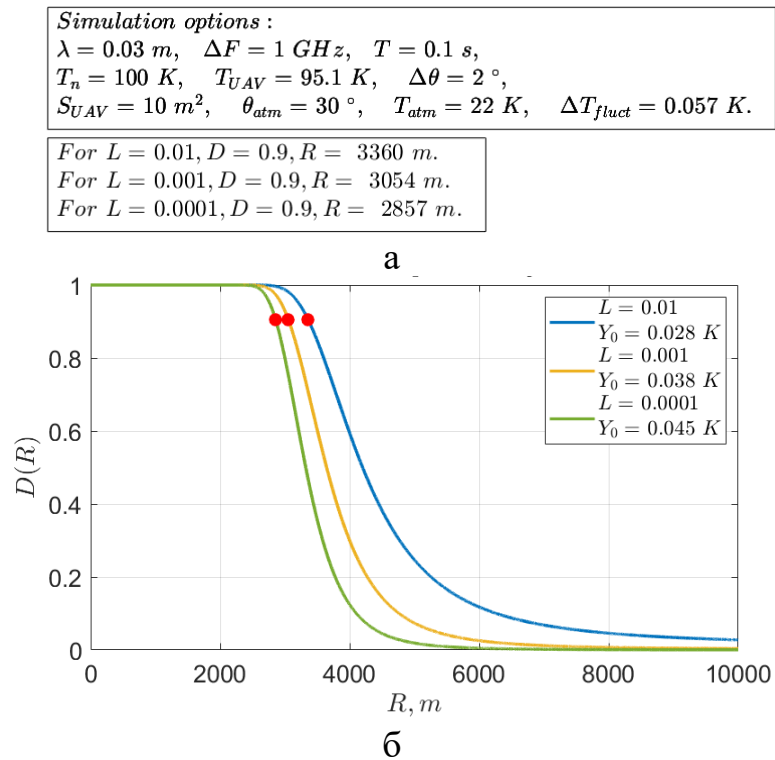


Рисунок Б.37 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі хмар в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

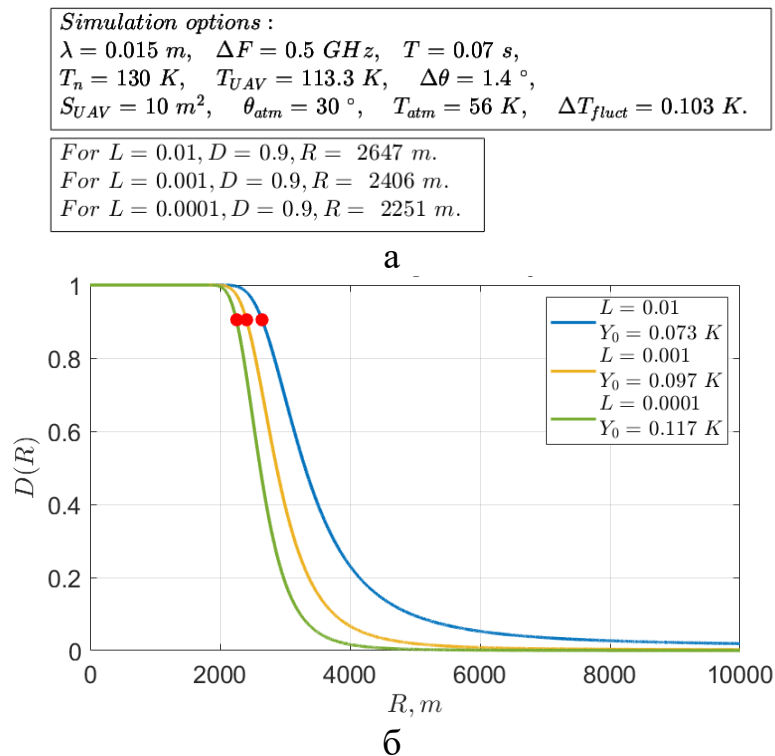


Рисунок Б.38 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі хмар в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

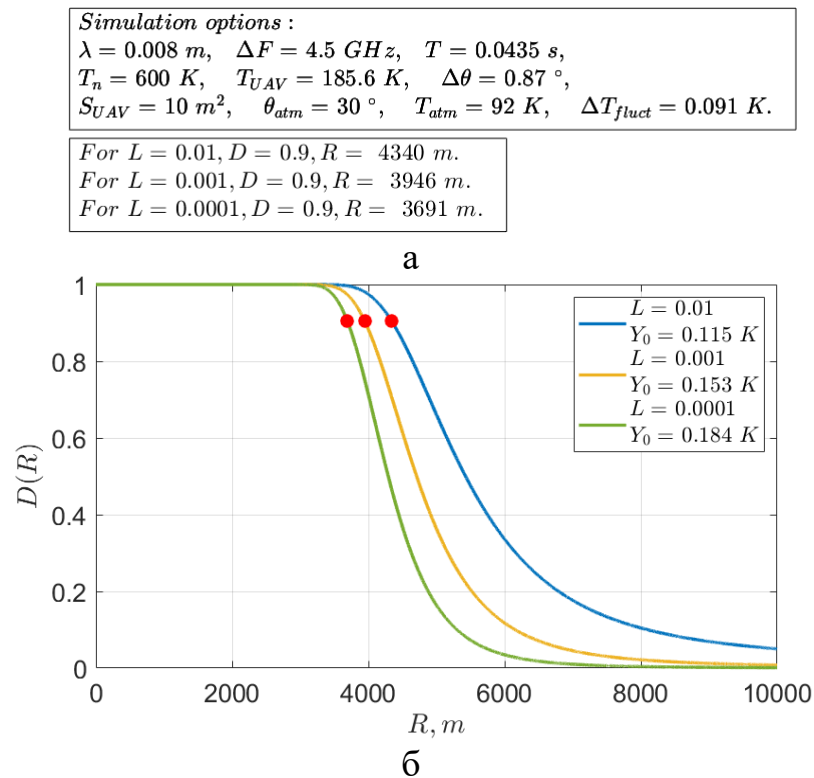


Рисунок Б.39 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

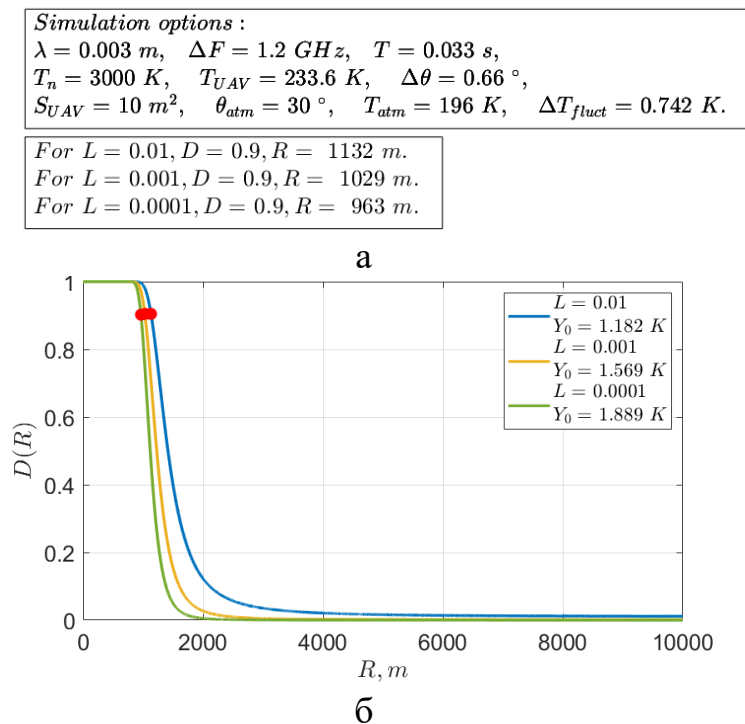


Рисунок Б.40 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 95.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 22 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 4751 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 4319 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 4040 \text{ m}$.

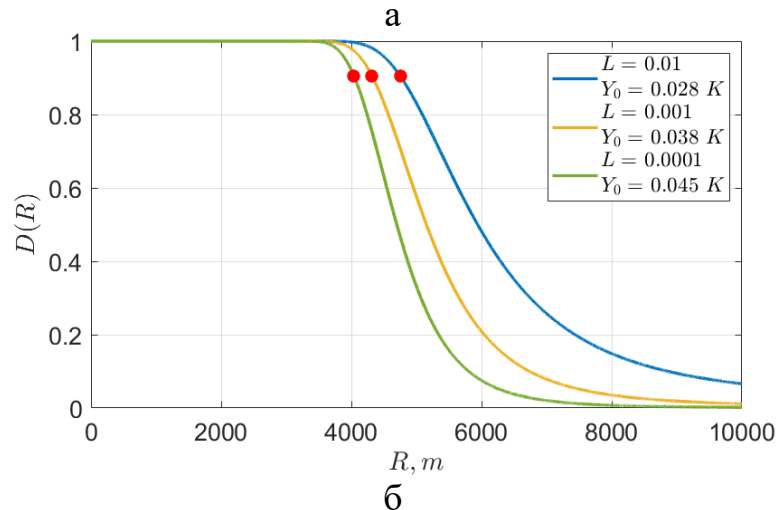


Рисунок Б.41 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі хмар в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 113.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 56 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 3743 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 3403 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 3183 \text{ m}$.

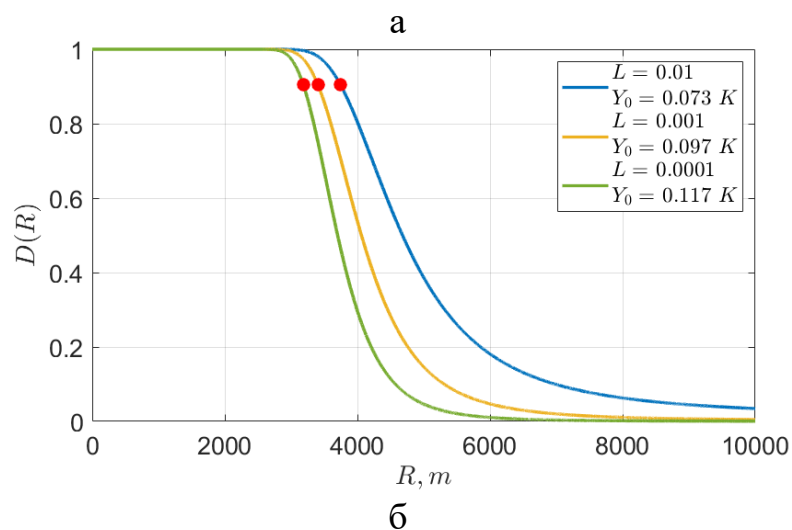


Рисунок Б.42 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі хмар в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

