

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра аерокосмічних радіоелектронних систем

**Пояснювальна записка**  
**до дипломної роботи**  
(тип кваліфікаційної роботи)

Магістра

(освітнійступінь)

на тему «Розробка радіометричного комплексу виявлення БпЛА у X, K, Ka і W  
діапазонах»

XAI. 501.566м.20O.172.1605200 ПЗ

Виконав: студент (ка) б курсу групи № 566 М  
Спеціальність 172 «Телекомунікації та  
радіотехніка»

(код та найменування)

Освітня програма «Радіоелектронні  
пристрої, системи та комплекси»

(найменування)

Михальчук Д.О.

(прізвище та ініціали студента (ки))

Керівник: Жила С.С.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Костенко П.Ю.

(прізвище та ініціали)

Харків – 2020

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

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра аерокосмічних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
(код і найменування)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси  
(найменування)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**

Жила С.С.

(підпис)

(ініціали та прізвище)

«    »                      20     р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Михальчук Дмитро Олександрович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Розробка радіометричного комплексу виявлення БПЛА у X, K, Ka і W діапазонах»

керівник кваліфікаційної роботи зав. каф. 501, к.т.н. Жила С.С.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету №1706-уч від «19» жовтня 2020 року.

2. Термін подання студентом кваліфікаційної роботи 14 грудня 2020 р

3. Вихідні дані до роботи: розміри БПЛА для моделювання -  $0,5\text{ м}^2$ ,  $1\text{ м}^2$ ,  $5\text{ м}^2$ ,  $10\text{ м}^2$ ,  $20\text{ м}^2$ ; діапазони частот радіометрів - 10-12 ГГц, 20-22 ГГц, 35-36 ГГц, 94-96 ГГц; відстань до БПЛА 1500м для розрахунку ймовірності правильного виявлення; кут візування –  $30^\circ$

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) Аналіз кількості трагедій через зіткнення БПЛА з людьми и об'єктами, аналіз точності і дальності виявлення, вирішення оптимізаційних задач виявлення шумового сигналу на тлі перешкод приймача і випромінювання атмосфери, аналіз структури функціонала щільності ймовірності виявлення радіотеплового випромінювання БПЛА, моделювання в середовищах Matlab ймовірностей правильного виявлення в залежності від дальності, кутів візування та розмірів БПЛА, отримання графіків, економічний розрахунок, висновки.

5. Перелік графічного матеріалу Рисунків 92, таблиць 19.

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<b>Основний</b>	Жила С.С. зав. каф. 501		
<b>Додатковий</b>	Жила С.С. зав. каф. 501		
<b>Економічна частина</b>	Хлівна І. В. проф. каф. 601		

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Бей О.І. « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання «19» жовтня 2020 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Опрацювання матеріалу випадків зіткнення БПЛА з людьми та об'єктами	20.10-21.10	виконано
2	Аналіз актуальності контролю руху БПЛА в міській місцевості і в області аеропортів	21.10-22.10	виконано
3	Розгляд положення ІКАО відносно інтеграції БПЛА	22.10-23.10	виконано
4	Аналіз існуючих методів та засоби виявлення БПЛА	25.10-28.10	виконано
5	Вирішення оптимізаційної задачі та аналіз правильності виявлення	02.11-04.11	виконано
6	Синтез оптимального алгоритму виявлення приростів радіотеплового сигналу	05.11-07.11	виконано
7	Аналіз структури функціонала щільності ймовірності виявлення радіотеплового випромінювання БПЛА	12.11-15.11	виконано
8	Розрахунок і аналіз якісних показників виявляча контрастів в різних тактичних умовах і метеоумовах	16.11-18.11	виконано
9	Моделювання	20.11-25.11	виконано
10	Підготовка звітів моделювання	26.11-28.11	виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Михальчук Д.О.

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Жила С.С.

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 130 с., 92 рис., 19 табл., 11 джерел.

Об'єкт дослідження – радіометричний комплекс.

Предмет дослідження – параметри власного і перевідображеного радіовипромінювання в діапазонах X, K, Ka і W. Якісні показники виявляча контрастів в різних тактичних умовах і метеоумовах.

Мета роботи - розробка радіометричного комплексу виявлення БПЛА у X, K, Ka і W діапазонах.

Методи дослідження – розрахунок, аналіз, розробка та налагодження програмного забезпечення.

Своєчасному вжиттю заходів для унеможливлення несанкціонованого застосування БПЛА повинне передувати їх виявлення. При цьому просте візуальне виявлення недостатньо ефективно та взагалі неможливе за відсутності освітлення або поганої видимості. Натомість більш ефективним способом встановлення факту застосування БПЛА, у тому числі поза межами зони візуального спостереження, є виявлення радіосигналів їх систем дистанційного радіокерування. В рамках даної роботи буде проведено аналіз існуючих методів та засобів виявлення БПЛА вирішено оптимізаційну задачу та проаналізовано правильність виявлення а також розрахунок ймовірностей правильного виявлення в залежності від дальності, кутів візування та розмірів БПЛА. Ця робота буде реалізована за допомогою програми написаної в Matlab що буде виконувати розрахунок ймовірності правильного виявлення для різних тактичних та погодних умов.

**ІСАО, БПЛА, АНАЛІЗ ПРАВИЛЬНОСТІ, ОПТИМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ, РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ КАНАЛ, РОЗРАХУНОК ЙМОВІРНОСТІ**

## THE ABSTRACT

Master's degree work: 130 p., 92 fig., 19 tabl., 11 sources.

The object of research is a radiometric complex.

The subject of research - the parameters of intrinsic and translated reflected radiation in the ranges X, K, Ka and W. Qualitative indicators of the contrast detector in different tactical conditions and weather conditions.

The purpose of the work is to develop a radiometric complex of UAV detection in X, K, Ka and W ranges.

Research methods - calculation, analysis, development and debugging of software.

Timely measures to prevent unauthorized use of UAVs must be preceded by their detection. At the same time, simple visual detection is not effective enough and is impossible in the absence of lighting or poor visibility. Instead, a more effective way to establish the use of UAVs, including outside the visual surveillance zone, is to detect radio signals from their remote radio control systems. Within the framework of this work, an analysis of existing methods and means of UAV detection will be performed, the optimization problem will be solved and the correctness of detection will be analyzed, as well as the calculation of probabilities of correct detection depending on range, sighting angles and UAV dimensions. This work will be implemented using a program written in Matlab that will calculate the probability of correct detection for different tactical and weather conditions. ICAO, UAV, CORRECTNESS ANALYSIS, OPTIMAL ALGORITHM, RADAR CHANNEL, PROBABILITY CALCULATION

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
1 ОБГРУНТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕМИ.....	10
1.1 ЗІТКНЕННЯ БПЛА З ЛЮДЬМИ ТА ОБ'ЄКТАМИ.....	10
1.1.1 ЗІТКНЕННЯ БПЛА З ЛЮДЬМИ .....	11
1.1.2 ..ПОЛЬОТИ НАД ДІЛЯНКАМИ, ДЕ ПОЛЬОТИ ЗАБОРОНЕНІ АБО НЕДОРЕЧНІ.....	12
1.1.3 ДРОНИ ТА АЕРОДРОМИ .....	14
1.1.4 АМАТОРСЬКІ ДРОНИ ЗАВАЖАЮТЬ ГАСИТИ ПОЖЕЖІ.....	14
1.1.5 С ХУЛІГАНСТВО ТА ТЕРОРИСТИЧНІ АКТИ .....	15
1.2 АКТУАЛЬНІСТЬ КОНТРОЛЮ РУХУ БПЛА В МІСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ І В ОБЛАСТІ АЕРОПОРТІВ .....	15
1.3 ЗАКОНИ ЯКІ РЕГУЛЮЮТЬ ПОВІТРЯНИЙ РУХ БПЛА В ТОМУ ЧИСЛІ ОРГАНІЗАЦІЄЮ (ІСАО) .....	17
1.3.1 ПОТОЧНИЙ ПРАВОВИЙ СТАТУС .....	17
1.3.2 ОСТАННІ НОВОВВЕДЕННЯ В ЗАКОНОДАВСТВІ.....	18
1.3.3 ПОЛОЖЕННЯ ІСАО ВІДНОСНО ІНТЕГРАЦІЇ БПЛА .....	22
2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ .....	24
2.1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА ..	24
2.1.1 АКУСТИЧНИЙ КАНАЛ .....	25
2.1.2 ІНФРАЧЕРВОНИЙ КАНАЛ.....	27
2.1.3 ОПТИЧНИЙ КАНАЛ .....	29
2.1.4 РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ КАНАЛ.....	30
3 ВИРІШЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ ПРАВИЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ.....	35
3.1 СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ ВИЯВЛЕННЯ ПРИРОСТІВ РАДІОТЕПЛООВОГО СИГНАЛУ БПЛА НА ТЛІ ВНУТРІШНІХ ШУМІВ ПРИЙМАЧА І ФОНОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ АТМОСФЕРИ .....	36
3.2 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ФУНКЦІОНАЛА ЩІЛЬНОСТІ ЙМОВІРНІСТІ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БПЛА .....	38
4 МОДЕЛЮВАННЯ .....	46
4.1 ВИХІДНІ ПАРАМЕТРИ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ .....	46
4.2 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ЙМОВІРНІСТЕЙ ПРАВИЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ДАЛЬНОСТІ, КУТІВ ВІЗУВАННЯ ТА РОЗМІРІВ БПЛА .....	51