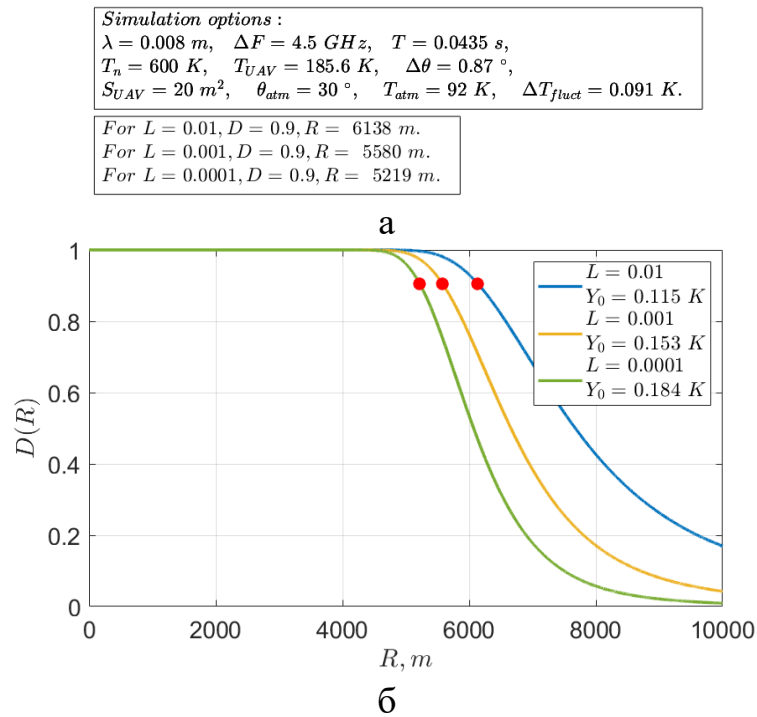


Рисунок Б.43 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

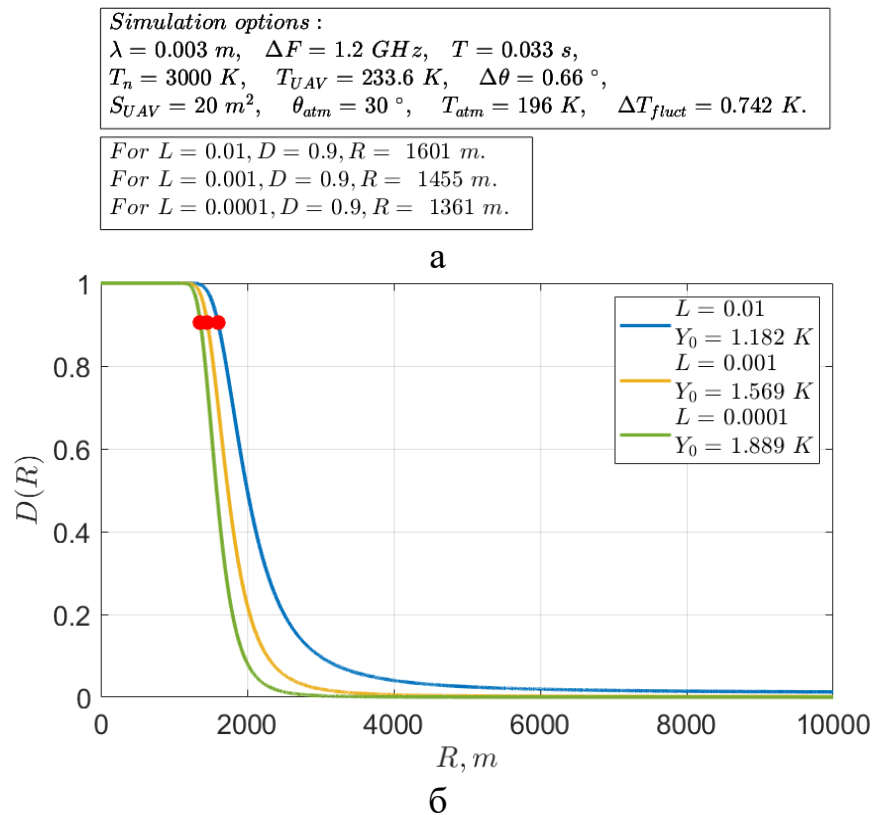


Рисунок Б.44 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° на тлі **хмар** в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від дальності показані на рис. Б.45-Б.47.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА розміром 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від дальності показані на рис. Б.48-Б.50.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від дальності показані на рис. Б.51-Б.53.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від дальності показані на рис. Б.54-Б.56.

Ймовірність $D_{\text{виявл}}(R)$ БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від дальності показані на рис. Б.57-Б.59.

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 133 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 0.5 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 60 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01$, $D = 0.9$, $R = 656 \text{ m}$.
 For $L = 0.001$, $D = 0.9$, $R = 596 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001$, $D = 0.9$, $R = 558 \text{ m}$.

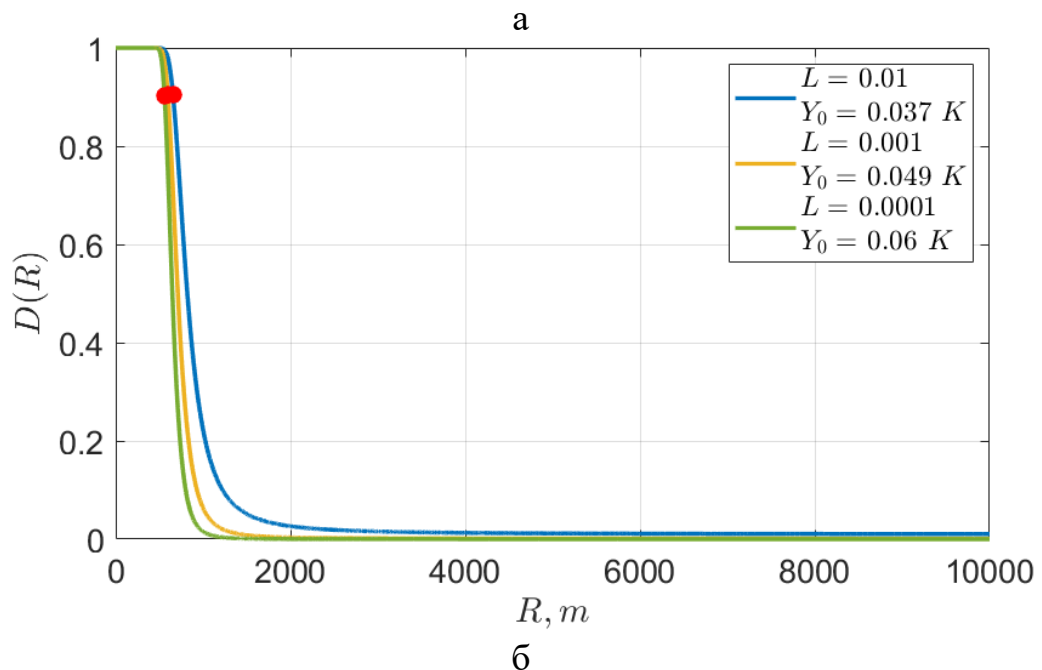


Рисунок Б.45 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

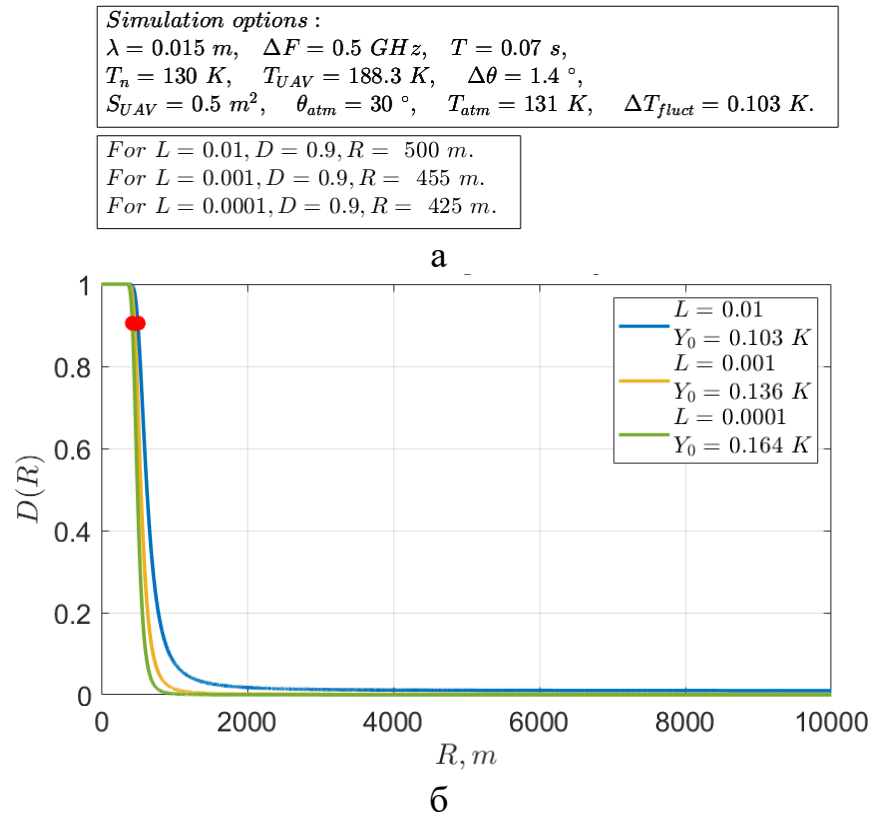


Рисунок Б.46 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

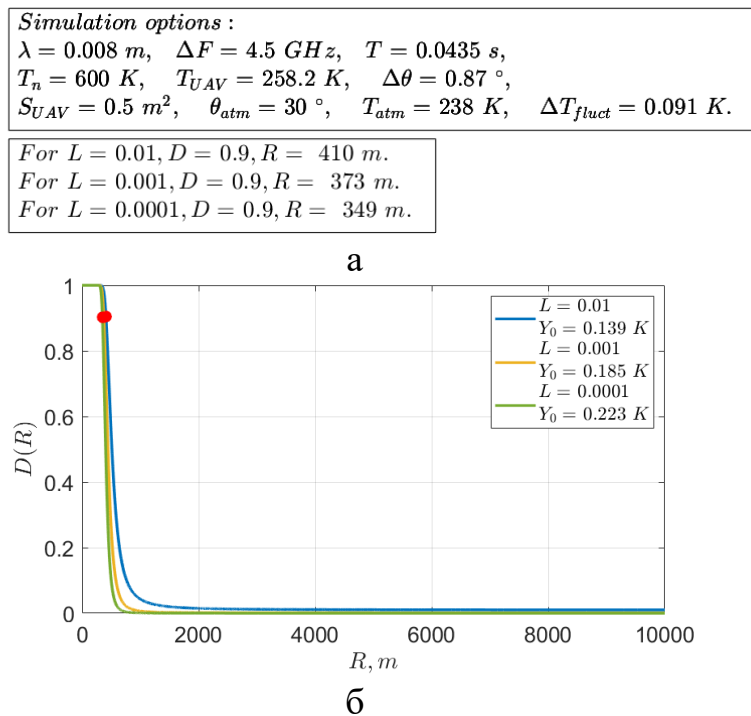


Рисунок Б.47 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею $0,5 \text{ м}^2$ з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