4.3 РОЗРАХУНОК ЙМОВІРНОСТІ ПРАВИЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КУТА ВІЗУВАННЯ.....	85
4.4 РОЗРАХУНОК ЙМОВІРНОСТІ ПРАВИЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РОЗМІРУ БПЛА .....	92
5 РОЗРАХУНОК ЦІНИ ТА СОБІВАРТОСТІ ПРОГРАММИ.....	100
5.1 МЕТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЧАСТИНИ.....	100
5.2 ОПИС ВИРОБУ .....	100
5.3 РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ ТА ЦІНИ ПРОДУКТУ .....	100
5.4 РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИСТРОЮ .....	103
5.5 РОЗРАХУНОК ТОЧКИ БЕЗЗБИТКОВОСТІ.....	105
ВИСНОВОК.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	108
ДОДАТОК А .....	109

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат;  
 БПС – безпілотне повітряне судно;  
 ГЛОНАСС – глобальна навігаційна супутникова система;  
 ДПАС – дистанційно пілотовані авіаційні системи;  
 ДПЛС – дистанційно пілотовані літальні системи;  
 ДППС – дистанційно пілотовані повітряні системи;  
 ДМХ – дециметрові хвилі;  
 ЕМХ – електромагнітні хвилі;  
 ЕПР – ефективна площа розсіювання;  
 ЗРК – зенітно ракетний комплекс;  
 ІЧ – інфрачервоне;  
 МБЛА – малі безпілотні літальні апарати;  
 МЛА – малі літальні апарати;  
 МХ – метрові хвилі;  
 ППО – протиповітряна оборона;  
 ПУ – пульт управління;  
 РЛР – радіолокаційна розвідка;  
 РЛС – радіолокаційна станція;  
 СМХ – сантиметрові хвилі;  
 ICAO – International Civil Aviation Organization;  
 NASSA – National Aeronautics and Space Administration;  
 $f_i$  - максимуми спектру;  
 $f_0$  – частота обертання двигуна, об/с;  
 $N$  – кількість лопатей пропелера;  
 $B$  – освітленість об'єкта, Лм;  
 $B_f$  – освітленість фону, кд/м<sup>2</sup>;  
 $S_w$  - ефективна поверхня відбиття цілі в оптичному діапазоні, м<sup>2</sup>;  
 $r_{ц}$  - коефіцієнт відбиття поверхні цілі;  
 $S_{пр0}$  - ефективна площа об'єктива, на яку падає випромінювання, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta\lambda$  - смуга пропускання оптичного фільтра, 10<sup>6</sup> м;  
 $P_{пор0}$  - смуга пропускання оптичного фільтра, 10<sup>6</sup> м;  
 $\tau_{пр0}$  - коефіцієнти пропускання приймального пристрою;  
 $\tau_{ср0}$  - коефіцієнти пропускання середовища;  
 $\xi$  - коефіцієнт деполаризації вторинного поля ( $0 \leq \xi \leq 1$ );  
 $P_{отр}$  – потужність відбитого від цілі сигналу, Вт;  
 $D_0$  - значення діаграми зворотного розсіювання в напрямку на РЛС;  
 $E_1$  - щільність потоку енергії радіолокаційного сигналу на сфері радіусом рівним дальності до мети, Вт/м<sup>2</sup> ;  
 $S$  - повна площа розсіювання цілі, м<sup>2</sup>;  
 $\lambda$  - довжина хвилі, м;  
 $Y_{\Delta}$  – вихідний ефект оптимального детектора;



$Y_0$  – порогове значення вихідного ефекту;

$t$ - інтервал часу, с;

$s_{UAV}(t)$  - випромінювання БПЛА, К;

$s_{atm}(t)$  - випромінювання атмосфери, К;

$n(t)$  - шуми приймача, К;

$N_{0UAV}$  – спектральні щільності потужності корисного сигналу БПЛА, Вт/Гц;

$N_{0atm}$  – спектральні щільності атмосфери, Вт/Гц;

$N_{0n}$  – спектральні щільності внутрішнього шуму, Вт/Гц;

$k$  – постійна Больцмана, Дж/К;

$T_{UAV}^{\circ}$  – яскраві температури корисного сигналу БПЛА, К;

$T_{atm}^{\circ}$  – яскраві температури атмосфери, К;

$T_n^{\circ}$  – шумова температура приймача, К;

$D(Y_0)$  - ймовірність правильного виявлення;

$L(Y_0)$  - ймовірність помилкової тривоги;

$M(Y_0)$  – ймовірність пропуску цілі;

$\alpha$  – кут атаки БПЛА, град;

$K$  – коефіцієнт пропорційності площі;

$\theta_{atm}$  - кут візування, град;

$J$  – висота польоту БПЛА, м;

$V$  – дальність польоту БПЛА,  $10^3$ м.

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку науки і техніки різноманітні радіотехнічні системи знаходять все більше поширення у багатьох галузях народного господарства, а також у побуті. При цьому функціональні можливості радіотехнічних пристроїв досить широкі, а шкода від їх невмілого або несанкціонованого застосування може бути надзвичайно великою. До таких систем належать радіокеровані моделі літальних апаратів аматорського та середнього класів. Як показують результати спостережень, саме такі безпілотні літальні апарати (БПЛА) у разі їх несанкціонованого застосування можуть становити суттєву небезпеку при проведенні масових заходів.

Своєчасному вжиттю заходів для унеможливлення несанкціонованого застосування БПЛА повинне передувати їх виявлення. При цьому просте візуальне виявлення недостатньо ефективно та взагалі неможливе за відсутності освітлення або поганої видимості. Натомість більш ефективним способом встановлення факту застосування БПЛА, у тому числі поза межами зони візуального спостереження, є виявлення радіосигналів їх систем дистанційного радіокерування. Розробка методів та алгоритмів виявлення таких сигналів є актуальним та складним науково-практичним завданням.

Багато малих БПЛА стали доступними для звичайних користувачів, причому їх оснащення досить складне і включає фото- і відеокамери, систему автопілота і навігації, що робить управління такими БПЛА досить простим.

Повсюдне використання малих БПЛА крім, безсумнівно, позитивних сторін породило ряд проблем, пов'язаних з неадекватною поведінкою деяких власників БПЛА, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій державної важливості, випадками вторгнення в особисте життя, виникненням можливості використання БПЛА в терористичних і розвідувальних цілях.

Незалежно від сфери застосування, повномасштабне виконання місій БПЛА може включати такі підзадачі як виявлення, локалізація і ідентифікація цілей, супровід і цілевказування. Як свідчать різні джерела інформації, в даний час в нашій країні і за кордоном за результатами оцінки вкладу різних технічних засобів в ефективність бойових дій угруповань збройних сил пріоритети віддані засобів отримання розвідувальної інформації. Повітряна розвідка по справедливості вважається однією з найнебезпечніших бойових завдань. Підлягають розвідці мети противна сторона прагне приховати і захищає їх потужною об'єктовою та військовою ППО. Особливо небезпечна повітряна розвідка в початковий період бойових дій, коли ППО противника ще не пригнічена, а також при відсутності панування в повітрі. Тому особливої актуальності набуває використання комплексів на основі безпілотних літальних апаратів для повітряної розвідки.

У більшості перерахованих випадків досить актуальною стає задача виявлення БПЛА в повітрі.

## 1 ОБГРУНТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕМИ

### 1.1 Зіткнення БПЛА з людьми та об'єктами

Безпілотні літальні апарати заповнили наше життя, завдяки ним стало можливим в короткий термін доставляти ліки в важкодоступні місця, знаходити загублених людей, охороняти об'єкти, доставляти їжу та воду. Та з часом БПЛА стали більш доступними і їх використання більше не обмежене крайньою необхідністю. На разі кожен бажаючий може без перешкод придбати собі такий літальний апарат що стало причиною їх швидкого розповсюдження. Та нажалі такі помічники можуть нашкодити досить суттєво не зважаючи на свої маленькі розміри так пасажирський літак Beechcraft King Air 100 канадської авіакомпанії Skyjet при підльоті до аеропорту Квебека зіткнувся з аматорським дроном. Як повідомляє AINonline, інцидент стався 12 жовтня 2017 року, а тепер його офіційно підтвердило міністерство транспорту Канади. Це перший в світі офіційно зареєстрований випадок зіткнення дрона з пасажирським літаком.

На борту King Air 100 в момент зіткнення перебувало восьмеро пасажирів (літак вміщає дев'ять чоловік) і два пілоти. Літак виконував переліт з аеропорту Руен-Норанда в провінції Квебек в Міжнародний аеропорт Квебек-сіті імені Жана Лесажа. В результаті зіткнення літак отримав незначні пошкодження і благополучно приземлився в аеропорту призначення.

Подробиці про отримані пошкодження не розкриваються. В даний час поліція міста Квебека спільно з фахівцями міністерства транспорту Канади проводять розслідування інциденту. Деталі розслідування також поки невідомі.

За даними порталу Aviation Safety Network, під час зіткнення King Air 100 знаходився в 11 кілометрах від міжнародного аеропорту і летів на висоті 730 метрів. Після зіткнення літак благополучно приземлився на смузі 24 в аеропорту Квебека.

В даний час в Канаді діють обмежують правила польотів безпілотників. Згідно з цими правилами, поблизу 5,5 кілометра від аеропорту або 1,8 кілометра від Хеліпорт повністю заборонені польоти аматорських безпілотників. Порушникам загрожує штраф у розмірі 25 тисяч доларів або навіть позбавлення волі, якщо таке порушення спричинило серйозні наслідки.

За даними міністерства транспорту Канади, з початку поточного року в країні було зареєстровано 1596 випадків спостереження дронів пілотами літаків. 131 з цих випадків відноситься до категорії небезпечних зближень. Це означає, що безпілотник пролетів ближче 150 метрів від літака.

В кінці вересня поточного року в США був зареєстрований перший в світі випадок зіткнення аматорського дрона з вертольотом. Багатоцільовий вертоліт UH-60M Black Hawk, приписаний до авіабази «Форт Бреґг» в Північній Кароліні, зіткнувся з дроном під час патрульного польоту над Нью-Йорком.