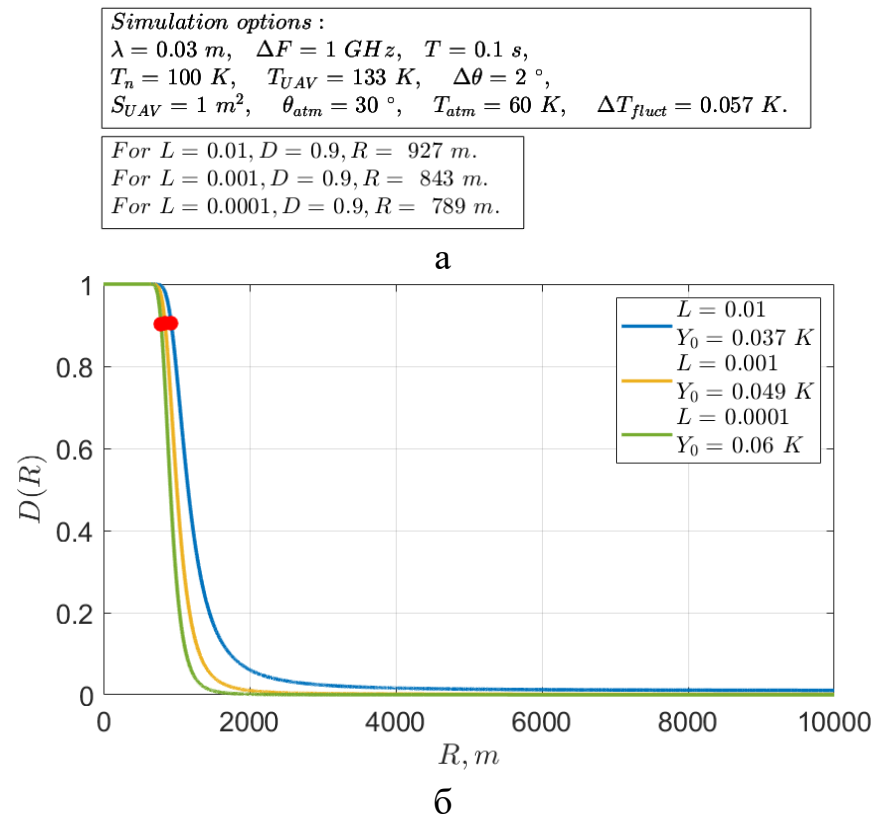


Рисунок Б.48 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

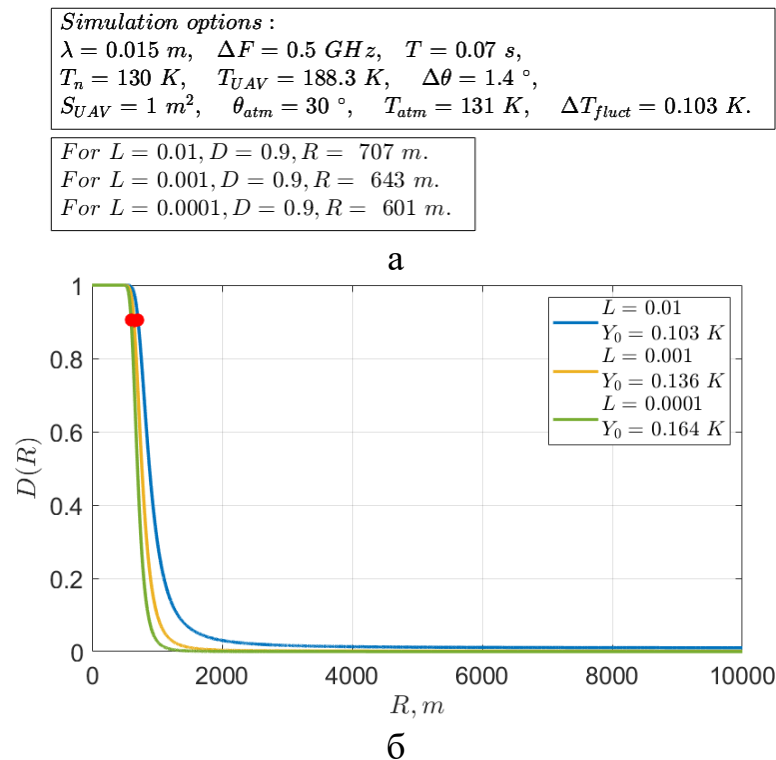


Рисунок Б.49 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

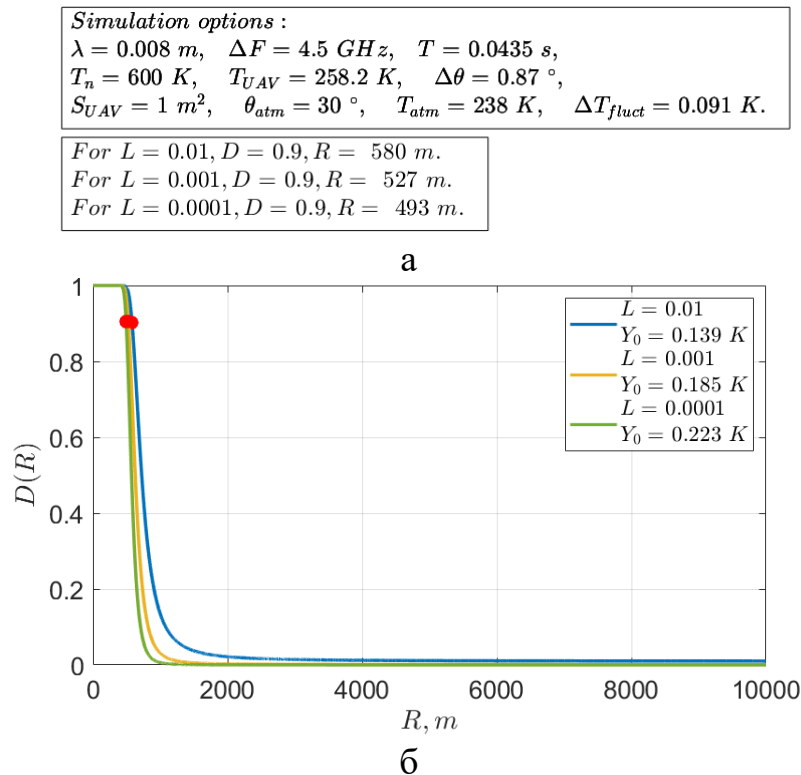


Рисунок Б.50 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

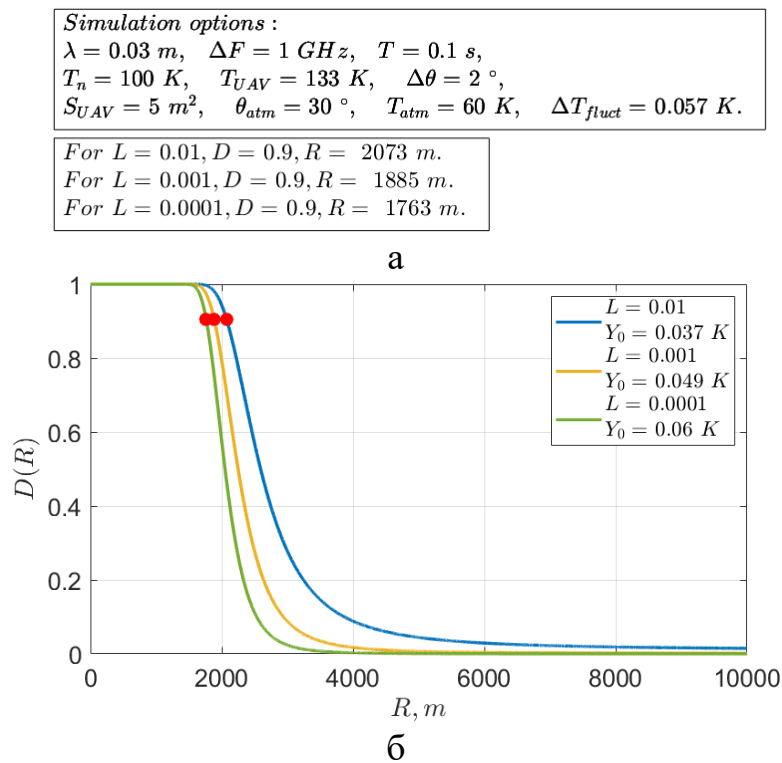


Рисунок Б.51 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БпЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

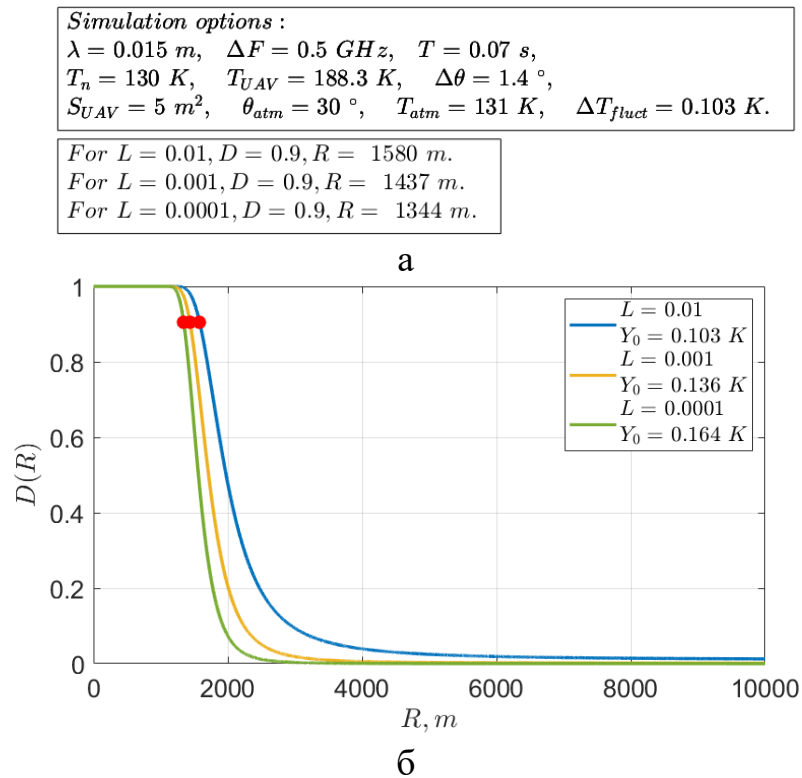


Рисунок Б.52 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

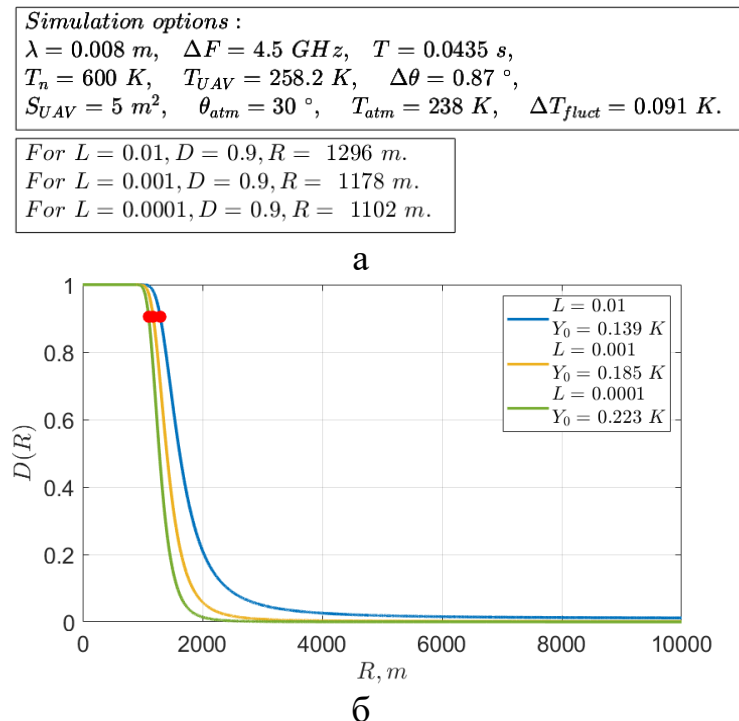


Рисунок Б.53 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 5 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

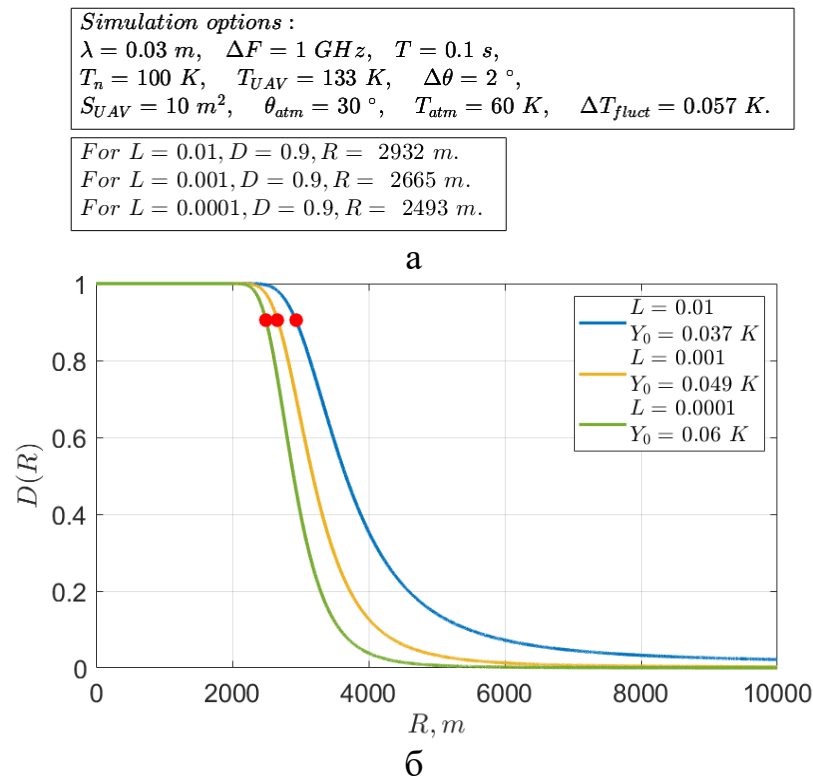


Рисунок Б.54 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

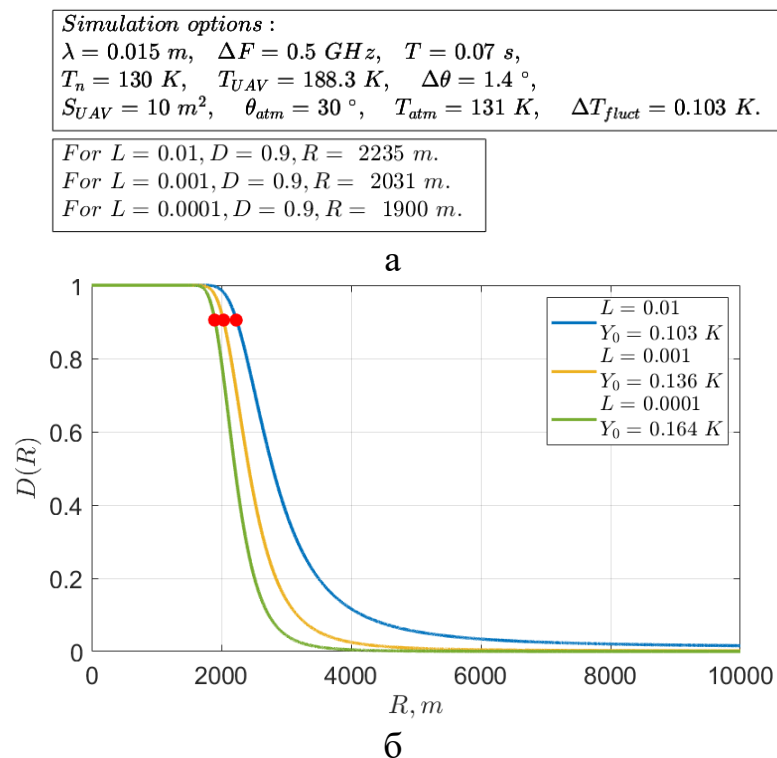


Рисунок Б.55 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 258.2 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 10 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 238 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 1833 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 1666 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 1558 \text{ m}$.