Black Hawk вів патрулювання над Нью-Йорком для забезпечення безпеки засідання Генеральної асамблеї ООН, що проходила з 12-го по 28 вересня

поточного року. З яким саме апаратом зіткнувся вертоліт, невідомо. Після зіткнення вертоліт зумів долетіти до аеропорту Лінден в Нью-Джерсі і здійснити аварійну посадку.

В результаті зіткнення Black Hawk зазнав пошкодження фюзеляжу і двох лопатей несучого гвинта. Фрагмент дрона був пізніше виявлений в охолоджувальній установці. Розслідуванням цієї справи в даний час займається Національний комітет з питань безпеки транспорту США[1].

Обидва офіційно зареєстрованих випадки зіткнення дронів з літальними апаратами, на щастя, завершилися без серйозних наслідків, хоча для деяких типів літаків і вертольотів безпілотники представляють серйозну небезпеку. Чим може обернутися зіткнення дрона з пасажирським літаком, читайте в нашому матеріалі «Дрон навиліт».

### 1.1.1 Зіткнення БПЛА з людьми

Шість людей, включаючи дітей, постраждали в суботу 2017.11.07, коли 4-кілограмовий безпілотник, який розповсюджував цукерки на заході в Огакі, префектура Гіфу, раптово врізався у натовп, заявила поліція.

Вік постраждалих від безпілотника становив від 5 до 48 років, але більшість поранень були незначними, такі як подряпини на лобі та плечах, повідомляє поліція.

Безпілотник, діаметром близько 85 см і висотою 55 см, розкидав солодощі, коли ширяв над парком в Огакі в рамках заходу з демонстрації роботизованих технологій. Організатором заходу виступила місцева туристична асоціація.

Близько 600 людей, у тому числі близько 100 дітей, які відвідують сім'ї, були на місці під час аварії.

Поліція допитала 37-річного пілота безпілотника, який представляє виробника безпілотників у префектурі, він заявив що безпілотник втратив управління через певні технічні несправності які виявили у ході розслідування.

Ще одним прицидентом в історії був безпілотник групи Muse звалився в публіку на концерті в Лондоні. Група Muse любить використовувати безпілотники на своїх виступах. Але на цьому тижні під час виступу в Лондоні щось пішло не так і надувний БЛА, відомий серед шанувальників групи, як dildrone, спікірував прямо в натовп.

Ніхто не постраждав, але сам по собі цей інцидент наочно пояснює чому американська FAA і інші регулятори настільки побоюються давати дозволу на польоти великих безпілотників там, де зустрічаються скупчення людей. Треба зауважити, що це вже другий випадок аварійного приземлення безпілотника на концертах групи. Раніше безпілотник вже падав на сцену під час концерту групи, втім, також нікого не зачепивши.

Інтуїтивно зрозуміло, що зіткнення з безпілотником, що летить зі швидкістю в кілька десятків кілометрів на годину – небезпечно та скпроваджується серйозними травмами. З огляду на те що число безпілотників вже вимірюється в мільйонах, а керують ними далеко не завжди кваліфіковані

пілоти, навіть хобі-дрони стають цілком відчутною небезпекою для всіх і кожного. На їхньому рахунку вже чимало травм, а також розбитого скла в будинках і громадських будівлях. Рано чи пізно неминучі і смертельні випадки.

Вчені в Данії вирішили перевірити, наскільки велика небезпека травми при зіткненні з невеликим БЛА. Для експерименту вони взяли фрагмент туші свині, який імітував людське тіло. В результаті дослідження можна спостерігати, як легко лопать пропелера пробиває шкіру і глибоко входить в тканини.

### 1.1.2 Польоти над ділянками, де польоти заборонені або недоречні

В Італії заарештований турист з Франції за те, що він намагався запустити безпілотник над Колізеєм, щоб отримати гарні кадри. За італійським законодавством турист може очікувати штраф в розмірі 113 тисяч євро (\$ 127 тис.). Турист порушив відразу кілька законів - підняв дрон занадто високо, керував ним із занадто дальньої відстані, БЛА літав над скупченнями людей. Перші два порушення - це порушення правил керування телекерованими безпілотниками, а політ над вулицею, заповненою людьми і зовсім вимагав спеціального дозволу від Enac, італійського регулятора цивільної авіації. Турист був заарештований відразу ж після приземлення безпілотника, дрон був конфіскований. Поки що невідомо, чи будуть застосований такий значний штраф, але законодавство дозволяє його вимагати.

Дрон не менш небезпечний, ніж птах. Його також може втягнути в турбіну реактивного двигуна, що іноді викликати різні проблеми, аж до відмови двигуна.

У США в період з 2015.01.01 до 2015.10.28 зафіксовано 920 випадків, коли пілоти літаків повідомляли про помічених поруч безпілотних літаючих пристроях. Це набагато більше, ніж роком раніше. За 8 перших місяців 2015 року

була 650 таких інцидентів. В Україні було 40 випадків у 2015 році. Крім об'єктивних факторів діє також фактор новизни - за безпілотники нерідко приймають самі різні об'єкти або явища, які не мають до них ніякого відношення.

Зрозуміло, ніхто не намагається виправдати близькі прольоти безпілотників поряд з літаками і аеропортами. У більшості країн це вважається злочином - вельми небезпечним, з огляду на, що наслідки зіткнення безпілотника і літака можуть бути жахливими. Тим не менш, багато "зареєстрованих випадків" явно йдуть врозріз зі здоровим глуздом.

Один випадок був зареєстрований 27 серпня 2015 року - безпілотник небезпечно зблизився з літаком Dornier 328 поруч з Манчестерським аеропортом на висоті близько 850 метрів. За даними пілота, апарат рухався зі швидкістю 330 км / год, причому мова йшла про коптере з трьома пропелерами, діаметр яких становив близько півметра.

Навіть відставивши вбік екзотичність конструкції, то, як саме апарат піднявся на таку висоту та ще з такою неймовірною для цивільних коптеров швидкістю, залишається загадкою. Більшість гоночних коптеров сьогодні здатні розвивати швидкість лише трохи більше 100 км / год, при цьому вони швидко літають лише на невеликій висоті і можуть залишатися в повітрі зовсім недовго

- "вертолітний" конструкція не дуже ефективна в плані витрат енергії на політ. Вона витрачається не тільки на переміщення, але і на те, щоб апарат утримувався в повітрі.

Інше повідомлення (номер 2015155) говорить, що Boeing 737, який залишає аеропорту Станстед, зустрівся з дроном на висоті 1.2 км 13 + вересня 2015 року. Довжина безпілотної становила 2 метри, проте екіпаж літака не розгледів, чи йшла мова про гвинтовий або реактивної машині. Згідно зі свідченнями пілота, апарат летів назустріч літаку (з 12 годин), проте в якийсь момент різко змінив курс і вийшов на 1 годину, після чого пішов. З огляду на швидкість лайнера (близько 500 км / ч), безпілотної для виконання такого маневру по своїй маневреності та швидкості повинен перевершувати більшість військових бортів. Якщо ж мова йде про комерційно доступних апаратах, про можливість таких маневрів оператори можуть тільки мріяти!

Ще один випадок (номер 2015157) був зареєстрований поблизу Лондонського аеропорту на висоті близько 600 метрів. Літак Embraer E170 заходив на посадку із швидкістю близько 300 км / ч 13 вересня 2015 року. Екіпаж повідомив про сріблястому БЛА з кулястої центральною частиною і чотирма гвинтами по периметру.

Такі дрони існують. Проте, "кулі" зазвичай не використовуються на відкритих просторах без мотузки - особливо на такій висоті. Посудіть самі, чим легше безпілотної, тим більше його зносить вітер. Піднятися на 600 метрів і зберегти стабільність в повітрі - завдання для таких апаратів мало реальна. Швидше за все, мова йшла про "заблукав" гелієвій кулі.

У повідомленні під номером 2015212, 28 листопада 2015 року, екіпаж літака Airbus A321, що заходить на посадку в аеропорту Гатвік, зауважив дрон, що завис на висоті близько 30 метрів над посадковою смугою. Лайнер пройшов під апаратом, після чого той зник. Інцидент стався о 13:45, поліція виявилася в цьому районі вже о 13:52, причому ніхто з співробітників служби безпеки та інших людей не побачив жодного безпілотної. При цьому, посадкова смуга Гатвік розташована далеко від периметра аеропорту. Чи міг безпілотної настільки швидко покинути зону видимості, які акумулятор і двигун потрібні були б апарату для того, щоб здійснити такий зухвалий вторгнення і втечу.

Непізнані об'єкти супроводжували повітряні судна зі світанку епохи авіації. У різний час їх оголошували птахами, погодними аеростатами, секретними розробками Третього Рейху, іноземними літаками-шпигунами і навіть НЛО, однак, як правило, мова йшла про те, що хтось просто не розібрався з тим, що побачив. Сьогоднішній тренд - побоюватися дронів. Залишається лише сподіватися на те, що надмірні обсяги "вкидається" інформації не завадить реалізувати ідею використання безпілотної для доставки і транспортування[2].

### 1.1.3 Дрони та аеродроми

Найчастіше скаржаться на безпілотники які "майже зіткнулися" з пілотованими бортами в районах аеродромів.

Робота міжнародного аеропорту у Франкфурті-на-Майні була припинена майже на дві години через виявлений на його території безпілотника, повідомляє портал Hessenschau з посиланням на представника аеропорту. За його даними, безпілотник був помічений в 11.15 (9.15 мск).

Робота аеропорту була припинена протягом п'яти хвилин після виявлення дрона і відновилася лише після 13.00. Федеральна поліція повідомила про вжиття заходів для забезпечення безпеки. У повідомленні, розміщеному на сторінці аеропорту в Facebook, пасажирів попередили про збої і відміни рейсів.