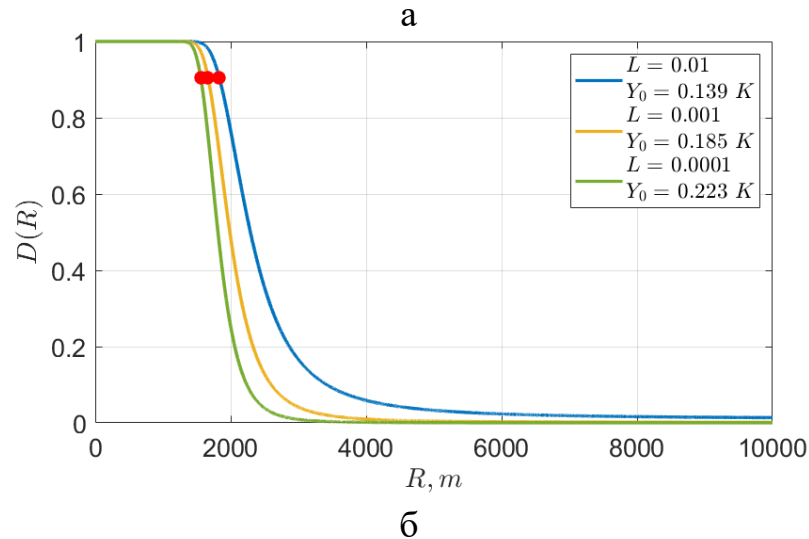


Рисунок Б.56 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 10 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$,
 $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 133 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$,
 $S_{UAV} = 20 \text{ m}^2$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 60 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, R = 4146 \text{ m}$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, R = 3769 \text{ m}$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, R = 3525 \text{ m}$.

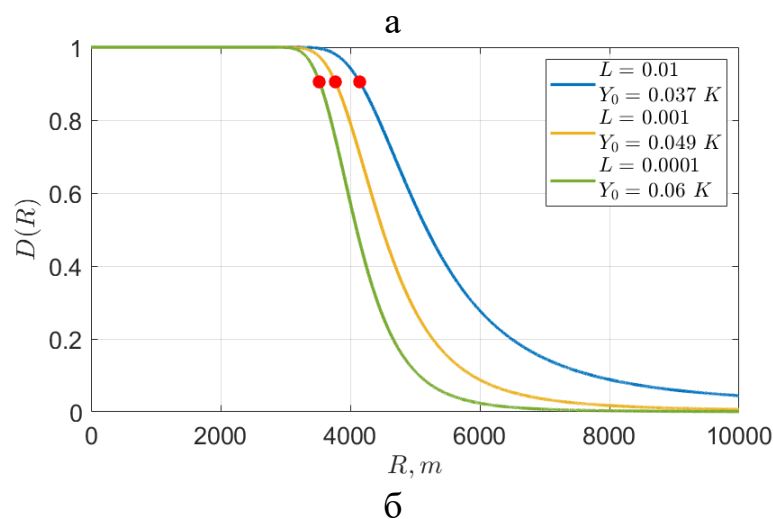


Рисунок Б.57 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 10-12 ГГц

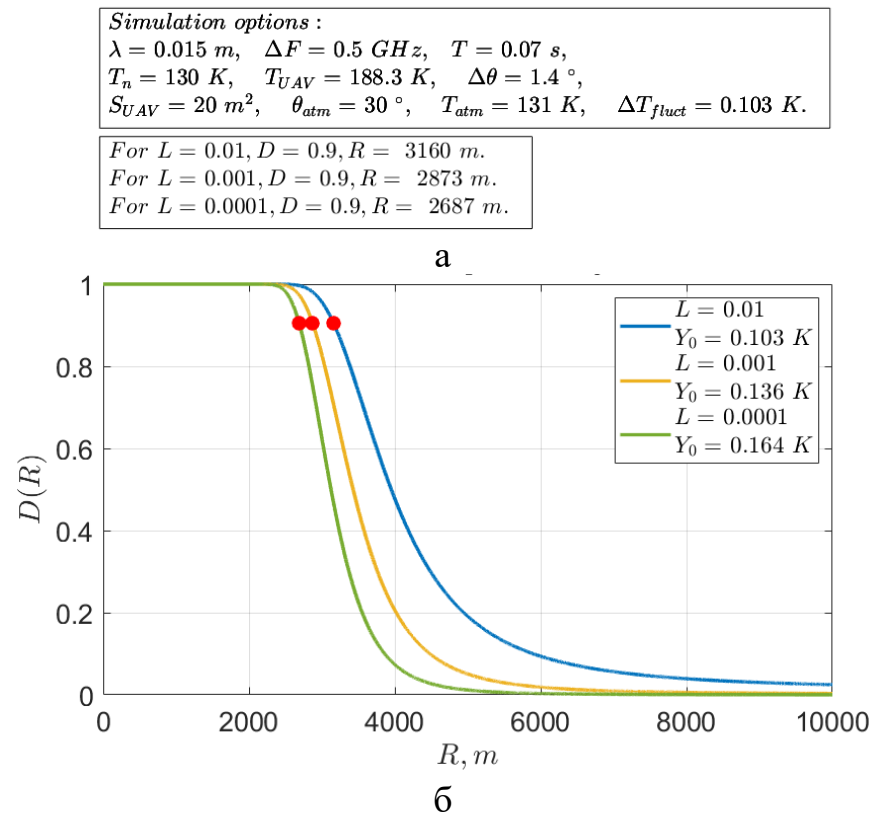


Рисунок Б.58 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 20-22 ГГц

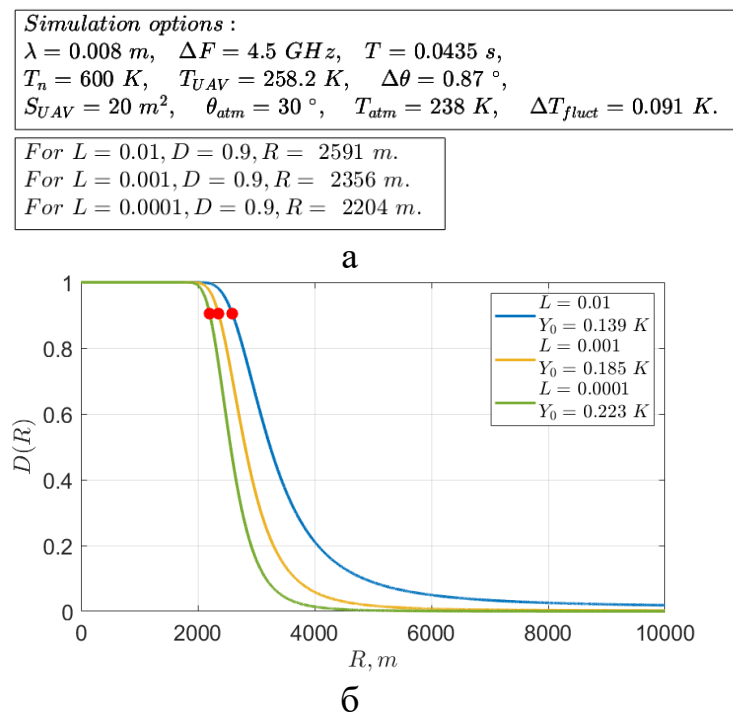


Рисунок Б.59 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності правильного виявлення D БПЛА з площею 20 м^2 з скловолоконного матеріалу під кутом спостереження 30° в дощ в залежності від відстані R (б) для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Для радіометричного приймача, що приймає РТВ у діапазоні 94-96 ГГц графіки $D_{виявл}(R)$ БПЛА не показано. Це пов'язано з тим, що у цьому діапазоні частот майже відсутній приріст яскравісної температури БПЛА $\Delta T_{БнЛА}^{\circ}$ над температурою атмосфери T_{atm}° . Це можна побачити на графіках залежності $\Delta T_{БнЛА}^{\circ}$ і T_{atm}° від кутів візування, що показані на рис. Б.60 у різних масштабах.

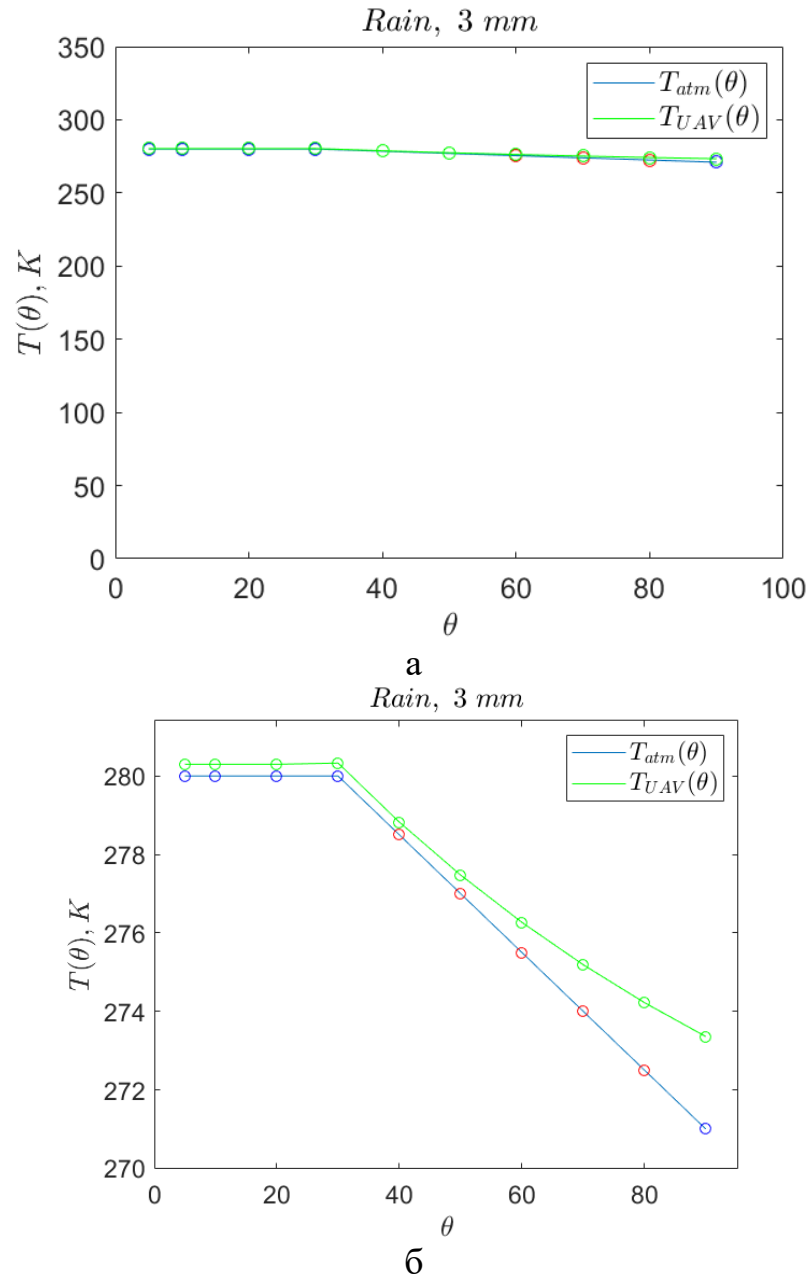


Рисунок Б.60 – Залежності $\Delta T_{БнЛА}^{\circ}$ і T_{atm}° від кутів візування: а – діапазон температур починається від 0 К, б – діапазон температур починається від 270 К

З аналізу наведених залежностей на рис. Б.60 слідує, що виявити БПЛА у цьому діапазоні частот під час дощу можливо лише, коли БПЛА повністю

заповнить діаграму спрямованості.