Це не перший випадок припинення роботи повітряної гавані через дронів. У 2019 році це траплялося двічі - в березні і травні. В обох випадках аеропорт не працював 30 хвилин.

Німецький аеропорт у Франкфурті-на-Майні є найбільшим в Європі. Його пасажиропотік в 2019 р склав 70,5 млн чоловік.

2018.03.22 Робота аеропорту Франкфурта була на півгодини паралізована появою невідомого безпілотника, поки поліція розбиралася з ситуацією. Спочатку спостерігачі вважали, що помітили два безпілотника, але потім стало зрозуміло, що річ йде про один апарат. Оператор БПЛА не був виявлений, як і його апарат. Інцидент привів до затримки ряду рейсів. Проблема з польотами БЛА в зонах, де це заборонено, стає все більш серйозною - якщо в 2017 році вони були помічені в заборонених зонах аеропортів Німеччини службами повітряного руху 88 разів, а в 2018 році вже 158 раз.

### 1.1.4 Аматорські дрони заважають гасити пожежі

У Південній Каліфорнії, де цього літа пожежні з Лісової служби США намагаються гасити пожежі з повітря скиданням води з "літаючих танкерів" двічі були змушені припинити операції в повітрі всієї пожежної техніки з-за польотів аматорських дронів, керованих тими, хто не розуміє створюваної такими польотами небезпеки. Пожежні попередили, що не використовуватимуть кошти повітряного пожежогасіння, поки не переконаються, що безпілотники очистили район польотів.

Незважаючи на те, що законодавство, яке стосується польотів дронів в США, ще досить сире і знаходиться в процесі постійного доопрацювання, є федеральний закон, що дозволяє тимчасово оголошувати забороненими для польотів території в районах загорянь.

Влада Лос-Анжелоса і Ель Дорадо представили проект місцевого закону, який, якщо буде прийнятий, зробить польоти безпілотників над зонами пожеж "серйозним злочином".

Власники дронів направляють їх в зону пожежі з цікавості, або для того, щоб зробити ефектні відео, які можна потім викласти на Youtube. У зв'язку з цим

пригадується фільм Стрінгер (Nightcrawler) Дена Гилроя. А ще це говорить про велике поширення дронів в США.

До речі, ще минулого літа Служба національних парків США ввела заборону на польоти радіокерованих літаків і вертольотів у всіх національних парках США і над меморіалами, посилаючись, що такі польоти лякають тварин, а також заважають відвідувачам.

### 1.1.5 Хуліганство та терористичні акти

Безпілотники можуть бути використані, як окремими особами, так і терористичними організаціями. До сих пір не відомі випадки використання безпілотників в УК, Європі і США в терористичних цілях - для організації вибуху або спостереження. Однак, вже виникла інформація про те, що ІГІЛ готується до синхронізованою з часу терористичної атаки, в якій буде задіяно одночасно багато безпілотників (хобі-дронів).

В Японії дрон, навантажений ємністю з радіоактивним піском з Фукусіми, приземлили на даху офісу прем'єр-міністра в Токіо. Рівень випромінювання "посилки" становив 1 мікрозіверта на годину.

У США заарештували 26-річного громадянина, який планував використовувати радіокеровані моделі літаків, навантажених вибухівкою для атак на Пентагон і Капітолій. Як детонаторів саморобних вибухових пристроїв, він мав намір використовувати стільникові телефони.

## 1.2 Актуальність контролю руху БПЛА в міській місцевості і в області аеропортів

Протягом декількох останніх років ми спостерігаємо, як процес створення законодавчої бази, що регулює застосування безпілотних авіаційних систем, в нашій країні по черзі проходить через етапи посилення обмежувальних заходів і їх ослаблення. Доводи сторін, що беруть участь в даному процесі, зрозумілі. Служби, відповідальні за безпеку та правопорядок, з урахуванням наочно продемонстровані на світовому досвіді ризиків прагнуть мінімізувати використання безпілотників. У той же час компанії, що працюють в області розробки, продажу та експлуатації відповідних безпілотних систем, навпаки, націлені на зниження загороджувальних бар'єрів. Зараз ми бачимо, що маятник може качнути в сторону пом'якшення вимог до користувачів безпілотників. В цілому запропоновані вимоги представляються раціональними, а зазначені цифри за пропонованою висоті польоту корелюються з наявними в ряді інших країн, включаючи європейські, де поза закритих зон можна використовувати безпілотники на висотах до 100-150 метрів, при видаленні по горизонталі до декількох сотень метрів, збереженні безпілотника в межах візуального контролю оператора, з заборонаю наближатися до людей, об'єктам приватної власності на відстань ближче 50 метрів.



Незважаючи на те, що Україна поки займає невелику частку ринку БПЛА, розвиток цього сегмента в нашій країні не можна назвати зовсім вже сумною. Сфера застосування безпілотників в Україні поступово розширюється, найбільш часто (близько 60%) їх використовують при виробництві відеозйомок, реклами, репортажів ЗМІ, моніторингу в різних інфраструктурних проектах, а також в сільському господарстві. Так само незабаром очікується істотне зростання застосування БПЛА в сфері логістики. Вселяють оптимізм і статистичні дані підприємства по використанню повітряного простору (ВПП) безпілотниками. Якщо в 2015 році було видано всього 2,3 тис. Дозволів на ІВП, то за підсумками минулого року - вже 25 тис. За прогнозами фахівців в 2020 році кількість дозволів збільшиться до понад 65 тис.

Подальше зростання популярності безпілотників як в світі в цілому, так і в Україні, призводить до необхідності їх повної інтеграції в повітряний простір. Для цього потрібно комплексне рішення, що включає не тільки розвиток нормативної бази, а й опрацювання цілого ряду технічних питань. Для того, щоб в майбутньому повноцінно запуснути дрони високо в небо і дозволити їм літати поряд з пілотованими повітряними судами, потрібно почати з малого і спробувати організувати їх безпечний рух хоча б на малих висотах.

Щоб уникнути зіткнень дронів один з одним необхідна єдина система, яка вміла б не тільки збирати інформацію про їх місцезнаходження, а й поширювати ці дані між операторами. Одна з концепцій, яка частково вирішує дану задачу, запропонована в 2014 році в США, де на сьогоднішній день вже зареєстровано понад 1,5 млн БПЛА (близько 170 тис. З них використовуються в комерційних цілях). Концепція, розроблена Національним аерокосмічним агентством NASA (США), отримала назву Unmanned aircraft system traffic management (UTM, система організації маловисотного повітряного руху БАС). UTM відокремлена від загальної системи управління повітряним рухом, але при цьому покликана доповнювати її. Вона базується на основі сучасних цифрових платформ і інфокомунікаційних технологій, супутникових і гібридних технологій навігації, зв'язку і спостереження. По суті, зараз UTM являє собою набір довідково-інформаційних сервісів, що дозволяють користувачам дізнатися про плани польотів інших безпілотників. Істотний недолік UTM полягає в тому, що вона не забезпечує головного - передачу даних про місцезнаходження дронів в режимі реального часу, і, як наслідок, не дозволяє гарантувати безпеку руху.

Проте, створення UTM - певний крок у бік повної інтеграції безпілотників в загальне повітряний простір, тому розробка її аналогів зараз ведеться в більш ніж 30 країнах. Так, наприклад, в 24 державах Європи реалізуються 12 пілотних проектів U-Space. Схожі проекти є в Австралії (Australian National UTM System) і Китаї (UTMISS). Для об'єднання зусиль в 2016 році створена Глобальна асоціація по стандартизації систем UTM - GUTMA (штаб-квартира знаходиться в швейцарській Лозанні), в яку вступили понад 60 компаній і організацій з різних країн. За даними НП "ГЛОНАСС", в 2018 році сумарний обсяг інвестицій у створення систем UTM склав більше \$ 300 млн.

Безумовно, робота по інтеграції безпілотників в єдиний повітряний простір і створення певного аналога UTM ведеться і у нас. Для того, щоб польоти дронів були безпечні для людей і інфраструктури, застосування їх в Україні має контролюватися. "Для цього потрібні система їх моніторингу та фахівці, які будуть забезпечувати роботу безпілотників. Мається на увазі роботу, спрямовану на позитивні цілі, - в сільському господарстві, на будівництвах і так далі.

Одна із значущих проблем, що гальмують розвиток цього сегмента, пов'язана з тим, що в Україні досі не запущена процедура офіційної реєстрації невеликих безпілотних повітряних суден (БПС). Це тягне за собою певні ризики в забезпеченні безпеки їх польотів

Зрозуміло, при інтеграції БПС в єдине повітряний простір необхідно в першу чергу думати про забезпечення безпеки польотів, суспільної безпеки і захисту приватного життя громадян. Але при цьому не можна забувати і про потреби тих, хто використовує або планує використовувати їх в майбутньому.

### 1.3 Закони які регулюють повітряний рух БПЛА в тому числі організацією (ІСАО)

Неконтрольоване розповсюдження використання БПЛА в світі, разом з відповідними ризиками, пов'язаними з літаками, іншою власністю, життям людей, приватних даних, порушенням меж закритих територій і безпекою, вимагають нового регулювання з боку законодавців. Хоча Україна поки що і не зіткнулася з більшістю з цих проблем, поточна ситуація (сильна зацікавленість з боку підприємців і військових) вимагає пильної уваги законодавців. Зобов'язання, взяті Україною за міжнародними договорами, включаючи Договір про асоціацію між Україною та ЄС, вимагають від України прийняття законів, що відповідають вимогам загального повітряного простору.

#### 1.3.1 Поточний правовий статус

Європейське агентство з безпеки польотів докладає зусиль, щоб врегулювати використання безпілотників в спільному європейському просторі. Більш того, міжнародна група експертів працює над розробкою стандартів для БПЛА, включаючи безпечну інтеграцію малих і великих БПЛА в повітряний простір і аеропорти. Хоча Україна і не є членом цієї організації, вона, як частина міжнародного повітряного простору, зобов'язана забезпечувати безпечні умови для цивільної авіації. Більш того, як майбутній член спільного європейського неба, Україна повинна ввести нове законодавство відповідно до європейських стандартів.

Варто зазначити, що в сучасному законодавстві існує дефініція БПЛА, але їх використання не є окремо врегульованих і частково описується як складової широкої групи громадянської і комерційної авіації, відповідно до нормативно-правовим регулюванням повітряного простору. В цілому, спеціальні регулятивні

документи щодо польотів БПЛА, сертифікації, атестації операторів, а також інтеграції в сферу управління повітряного руху, відсутні.

На даний момент БПЛА підпадають під регулювання наступних нормативно-правових актів: Повітряного кодексу України, Правил реєстрації цивільних повітряних суден в Україні, Положення про використання повітряного простору України, Правилами польотів повітряних суден та обслуговування повітряного руху в класифікованому повітряному просторі України.

«Безпілотних повітряне судно» визначається там як повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюється за допомогою спеціальної станції керування, розташованої поза повітряного судна.

Такі БПЛА повинні перебувати в Реєстрі цивільних повітряних суден України. Однак, БПЛА, максимальна злітна вага яких не перевищує 20 кілограмів і які використовуються для розваг та спортивної діяльності не вимагають реєстрації.

Як і іншим цивільним повітряним суднам, зареєстрованим БПЛА заборонено здійснювати польоти в певних зонах, а саме: захищених (урядові будівлі, промислові об'єкти), з обмеженим доступом (військові, прикордонний контроль, дослідні станції і т.п.) або зарезервованими для інших літальних об'єктів. Користувачі, зацікавлені в специфічних зонах, повинні направляти запит до Державного підприємства обслуговування повітряного руху України.

Підсумовуючи, можна сказати, що є чітке обмеження використання дронів на великих висотах, де вони можуть порушити узгоджені маршрути літаків і інших повітряних суден. Навпаки, дрони, які важать менше 20 кг, не вимагають реєстрації або будь-якого дозволу на польоти від державних органів. Більш того, немає обмеження на використання безпілотників в містах для особистих потреб, крім як в стратегічно важливих для держави зонах з обмеженим доступом.

### 1.3.2 Останні нововведення в законодавстві

У травні 2016 року Державна авіаційна служба України оприлюднила проект Концепції Положення і процедур щодо забезпечення безпеки польотів повітряних суден авіації загального призначення, спортивних, аматорських і безпілотних літаків. Хоча підготовка проекту Положення мала завершитися до кінця 2016 року, але була відкладена більш ніж на рік. Проте, зміст даного проекту показує, що законодавець має на меті помістити всі БПЛА в чітке правове поле.

Документ складається з наступних частин:

- класифікація та реєстрація БПЛА;
- навчання і сертифікація персоналу;
- медичні вимоги до операторів, інтеграція БПЛА в загальну систему повітряного руху;

- Ліцензування та сертифікація операторів БПЛА для комерційного використання, страхові питання;

- Моніторинг та забезпечення безпеки діяльності БПЛА.

Дані положення дублюють відповідні норми Резолюції Європейського парламенту щодо безпечного використання так званих «дистанційно пілотованих літальних систем (ДПЛС)», відомих як «безпілотні літальні апарати (БПЛА)», в сфері цивільної авіації. З іншого боку, схоже що Проект відповідає Конвенції про міжнародну цивільну авіацію, яка зобов'язує держави забезпечувати безпечні умови для цивільних повітряних суден в зонах, де використовуються безпілотники.

Пізніше, в серпні 2016 року, Авіаційна служба підготувала короткі і загальні рекомендації по використанню безпілотників. Якщо говорити коротко, то вони дуже схожі на рекомендації Європейського агентства з безпеки авіації та відповідної служби Об'єднаного Королівства. Ці положення визначають права і обмеження для операторів безпілотників.

Однак, як уже зазначалося, це лише рекомендації і, відповідно, вони не є обов'язковими для виконання. З огляду на нинішні світові практики, ці положення швидше за все складуть базу для нового законодавства, яке зараз розробляється.

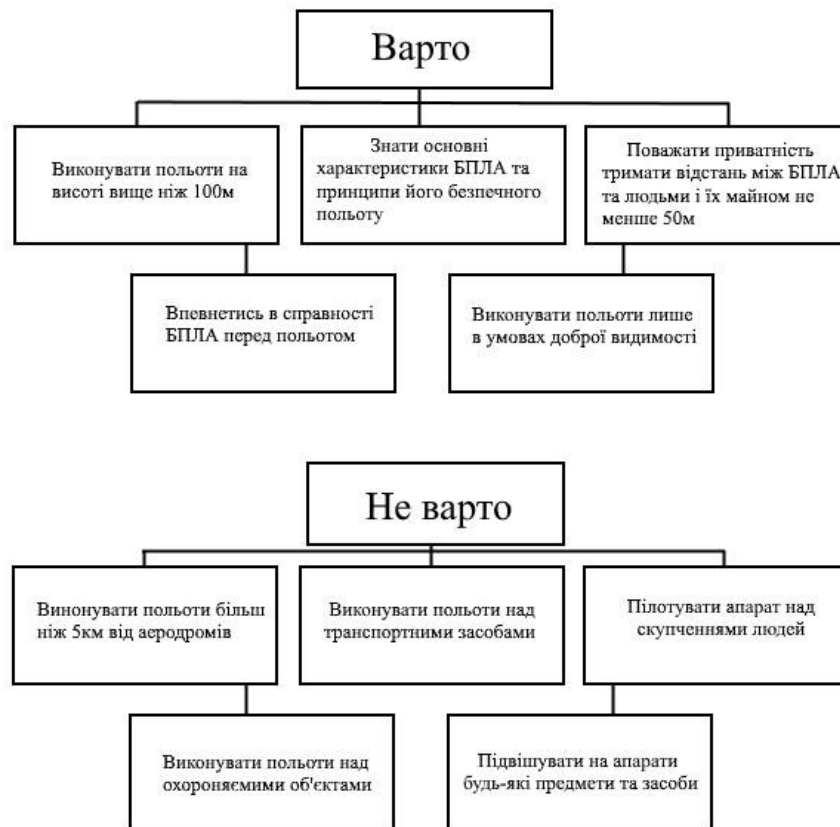


Рисунок 1.1 - Загальні рекомендації

Проте концепція регулювання напряму безпілотних повітряних суден була представлена в якості бази для публічного обговорення. Залежно від

специфікацій дронів, їх використання також буде мати чотири різних види вимог для пілотів і умов польоту.

Ми не знаємо як буде виглядати регулювання дронів в Україні в найближчому майбутньому. Однак, ми точно знаємо, що відсутність належного фінансування може бути суттєвим фактором впливу на всю концепцію регулювання БПЛА в Україні. Більш розвинені системи, на кшталт створення онлайн-бази для відстеження та управління рухом дронів або технологія «виявлення і попередження», вимагають великих ресурсів.

Отже, українські служби спробують знайти консенсус з побудови простий, але функціональної системи. З цієї точки зору, логічним для органу регулювання цивільної авіації було б розділити імплементацію регулювання БПЛА на два етапи (реєстрація та інтеграція в загальну повітряний простір).

Давайте спробуємо передбачити, як українська система буде відповідати на нинішні потреби, враховуючи Концепцію та зарубіжний досвід. Нижче я опишу кілька важливих аспектів регулювання дронів.

#### Реєстрація:

Попросту кажучи, дрони йдуть тим же шляхом, який раніше пройшли автомобілі, щодо реєстрації. Як було зазначено вище, вага, швидкість і можливу шкоду є ключовими параметрами, визначальними необхідні кроки реєстраційного процесу. Я сподіваюся, що така реєстрація буде створена у вигляді простої, швидкої і зручної онлайн-платформи.

#### Використання:

На сьогодні, прольоти над автомобілями, людьми і під час масових заходів прямо не забороненими, але, швидше за все, оператори втратять частину таких прав. Більш того, дрони вважаються товаром подвійного призначення. Як результат, кожен імпортований дрон або дрон місцевого виробництва будуть перевірятися на військовий потенціал. І дійсно, розвиток технологій показує, що на сьогодні грань між військовим і цивільним дроном є тонкою. Зокрема, ми можемо згадати небезпечне використання безпілотників в Японії, Іраку і Україні, коли російські безпілотники здійснювали диверсії на військових базах, використовуючи горючі матеріали для знищення техніки.

Широкий перелік зацікавлених сторін, що включає виробників, агрокомпанії, Міністерство оборони і правоохоронні органи, Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, Державну авіаційну службу України, дає можливість лобювання своїх позицій по використанню безпілотників. З одного боку, з огляду на поточну ситуацію з триваючою війною з Росією і сепаратистами на сході України, Міністерство оборони і Служба безпеки разом з Авіаційної службою лобюватимуть більш консервативні пропозиції, які можуть перенаситити ринок безпілотників регулюваннями, включаючи нагляд за БПЛА і їх польотами, занадто широкі площі і переліки об'єктів, де використання безпілотників буде заборонено. На противагу цьому, хоча фізичні особи та бізнес розуміють подібну стурбованість, вони будуть виступати за прості процедури для малих і безпечних дронів і не дуже складні регулювання - для великих[3].

На відміну від російського, білоруського та тайського досвіду обмежує регулювання БПЛА, Україні слід прагнути до збалансованої системи, стимулювати використання і виробництво вітчизняних безпілотників, але гарантувати їх безпечне використання всім зацікавленим сторонам.