Б.3.2. Розрахунок $D_{виявл}(\theta)$ від кута спостереження за БПЛА.
Ймовірність $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **безхмарної атмосфери** в залежності від кута спостереження показані на рис. Б.61-Б.64.

Ймовірність $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від кута спостереження показані на рис. Б.65-Б.68. Для діапазону 94-96 ГГц розрахунки виконані на відстані $R = 400 \text{ м}$ через низький приріст $\Delta T_{БПЛА}^{\circ}$.

Ймовірність $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ **в дощ** в залежності від кута візування показані на рис. Б.69-Б.72. Для діапазону 94-96 ГГц розрахунки виконані на відстані $R = 100 \text{ м}$.

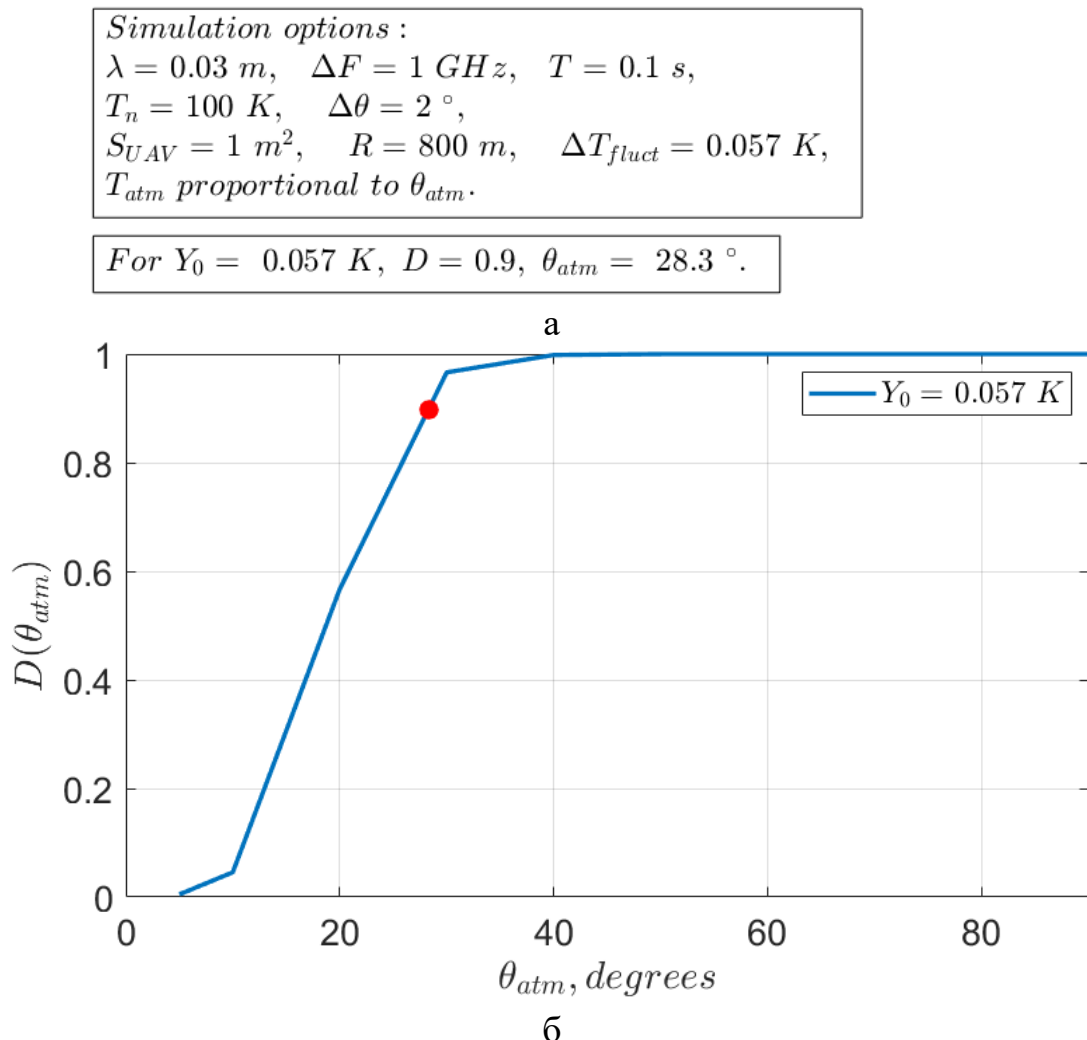


Рисунок Б.61 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $R = 800 \text{ m}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$,
 T_{atm} proportional to θ_{atm} .

For $Y_0 = 0.103 \text{ K}$, $D = 0.9$, $\theta_{atm} = 39^\circ$.

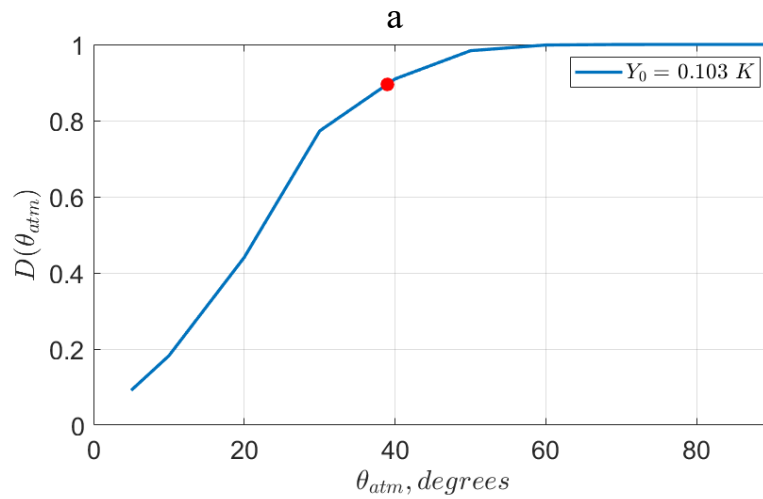


Рисунок Б.62 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $R = 800 \text{ m}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$,
 T_{atm} proportional to θ_{atm} .

For $Y_0 = 0.091 \text{ K}$, $D = 0.9$, $\theta_{atm} = 9.2^\circ$.

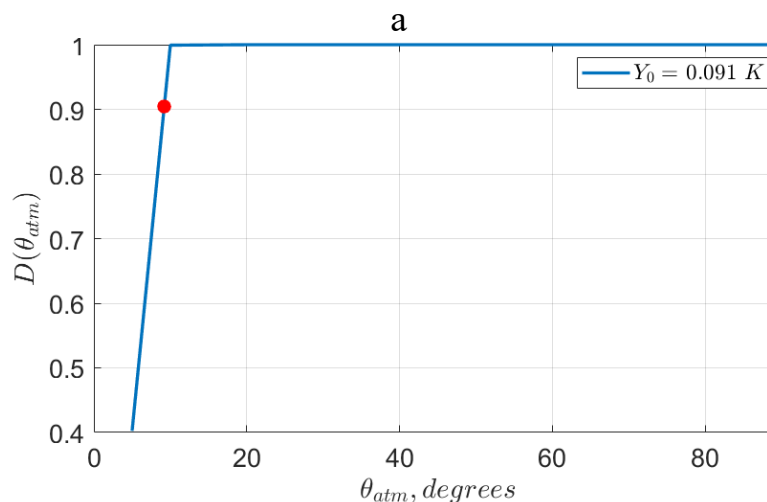


Рисунок Б.63 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 35-36 ГГц

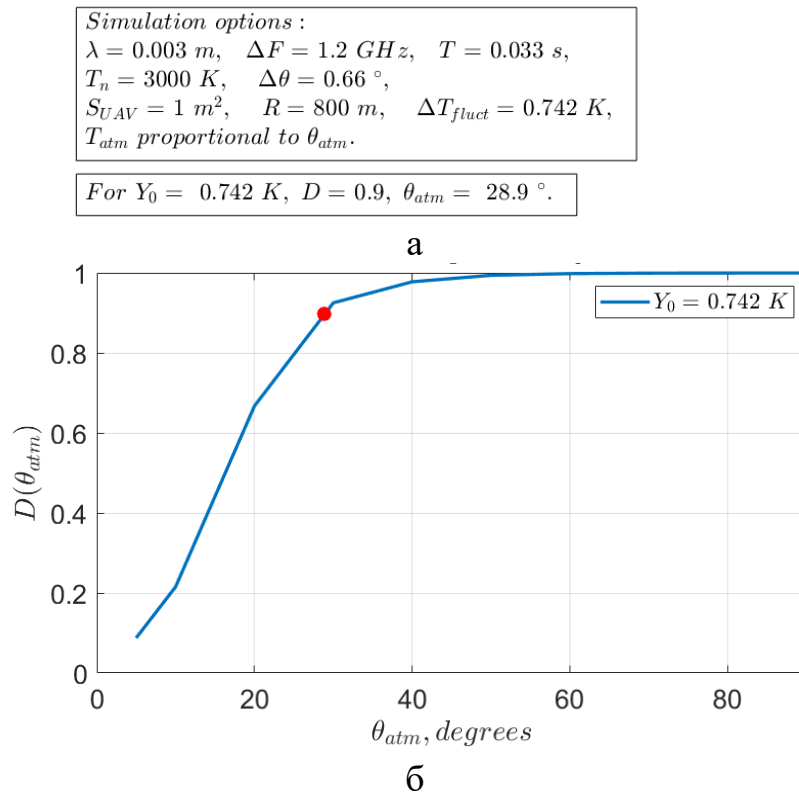


Рисунок Б.64 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 94-96 ГГц

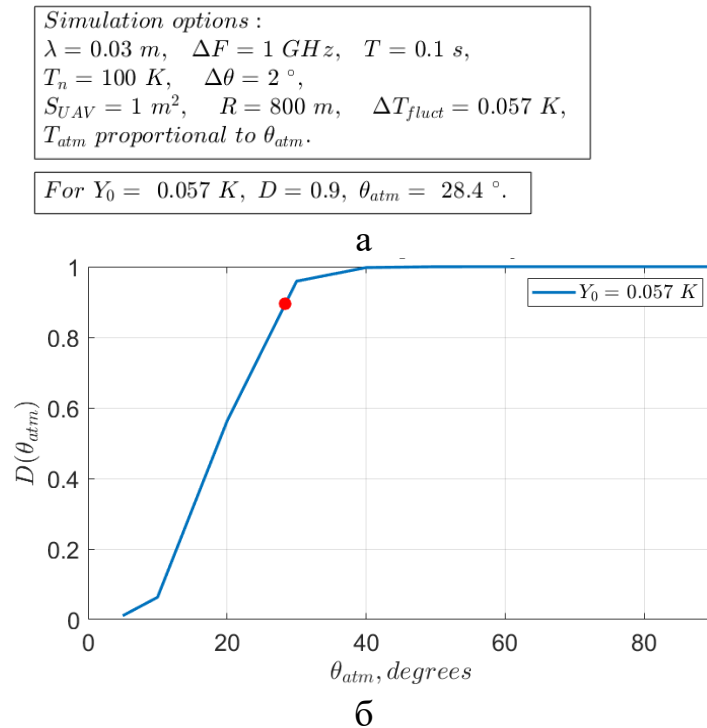


Рисунок Б.65 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $R = 800 \text{ m}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$,
 T_{atm} proportional to θ_{atm} .

For $Y_0 = 0.103 \text{ K}$, $D = 0.9$, $\theta_{atm} = 40.6^\circ$.