#### Страховання:

Проблемна ситуація склалася в США і викликала велику стурбованість у державних чиновників через можливе ушкодження об'єктів власності і здоров'я людей. Наприклад, такі компанії як Unmanned Risk Management, CoverDrone і AIG почали надавати страхові послуги операторам безпілотників. Таким чином, необхідність страхувати дронів не стане новинкою для ринку. Схоже, що держава надасть свободу сторонам у формуванні положень таких договорів, зокрема щодо втрати або пошкодження БПЛА і відповідальності за шкоду, заподіяну третім особам.

Загалом, умови страхування можуть варіюватися в залежності від рівня потенційного ризику для БПЛА (низький, середній, високий). За умови надання страхового випадку важливими фактами можуть бути: стан здоров'я операторів, проведення передпольотної перевірки, доступність журналу польотів. Більш того, не менш важливим є розгляд внесення положення про злом або крадіжці.

#### Конфіденційність та інформація:

Очевидно, що зараз приватне життя має невисокий рівень визначеності і захисту, враховуючи камери спостереження держорганів, мобільні фото і відео, онлайн-стрім, але дрони мають навіть більше можливостей. Проблема безпілотників відкрила досить чутливу тему практичного здійснення її захисту. Дрони можуть бути непомітними протягом тривалого часу і збирати багато чутливої інформації, включаючи перелік локацій, звуки і, звичайно, особи людей. Більш того, особа, чиї права були порушені, не має можливості визначити порушника і його наміри. Цікавий приклад омели місце в США, де людина дізналася, що дружина йому зраджує.

Такого роду збір і обробка даних призводять до висновку, що межа між стеженням і зоною приватності є на сьогодні невизначеною. Відповідно, хоча б з технічної і юридичної сторони, слід прийняти спеціальні норми регулювання щодо збереження і видалення інформації, обробленої дронами. Державні органи повинні надати програми «запиту і видалення», що відповідають на повідомлення громадян та зберігати інформацію не довше ніж зазвичай необхідно.

З огляду на, що завданням Служби є забезпечення безпечних польотів, ця Державна служба є менш зацікавленою в проблемах приватності і захисту даних, а отже їх не уникнути. Однак, доцільно передбачити, що виробники і оператори безпілотників скоро повинні будуть зважати на вимоги інших державних служб і регулювань, включаючи Закон України "Про захист персональних даних", а також Директиву щодо захисту інформації та Директиву 95/46 / ЄС.

#### Правоохоронна діяльність:

Концепція регулювання дронів визначає, що правоохоронні органи будуть залучені до моніторингу діяльності БПЛА. За кордоном в деяких американських

містах, поліція використовує дронів для зниження рівня злочинності за допомогою дронів, які патрулюють міські райони 24 години в день і 7 днів на тиждень. Без сумніву цілком доцільно використовувати безпілотні судна для природоохоронних агенцій, прикордонних патрулів для фіксування злочинів.

Однак, я не вважаю за доцільне прискорене впровадження використання дронів для державного нагляду в Україні, в тому числі правоохоронними органами. Використання безпілотників в кримінальних процедурах видається сумнівним через високого ризику неправильного використання і порушення приватності через корумпованість або політичних мотивів.

Підсумовуючи, можна сказати, що дрони представили широкий перелік питань для нашого суспільства. Я сподіваюся, що новий закон або закони не будуть обмежуватися лише першим рівнем регулювання, покривати базову реєстрацію, сертифікацію та основні аспекти використання дронів. Якщо Україна хоче змінити становище в цій галузі, їй також слід вирішити відповідні проблеми, включаючи технічні вимоги до дронів, приватність і захист інформації. Україна недавно стала першопрохідцем у впровадженні технології блокчейна в систему державних послуг. Тепер є можливість того, що дрони стануть ще одним приводом голосно заявити про Україну всьому світу.

### 1.3.3 Положення ІКАО відносно інтеграції БПЛА

На тринадцятій аеронавігаційній конференції було обговорені та описані можливості і проблеми, пов'язані з експлуатацією дистанційно пілотованих авіаційних систем (ДПАС). У ньому також представлена поточна і майбутня діяльність ІКАО з розробки нормативної бази на підтримку інтеграції дистанційно пілотованих повітряних суден (ДППС) в несегрегований повітряний простір і на аеродромах.

Відповідно до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію (Doc 7300), будь-яке повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, називається "Безпілотним повітряним судном". В даний час такі повітряні судна називають не "Pilotless", а "unmanned". Діапазон безпілотних повітряних суден дуже широкий: від метеорологічних аеростатів у вільному польоті до дуже складних повітряних суден, дистанційно пілотованих мають свідоцтва авіаційними фахівцями. Останні відносяться до категорії, званої дистанційно пілотованими повітряними судами (ДППС), і є частиною дистанційної пілотованої авіаційної системи (ДПАС). Таким чином, ДПАС складається з ДПВС, пункту дистанційного пілотування (RDS), лінії управління та контролю (C2) і будь-яких інших елементів, зазначених у затвердженому конструкції типу. Малі безпілотні повітряні судна, зазвичай звані "дронами", розглядаються в робочому документі AN-Conf / 13-WP / 5.

ДПАС, що мають широкий спектр можливостей і рівнів складності, являють собою зростаючу галузь, яка має значними експлуатаційними можливостями та економічним потенціалом. Однак, через стрімкий розвиток пов'язаних з ними технологій, проектних рішень та експлуатаційних концепцій держави змушені

вирішувати проблеми безпечної та ефективної інтеграції ДПАС в повітряний простір, в якому вже функціонує жорстко регульована і добре розвинена галузь пілотованої авіації. У цьому контексті ІКАО необхідно приділяти першочергову увагу розробці стандартів і рекомендованій практики (SARPS) для ДПАС.

Відповідно до додавання 4 додатка 2 "Правила польотів" ДППС, виконують міжнародні польоти, повинні відповідати вимогам, визначеним Чиказькою конвенцією. Це означає, що вони повинні мати спеціальний дозвіл від всіх відповідних держав, сертифікат експлуатанта і сертифікат льотної придатності. Крім того, ДПВС повинні відповідати вимогам в галузі зв'язку, навігації та спостереження (CNS); зовнішні пілоти зобов'язані мати свідоцтва; повинні представлятися плани польоту.

Характерною особливістю нормативної бази для безпілотної авіації є те, що автоматичне визнання свідоцтв та ліцензій пілота, передбачене Статтею 33 Чиказької конвенції, не поширюється на зовнішніх пілотів. Для заповнення цієї прогалини бажано прийняти Стандарт про взаємне визнання. Крім того, будуть потрібні новаторські рішення для дотримання вимог, пов'язаних зі свідченнями, посвідченнями та бортовими журналами, які повинні знаходитися на борту відповідно до статті 29 Чиказької конвенції.

Адаптація має на увазі обставини, в яких ДППС може виконувати політ в повітряному просторі на основі домовленості або за підтримки, що компенсує його нездатність повністю відповідати існуючим експлуатаційним параметрам. Під інтеграцією розуміється майбутнє, в якому поява ДППС в системі повітряного простору буде носити штатний характер і не потребують застосування особливих процедур службами управління повітряним рухом. Для забезпечення інтеграції буде потрібно розвиток технологій ДПАС, а також розробка і впровадження узгоджених SARPS і Правил аеронавігаційного обслуговування (PANS).

Держави повинні підтримувати постійні зусилля ІКАО з розробки SARPS, PANS і відповідного інструктивного матеріалу для інтеграції ДППС в несегрегірованное повітряний простір. ІКАО не зможе підтримувати такий темп розробки положень без цільової фінансової або кадрової підтримки з боку держав і галузі. Крім того, державам пропонується надавати ресурси для підтримки інформаційно-просвітницької роботи ІКАО, наприклад, регіональних симпозіумів та рактикумів, присвячених ДПАС, а також заходів щодо впровадження. Щоб заповнити прогалину в даних про DAA і лінії C2, державам слід активно взаємодіяти із зацікавленими сторонами в галузі для збору і аналізу даних, які будуть підтримувати процес озробки SARPS, які відповідають потребам галузі[4].



## 2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ

### 2.1 Аналіз існуючих методів та засоби виявлення БПЛА

Дедалі більше з кожним роком значення БПЛА в сучасному світі сприяє безперервній роботі щодо їх удосконалення. Нові завдання, поліпшення тактико-технічних характеристик БПЛА, в тому числі, зменшення їх розмірів, ускладнює завдання по їх виявленню. У зв'язку з чим, виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (МБЛА) є пріоритетним завданням при створенні систем з протидії БПЛА. Предмет дослідження. Стаття присвячена одному з варіантів підвищення ефективності виконання завдання по виявленню МБЛА. Метод. Розглянуто фізичні особливості МБЛА, наявність яких ускладнює або полегшує завдання їх виявлення, і способи, що дозволяють це зробити. Основні результати. Проведено аналіз існуючих класифікацій МБЛА, методів їх виявлення на основі аналізу електромагнітного спектра і показана модель комплексного застосування технічних засобів для виконання поставленого завдання. Практична значимість. Представлена модель комплексного застосування заходів істотно підвищує ефективність виконання завдання по виявленню МБЛА.

Найбільшу вразливість МБЛА обумовлює наявність у них електромагнітного випромінювання.

До демаскуючих ознак ЕМХ належать:

- сигнали бортового відповідача;
- сигнали радіолокаційних станцій, відбиті від корпусу і агрегатів МБЛА;
- сигнали телевізійних ретрансляторів, ширококомовних станцій, базових станцій стільникового зв'язку, відбиті від МБЛА;
- команди і «доповіді» каналу управління між наземним пунктом управління і МБЛА, а також між МБЛА і супутником-ретранслятором системи навігації;
- сигнали бортовий РЛС бокового огляду;
- канали обміну розвідувальною інформацією;
- сигнали системи автоматичної посадки на аеродром.

Основними способами виявлення МБЛА в електромагнітному спектрі є: - використання тепловізора інфрачервоного діапазону ЕМХ;

- використання камер оптичного діапазону ЕМХ;
- використання радіолокаційних станцій;
- здійснення радіомоніторингу.

Інформація для виявлення і подальшого пеленгування БПЛА може бути отримана шляхом прийому спеціальними засобами відбитої і випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектру електромагнітних і акустичних хвиль.

Будь-якому матеріальному об'єкту, в тому числі і БПЛА, притаманні демаскуючі ознаки, які виділяють його в навколишньому середовищі, роблячи його помітним для спостереження. В даний час ступінь помітності визначають

значенням його сигнатур в радіочастотний, інфрачервоному (ІЧ) і видимому діапазонах спектру, а також акустичної сигнатурою. Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури невеликого значення: їх виготовляють з композитних матеріалів і пластика зі спеціальним забарвленням і особливою комбінацією шарів, невеликі бензинові або електричні двигуни випромінюють мало тепла і працюють майже безшумно. Значна різноманітність можливих варіантів побудови і використання засобів спостереження в кожному з зазначених діапазонів обумовлює труднощі оцінювання їх ефективності.

### 2.1.1 Акустичний канал

Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонійними і широкосмуговими складовими. Він включає в себе гармонійні складові випромінювання двигуна, шуму обертів гвинта, випромінювання механічної природи, а також високочастотну і низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними по частоті спектрами. В шумі силової установки БПЛА, має поршневий двигун повітряного охолодження, при відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Проблема виявлення малих літальних апаратів (МЛА), інша назва дрони, пов'язана з їх низькою помітністю, як в електромагнітному, так і в акустичному діапазонах довжин хвиль. Виявлення ускладнюється особливістю траєкторії польоту, а саме висотою, яка може змінюватись від одиниць до десятків метрів, та динамікою руху — від зависання до прискорення в довільному напрямку. Використання радіолокації дозволяє виявляти дрони на відстані до 1000м на відкритих територіях. Акустичні методи спостереження забезпечують виявлення в умовах складного рельєфу та наявності зелених насаджень. Вибір алгоритму детектування залежить від характеристик звукового випромінювання МЛА. Звук, що випромінюється дронами, має тональні складові випромінення пропелерів та широкосмуговий шум випромінювання механічного походження.

На рисунку 1 приведено типовий спектр випромінення, чотиримоторного дрона – квадрокоптера, з двома лопатями на осі кожного двигуна. Звук випромінення пропелера залежить від частоти обертання ротора двигуна та кількості лопатей на його осі. Спектр випромінення періодичний, має явно виражені дискрети, частота яких змінюється в залежності від кількості обертів двигуна. Частоти  $f_i$  максимумів спектру можна оцінити знаючи частоту обертання електродвигуна  $f_0$  та кількість лопатей  $N$  пропелера для значень  $i = 1, 2, 3 \dots$

$$f_i = N f_0 i \quad (2.1)$$

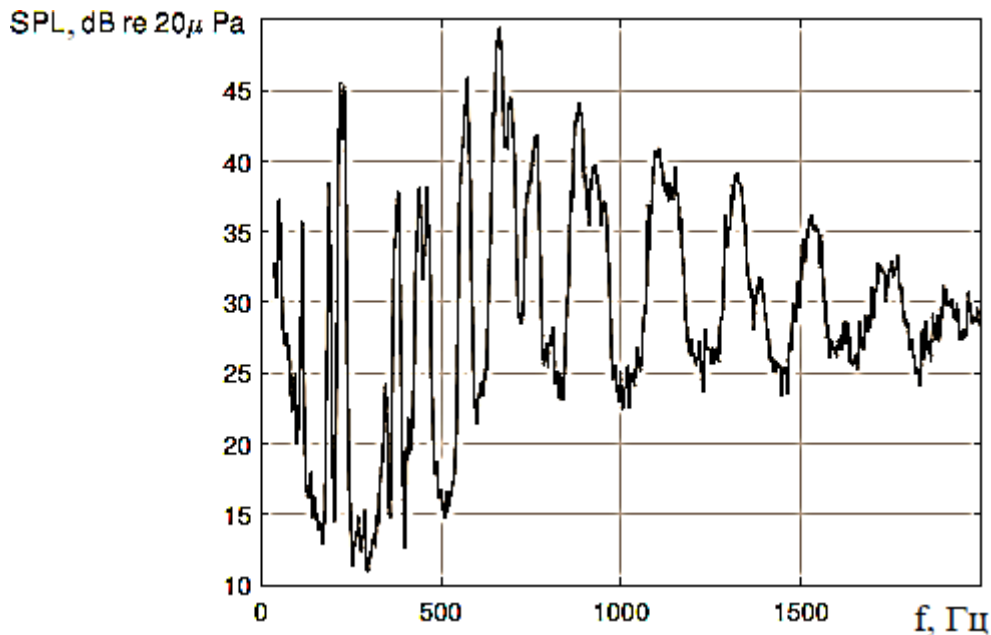


Рисунок 2.1 - Спектр випромінення чотиримоторного дрона

Спектр дрона має декілька близьких дискрет, положення яких на осі частот змінюється у часі. Пояснюється це тим, що електродвигуни обертаються з різною швидкістю, яка залежить від режиму польоту та вітрового навантаження. У польоті вітрове навантаження на пропелери змінюється випадково. Величина та частота звукового випромінювання змінюються теж випадково та може розглядатись як широкосмуговий шумовий процес з гармонічними компонентами. Аеродинамічні шуми обтікання корпусу дрона мають низькочастотну та високочастотну складові. Шуми обтікання, як стверджується в роботі, мають низький рівень звукового тиску та суттєво залежать від аеродинаміки літального апарата, тому для виявлення дронів не використовуються. В результаті експериментальних досліджень акустичних характеристик квадрокоптера було встановлено широкосмугову шумову складову і багатокомпонентну гармонійну структуру випромінювання в діапазоні частот до 10кГц. Значення амплітуди і фази гармонік змінюються випадково і при відсутності руху квадрокоптера. Це пояснюється деяким розходженням режимів роботи двигунів в процесі компенсації автоматикою безпілотного літального апарату вітрового впливу. Автори запропонували розглядати акустичне випромінювання як широкосмуговий випадковий процес з відповідним енергетичним спектром, а інформаційними параметрами вибрати його спектральні коефіцієнти. В залежності від вибраної моделі шуму випромінювання для детектування дронів використовують різні способи. В роботі для локалізації МЛА запропоновано мікрофонний масив із чотирьох мікрофонів в формі тетраедра. Кутіві координати (азимутта кут підвищення)

визначались по часу затримки хвиль прийнятих мікрофонами. Час затримки встановлювався по піку взаємнокореляційної функції (ВКФ) між сигналами мікрофонів. Недоліком способу локалізації є велика кількість операцій по обробці інформації.

Спосіб локалізації МЛА масивом з 24 мікрофонів, що розташовані на поверхні землі. Алгоритм виявлення зводився до синтезування характеристики спрямованості з кутом розкриття 10 та огляду простору в секторі кутів +/-450.

Результат виводився на дисплей у вигляді траєкторії руху об'єкта в координатах: кут приходу хвилі – час. Недоліком пристрою є застосування лінійки мікрофонів, налаштованої на частоту 700 Гц, для просторової обробки широкосмугового акустичного випромінювання в діапазоні частот 450 Гц -3000 Гц.

Застосування двох лінійних масивів з 8 мікрофонів кожний, розташованих ортогонально та налаштованих на прийом хвиль з частотою нижчою 500 Гц, дала змогу забезпечити круговий огляд простору на відстані до 2 км. Використавши некогерентну обробку декількох гармонійних складових в смузі частот 100 Гц–200 Гц, вдалось побудувати зображення траєкторії руху об'єкту з високою кутовою роздільною здатністю і малим спотворенням. Реалізація приведених вище способів виявлення та локалізації МЛА потребує багатoelementних мікрофонних масивів, дорогого апаратного та програмного забезпечення. Більш простими є акустичні детектори з одним мікрофоном. Вони дають можливість виявити, але не локалізувати об'єкт. Незважаючи на невелику відстань виявлення детектора, розгортання декількох детекторів дозволяє сформувати акустичний бар'єр і, таким чином, виявити і локалізувати дрон на основі обраної геометрії бар'єра.

Вдосконалення методів акустичного детектування і прогнозування максимальної відстані надійного виявлення МЛА є актуальною проблемою.

Для виявлення малих літальних апаратів по акустичному випромінюванню використано приймач за схемою типового каналу виявлення. Прогноз МВВ суттєво залежить від рівня випромінювання МЛА та акустичних завад в зоні прийому. Важливим фактором оцінки відстані є метеорологічна ситуація, а саме розподіл температури повітря з висотою та напрям руху повітряних мас. Тому алгоритм слід вдосконалити з урахуванням метеорологічної ситуації.

Загалом, основною проблематикою використання акустичного каналу є велика кількість перешкод і особливостей пошуку БПЛА що також впливає на дальність та точність знаходження пристрою що складає близько 2 кілометрів[5].

### 2.1.2 Інфрачервоний канал

Для виявлення об'єктів з відмінною від навколишнього середовища температурою використовуються інфрачервоні тепловізійні камери, що дозволяє вести спостереження за допомогою за МБЛА навіть в умовах обмеженої видимості і в темний час доби. Для отримання найбільш інформативних і стабільних результатів можливо точне сполучення тепловізійних знімків з

видимим зображенням. Для цього застосовується тепловізор і фотокамера для одночасного ведення аерофотозйомки у видимому діапазоні. Отримувані інфрачервоні зображення у відтінках сірого можуть бути перетворені в псевдоцветной, де темним відтінкам відповідають низькі температури, а світлим - високі.