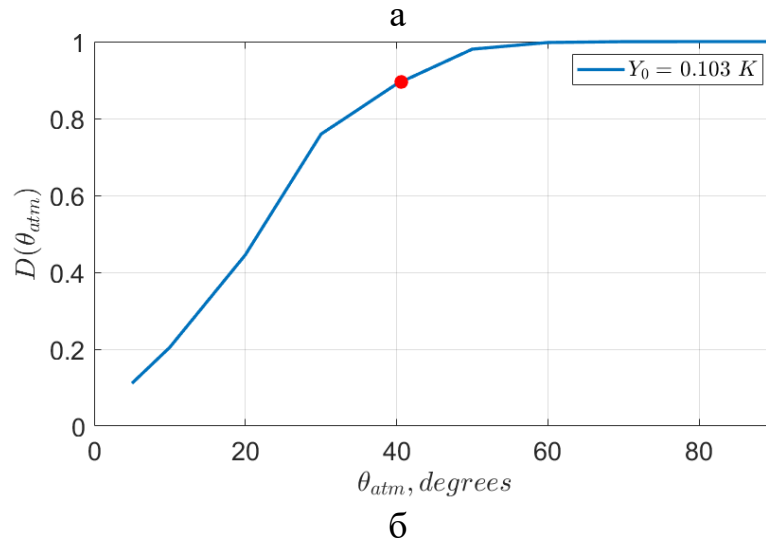


Рисунок Б.66 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $R = 800 \text{ m}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$,
 T_{atm} proportional to θ_{atm} .

For $Y_0 = 0.091 \text{ K}$, $D = 0.9$, $\theta_{atm} = 10.2^\circ$.

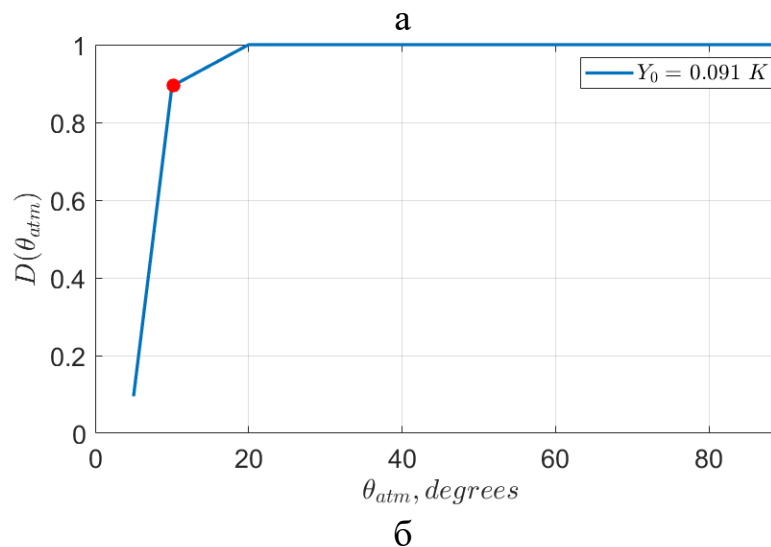


Рисунок Б.67 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 35-36 ГГц

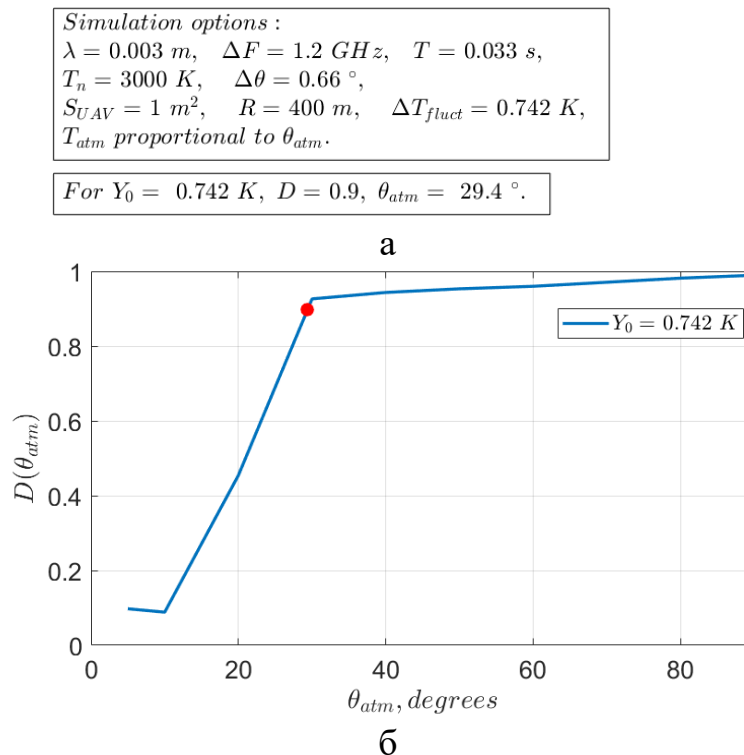


Рисунок Б.68 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 94-96 ГГц

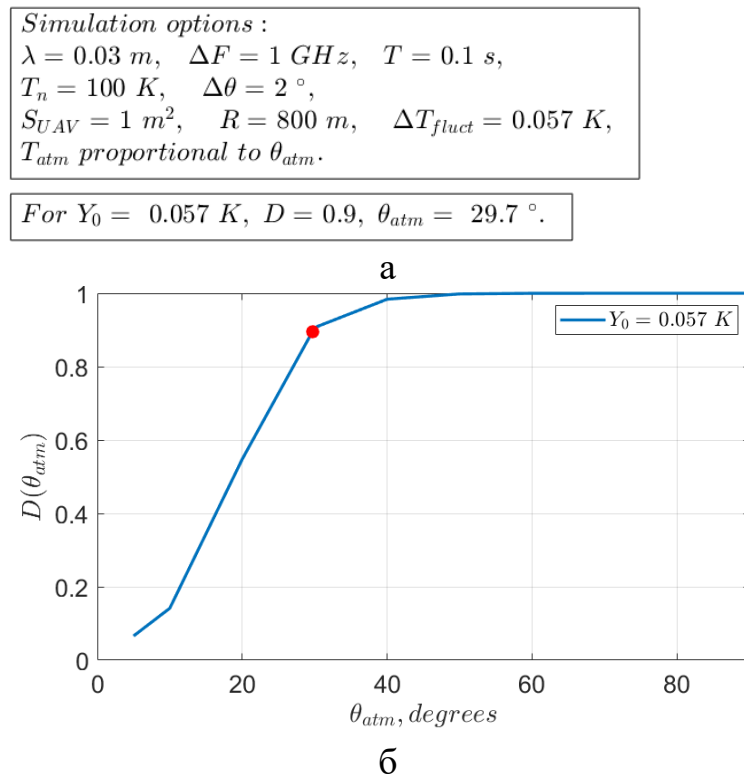


Рисунок Б.69 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ в дощ в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 10-12 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$,
 $T_n = 130 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $R = 800 \text{ m}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$,
 T_{atm} proportional to θ_{atm} .

For $Y_0 = 0.103 \text{ K}$, $D = 0.9$, $\theta_{atm} = 46.9^\circ$.

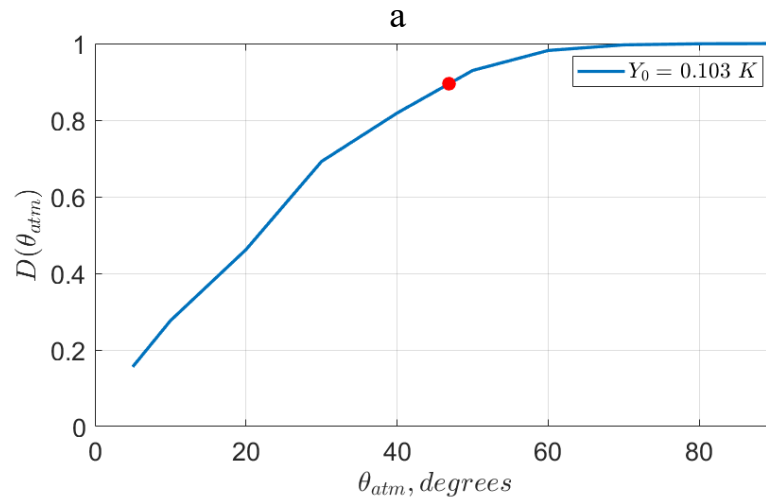


Рисунок Б.70 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ в дощ в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2$, $R = 800 \text{ m}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$,
 T_{atm} proportional to θ_{atm} .

For $Y_0 = 0.091 \text{ K}$, $D = 0.9$, $\theta_{atm} = 78^\circ$.

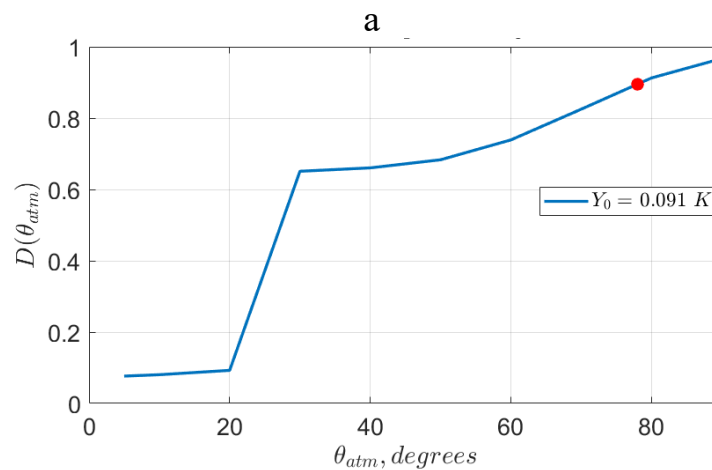


Рисунок Б.71 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 800 \text{ м}$ в дощ в залежності від кута спостереження θ_{atm} для

радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :

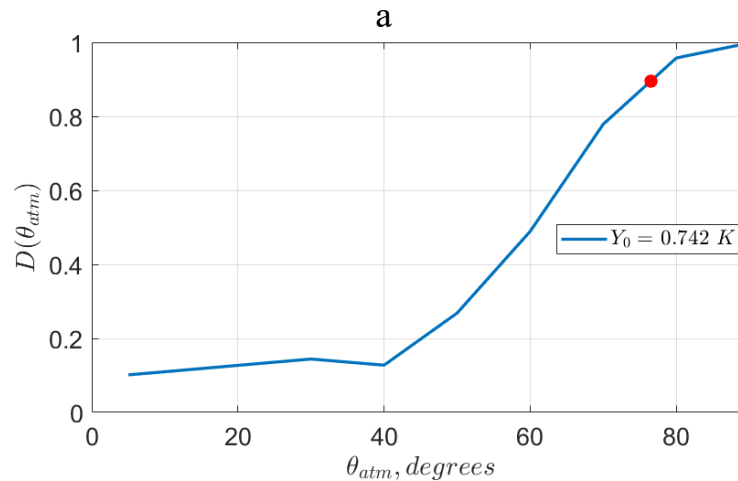
 $\lambda = 0.003 \text{ m}, \quad \Delta F = 1.2 \text{ GHz}, \quad T = 0.033 \text{ s},$
 $T_n = 3000 \text{ K}, \quad \Delta\theta = 0.66^\circ,$
 $S_{UAV} = 1 \text{ m}^2, \quad R = 100 \text{ m}, \quad \Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K},$
 $T_{atm} \text{ proportional to } \theta_{atm}.$
For $Y_0 = 0.742 \text{ K}, D = 0.9, \theta_{atm} = 76.5^\circ.$ 

Рисунок Б.72 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(\theta)$ БПЛА з площею 1 м^2 з скловолоконного матеріалу для $R = 100 \text{ м}$ в дощ в залежності від кута спостереження θ_{atm} для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Б.3.3. Розрахунок $D_{виявл}(S)$ від площі БПЛА. Ймовірність $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від площі показані на рис. Б.73-Б.76.

Ймовірність $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від площі показані на рис. Б.77-Б.80.

Ймовірність $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ в **дощ** в залежності від площі показані на рис. Б.81-Б.84.

| |
|--|
| <p><i>Simulation options :</i> $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\Delta F = 1 \text{ GHz}$, $T = 0.1 \text{ s}$, $T_n = 100 \text{ K}$, $T_{UAV} = 89.1 \text{ K}$, $\Delta\theta = 2^\circ$, $R = 1500 \text{ m}$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 16 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.057 \text{ K}$.</p> |
| <p>For $L = 0.01, D = 0.9, S_{UAV} = 1.87 \text{ m}^2$. For $L = 0.001, D = 0.9, S_{UAV} = 2.27 \text{ m}^2$. For $L = 0.0001, D = 0.9, S_{UAV} = 2.6 \text{ m}^2$.</p> |

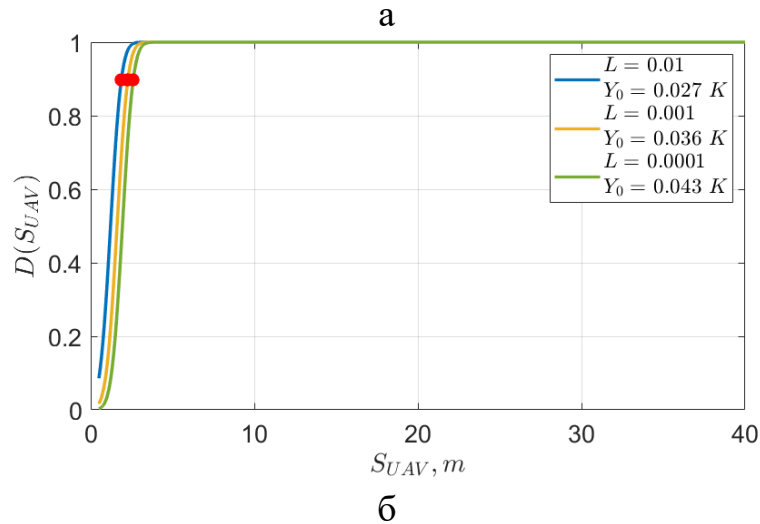


Рисунок Б.73 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 10-12 ГГц

| |
|---|
| <p><i>Simulation options :</i> $\lambda = 0.015 \text{ m}$, $\Delta F = 0.5 \text{ GHz}$, $T = 0.07 \text{ s}$, $T_n = 130 \text{ K}$, $T_{UAV} = 102.3 \text{ K}$, $\Delta\theta = 1.4^\circ$, $R = 1500 \text{ m}$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 45 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.103 \text{ K}$.</p> |
| <p>For $L = 0.01, D = 0.9, S_{UAV} = 2.98 \text{ m}^2$. For $L = 0.001, D = 0.9, S_{UAV} = 3.62 \text{ m}^2$. For $L = 0.0001, D = 0.9, S_{UAV} = 4.14 \text{ m}^2$.</p> |

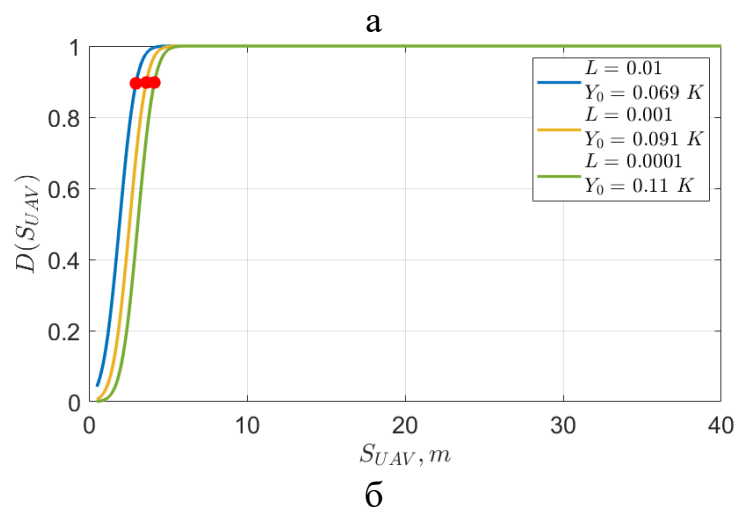


Рисунок Б.74 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 20-22 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.008 \text{ m}$, $\Delta F = 4.5 \text{ GHz}$, $T = 0.0435 \text{ s}$,
 $T_n = 600 \text{ K}$, $T_{UAV} = 140.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.87^\circ$,
 $R = 1500 \text{ m}$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 46 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.091 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, S_{UAV} = 1.09 \text{ m}^2$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, S_{UAV} = 1.32 \text{ m}^2$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, S_{UAV} = 1.51 \text{ m}^2$.

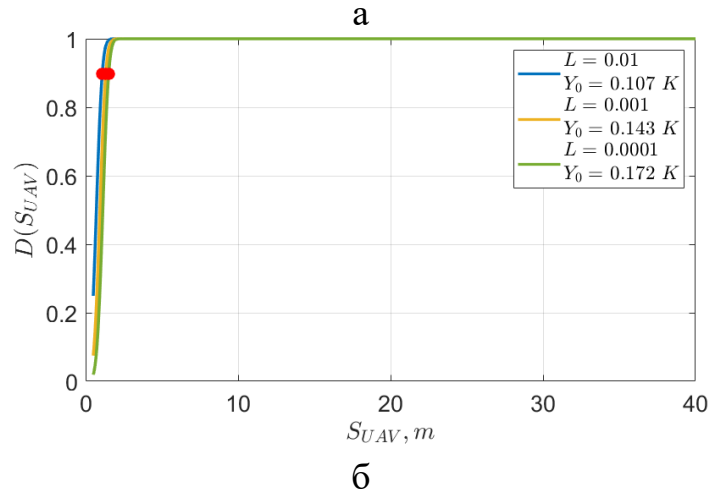


Рисунок Б.75 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 35-36 ГГц

Simulation options :
 $\lambda = 0.003 \text{ m}$, $\Delta F = 1.2 \text{ GHz}$, $T = 0.033 \text{ s}$,
 $T_n = 3000 \text{ K}$, $T_{UAV} = 246.7 \text{ K}$, $\Delta\theta = 0.66^\circ$,
 $R = 1500 \text{ m}$, $\theta_{atm} = 30^\circ$, $T_{atm} = 99 \text{ K}$, $\Delta T_{fluct} = 0.742 \text{ K}$.

For $L = 0.01, D = 0.9, S_{UAV} = 4.28 \text{ m}^2$.
 For $L = 0.001, D = 0.9, S_{UAV} = 5.19 \text{ m}^2$.
 For $L = 0.0001, D = 0.9, S_{UAV} = 5.94 \text{ m}^2$.

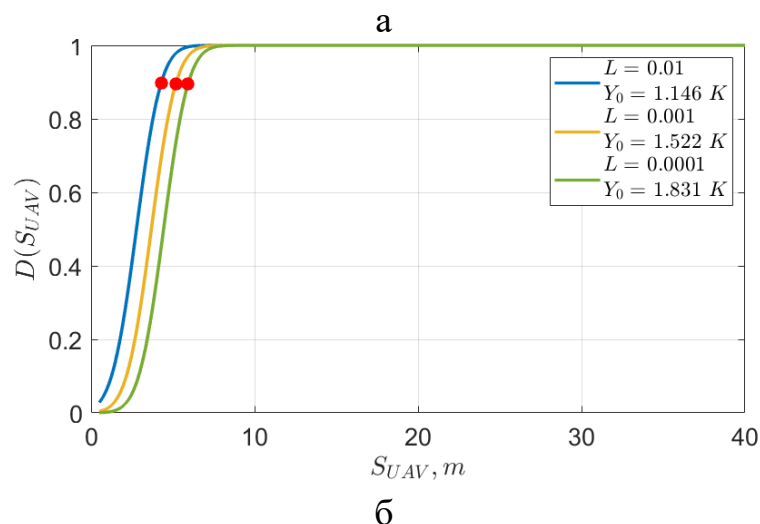


Рисунок Б.76 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **атмосфери без хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 94-96 ГГц

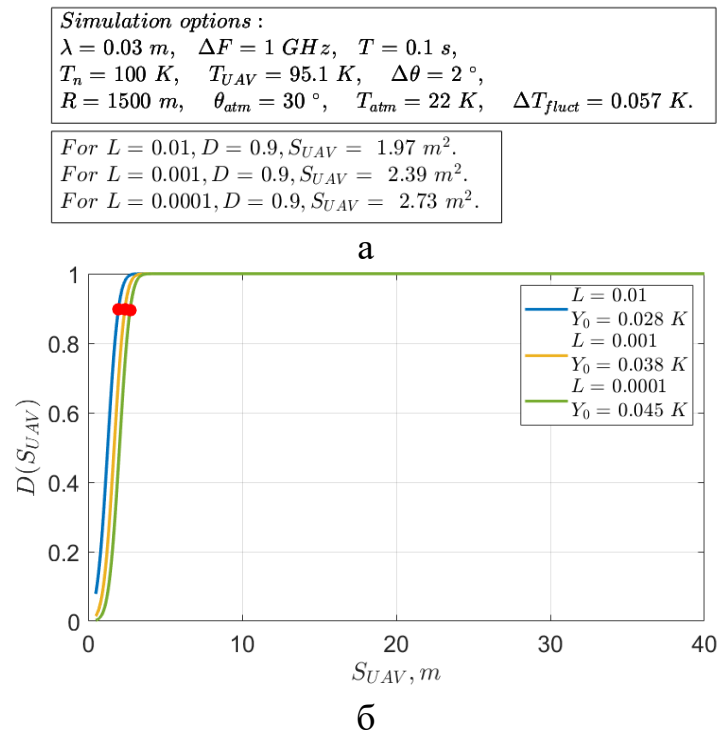


Рисунок Б.77 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 10-12 ГГц

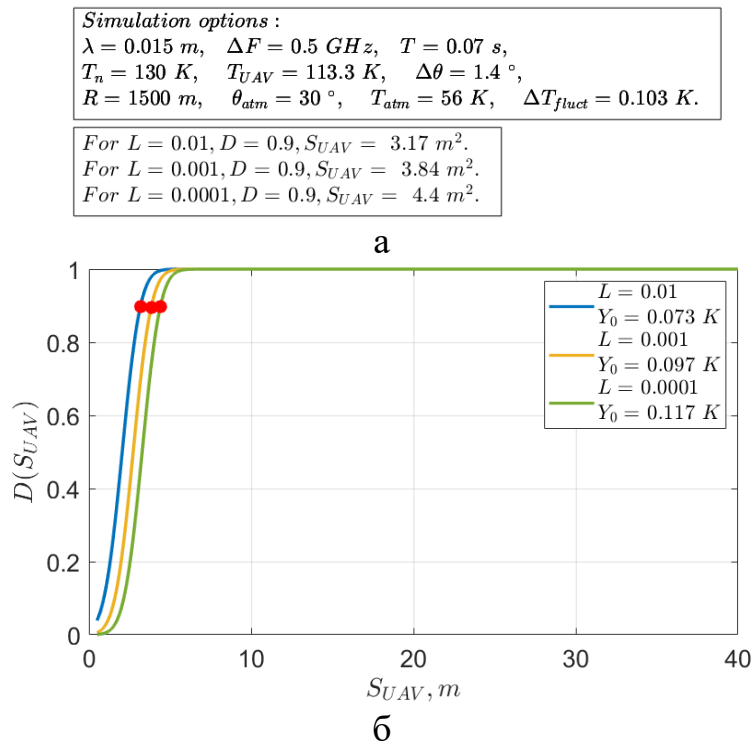


Рисунок Б.78 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 20-22 ГГц

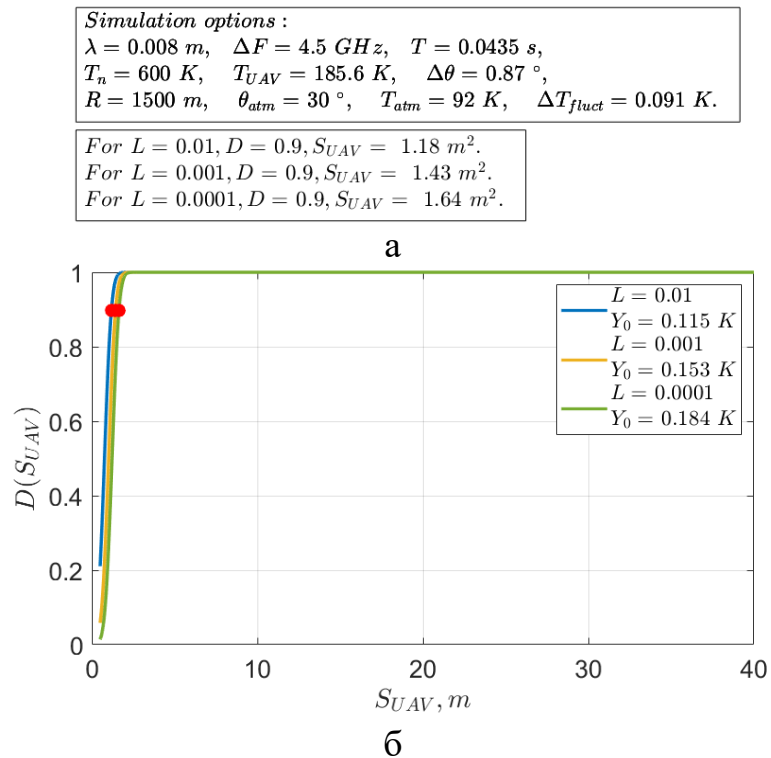


Рисунок Б.79 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 35-36 ГГц

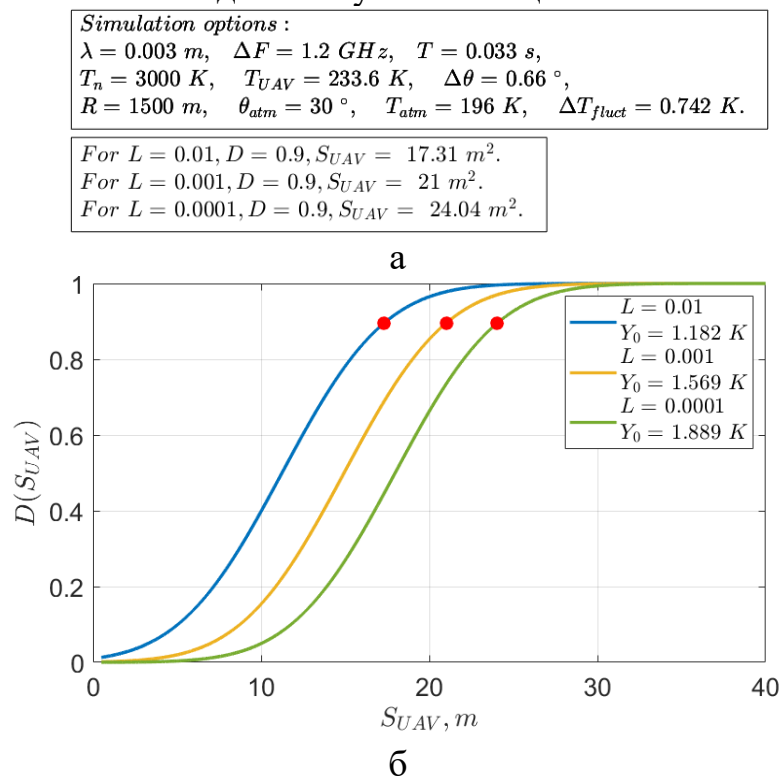


Рисунок Б.80 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ на тлі **хмар** в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 94-96 ГГц

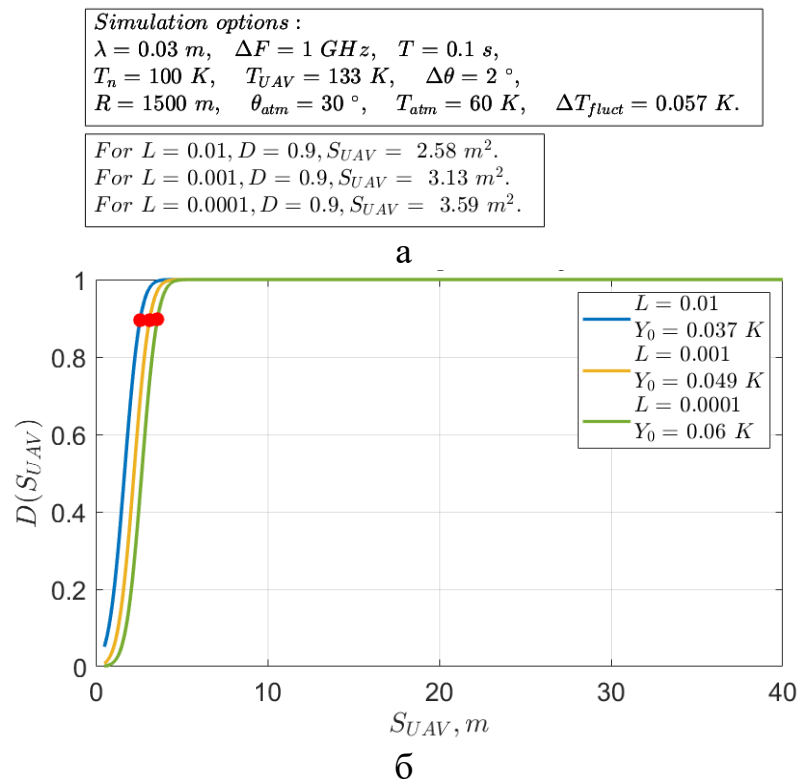


Рисунок Б.81 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ в дощ в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 10-12 ГГц

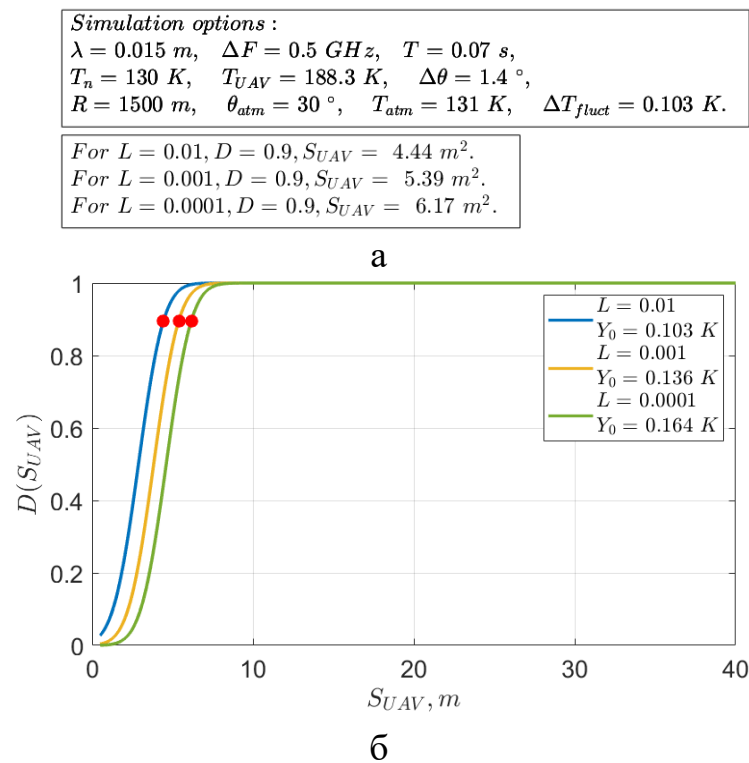


Рисунок Б.82 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ в дощ в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 20-22 ГГц

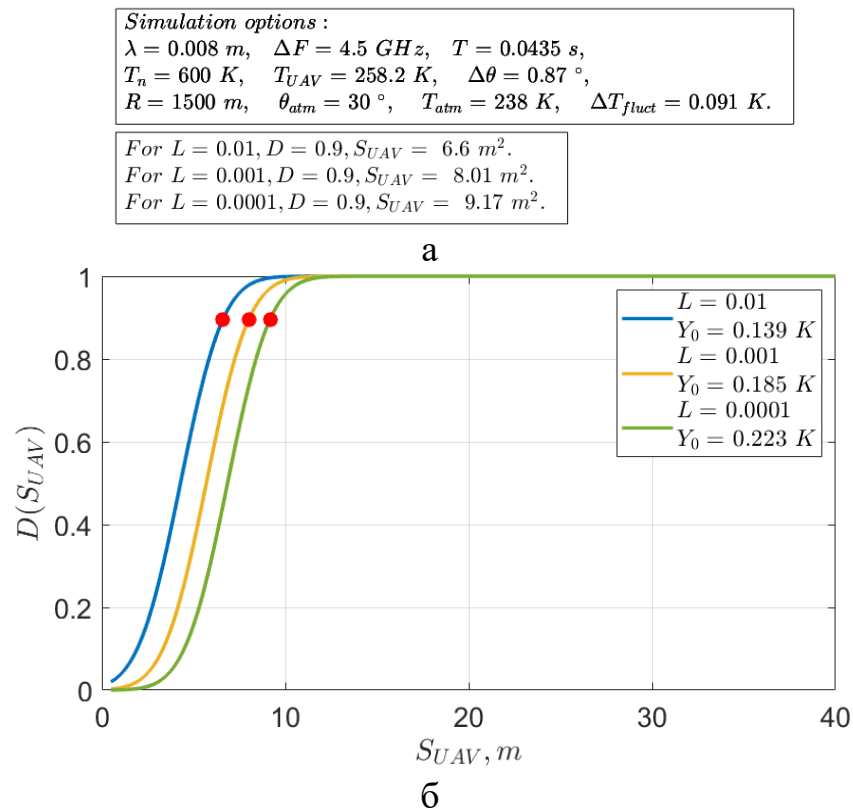


Рисунок Б.83 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ в дощ в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 35-36 ГГц

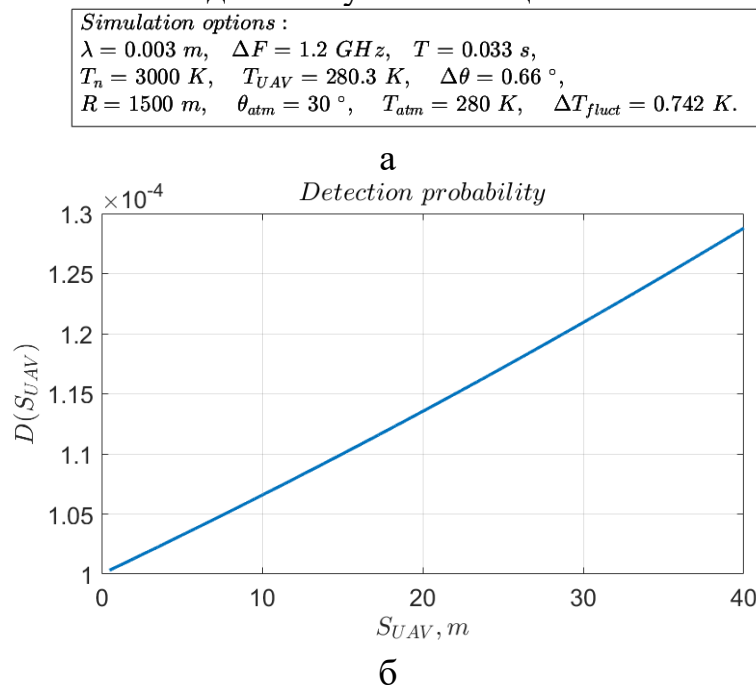


Рисунок Б.84 – Параметри моделювання (а) та результати розрахунку залежності імовірності $D_{виявл}(S)$ БПЛА з скловолоконного матеріалу для $R = 1500 \text{ м}$ в дощ в залежності від його площі $S_{БПЛА}$ для радіометру діапазону 94-96 ГГц

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з НПр
Національного аерокосмічного
університету ім. М.С. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Андрій ГУМЕННИЙ

АКТ

про впровадження результатів наукового дослідження аспіранта кафедри
аерокосмічних радіоелектронних систем

ЧЕРЕПНІНА Гліба Сергійовича

на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Комісія у складі:

голови – в.о. завідувача кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем
д.т.н., доцента, Анатолія ПОПОВА
членів комісії – г.н.с., д.т.н., професор Микола РУЖЕНЦЕВ
д.т.н., професор Валерій ВОЛОСЮК

склала цей акт про те, що наукові положення і результати, зокрема:

- синтезований та досліджений метод оптимальної обробки сигналів в багаточастотних радіометричних комплексах виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери;
- результати аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання дальностей виявлення БПЛА в багатоканальних радіометричних комплексах у діапазонах частот 10-12 ГГц, 20-22 ГГц, 35-36 ГГц, 94-96 ГГц;
- експериментальні вимірювання у широкому діапазоні хвиль та отримана база радіометричних зображень і контрастів різних типів та класів БПЛА, які спостерігаються при різних тактичних та погодних умовах;
- розвиток структури радіометричних комплексів формування радіометричних зображень;

були впроваджені у навчальному процесі кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем у вигляді практичного та теоретичного матеріалу у навчальних дисциплінах: «Сигнали і процеси», «Електродинаміка та пристрої мікрохвильового діапазону», «Антенні пристрої».

Це дозволило впровадити у навчальний процес нові науково-технічні досягнення, покращити наочність, фундаментальну та практичну спрямованість навчального процесу і підвищити якість його виконання.

Голова комісії:

 Анатолій ПОПОВ

Члени комісії:

 Микола РУЖЕНЦЕВ

 Валерій ВОЛОСЮК