Для того, щоб перевірити здатність недорогого теплового інфрачервоного датчика виявляти малі БПЛА, що летять у повітрі, ми вибрали три БПЛА різних розмірів та конфігурацій на 100-метровій випробувальній доріжці. Метою було визначити, на якій відстані БЛА можна виявити, не намагаючись їх ідентифікувати. БПЛА здійснювали польоти приблизно на 10 м над рівнем землі та зі стабільною швидкістю близько 2 м/с. Випробування проводили відносно теплої літньої ночі (26°C) при ясному небі та без вітру. Місцевість багатокутника була трав'янистою, без значних джерел тепла та без будь-яких джерел світла. Тест проводили більше ніж через 2 години після заходу сонця.

Під час тестування були отримані зображення з інфрачервоного датчика в ході аналізу яких Ми визначили, що батареї є основними джерелами тепла, тоді як двигуни та електронні регулятори швидкості (ESC) створюють набагато менший тепловий слід. Хоча очікувалося, що двигуни будуть основними джерелами тепла через найбільше споживання енергії, їх видимість в тепловому спектрі була зменшена, оскільки вони дуже добре охолоджувались завдяки швидкій циркуляції повітря. Деякі внутрішні компоненти двигуна можуть досягати особливо високої температури, але це не було виявлено ззовні. Крім того, їх поперечний переріз був дуже малим, якщо дивитись здалеку. Акумулятори, навпаки, великі, громіздкі, укладені в основний корпус БПЛА, отримуючи лише помірну циркуляцію повітря, і, таким чином, їх легко розпізнати в тепловізорі. Якщо все тіло БЛА закрито, наприклад, з Parrot AR.drone 2 і Phantom 4, температура зростає ще більше.

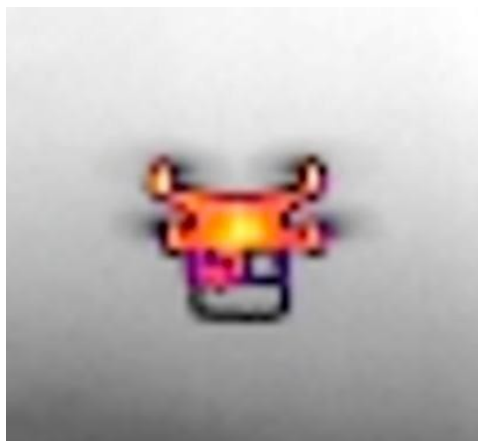


Рисунок 2.2 - Теплове зображення DJI Phantom 4

Кожен БПЛА пролітав два рази вздовж випробувальної доріжки, починаючи від датчика і закінчуючи на межі виявлення. Межа виявлення була досягнута, коли датчик не міг більше сприймати БПЛА, що зазвичай траплялося, коли БЛА займав лише один піксель на зображенні. Для Parrot AR.drone 2 межа виявлення становив в середньому 41 м, для Phantom 4 - 51 м, а для гексакоптера - за лінію 100 м тестової доріжки. Ці відстані коротші за теоретичну межу виявлення, розраховану на основі специфікацій датчиків, які становлять 66 м, 53 м та 137 м відповідно. Однією з можливих причин є орієнтація БПЛА щодо датчика, який не був ідеальним (найдовша вісь БЛА повинна бути ортогональною напрямку осі датчика). Інша причина - це, ймовірно, охолодження зовнішніх частин БПЛА через швидку циркуляцію повітря[6].

### 2.1.3 Оптичний канал

Оптичне виявлення БПЛА дуже залежить від факторів середовища. Підвищення дальності викриття досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку. Тому візуальні сенсори є неефективними пристроями для здійснення пошуку. При надходженні зовнішніх цілевказівок від більш ефективного пошукового засобу оптичні сенсори можуть бути ефективно використані для супроводження БПЛА.

Оскільки безпілотники є значно меншими за пілотовані засоби, то це ускладнює їх виявлення за допомогою оптичних засобів. Порівняно з літаком контрастність БПЛА відносно фону є меншою через відсутність світлових маяків, зменшений факел малого двигуна і меншу поверхню відбиття.

Критерії, що визначають здатність оптичних пристроїв спостереження виявляти повітряні об'єкти в чистому небі або на фоні хмар, включають:

- розмір і форму об'єкта;
- контрастність на фоні хмар і гостроту країв контрасту. Контрастність  $C$  визначають як відношення різниці освітленості між об'єктом та фоном до освітленості фону

$$C = (B - B_1) / B_1 = \Delta B / B_1, \quad (2.2)$$

де  $B$  – освітленість об'єкта, кд/м<sup>2</sup>;

$B_1$  – освітленість фону, кд/м<sup>2</sup>.

Якщо освітленість фону й об'єкта однакові, то останній виявити неможливо.

Освітленість об'єкта залежить ще й від його форми та текстури поверхні, а також відбитого атмосферою світла, що є непередбачуваним. Прогнозування виявлення об'єкта за допомогою оптичних засобів є дуже складним, можливі лише деякі наближення залежно від розміру, форми і кутової швидкості об'єкта відносно точки спостереження на землі. Об'єкт з великими розмірами за інших рівних умов виявляється простіше;

- вплив атмосфери. Вміст водяної пари в атмосфері або її забруднення (крім погіршення видимості для наземних оптичних засобів) також підвищують рівень освітленості об'єкта через відбиття вгору сонячних променів;

- будь-який рух об'єкта, час спостереження;

- виблискування об'єкта є результатом відбиття сонячних променів від блискучих поверхонь, особливо зі скляним покриттям.

Імовірність виявлення об'єкта, що знаходиться всередині миттєвого поля зору, залежить від контрасту та його розмірів. Під час пошуку об'єкта його форма не відіграє важливої ролі, а має значення лише його площа в межах співвідношення сторін 1:10, характерного для компонок БПЛА. Дальність виявлення майже ніколи не перевищує деякого максимального значення  $R_{\max}$ , що відповідає найбільш сприятливому поєднанню ізичних умов спостереження. При цьому закон розподілу дальностей виявлення найбільш повно характеризує засоби й умови спостереження.

Дальність виявлення оптичними системами визначають за таким виразом

$$R = \sqrt{\frac{B_{\lambda} S_{\text{ц}} \gamma_{\text{ц}} S_{\text{нр0}} \Delta\lambda \tau_{\text{нр0}} \tau_{\text{ср0}}}{4\pi P_{\text{нр0}}}}, \quad (2.3)$$

де  $B_{\lambda}$  – спектральна щільність випромінювання поверхні цілі  $\text{ц}$   $S$  за рахунок освітлення її сонцем,  $10^6 \cdot \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{ср}$ ;

$S_{\text{ц}}$  - ефективна поверхня відбиття цілі в оптичному діапазоні,  $\text{м}^2$ ;

$\gamma_{\text{ц}}$  - коефіцієнт відбиття поверхні цілі;

$S_{\text{нр0}}$  - ефективна площа об'єктива, на яку падає випромінювання  $\text{м}^2$ ;

$\Delta\lambda$  - смуга пропускання оптичного фільтра,  $10^{-6} \cdot \text{м}$ ;

$P_{\text{нр0}}$  - смуга пропускання оптичного фільтра,  $10^{-6} \cdot \text{м}$ ;

$\tau_{\text{нр0}}$  - коефіцієнти пропускання приймального пристрою;

$\tau_{\text{ср0}}$  - коефіцієнти пропускання середовища відповідно.

#### 2.1.4 Радіолокаційний канал

Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій (РЛС) досить продуктивний, оскільки вони мають відносно великий імпульсний об'єм пошуку і значну дальність виявлення. Проте РЛС можуть бути визначені противником за власним випромінюванням. Радіолокаційне виявлення БПЛА буде прийнятним лише тоді, коли не ставляться вимоги до прихованості роботи чи високої мобільності. Більшість БПЛА виготовляють з композитних матеріалів, які досить погано відбивають електромагнітні хвилі. Радіохвилі проникають через поверхню безпілота і лише частково відбиваються від неї.

Розробники БПЛА намагаються уникнути відбивання зондуючих імпульсів РЛС у напрямку приймача. Як і у видимому діапазоні частот, безпілотники мають переваги порівняно з пілотованою авіацією, що полягає в менших розмірах (менша площа відбивання) і відсутності необхідності розміщення екіпажу, тобто форма фюзеляжу може змінюватися в більш широких межах.

Для зменшення рівня відбитого сигналу у напрямку приймача РЛС розробники БПЛА в переважній більшості випадків використовують такі підходи:

- виготовлення відповідних поверхонь БПЛА з радіопрозорих матеріалів, наприклад кевлару, або скляних композиційних матеріалів, що використовують для виробництва обтікачів антен РЛС. Такий метод рідко може бути ефективним, за винятком випадку дуже малих БПЛА з тонким покриттям крил. Частина відбитої енергії зростає зі збільшенням товщини шару покриття до величини близько 15 мм залежно від матеріалу покриття. Такі матеріали, звичайно, не можуть використовуватися для покриття металевих або інших компонентів, оскільки не лише відбиватимуть радіосигнали, а навіть підсилюватимуть їх;

- покриття зовнішніх поверхонь літального апарата радіопоглинальними матеріалами, які зазвичай складаються із шарів піни, є досить об'ємними, крихкими і можуть значно збільшувати вагу безпілотника. Інша проблема полягає в тому, що такі матеріали поглинають електромагнітну енергію в обмеженій смузі частот. Сигнал з частотою, що знаходиться поза межами смуги поглинання, досить добре відбивається;

- виготовлення літального апарата такої форми, яка сприятиме відбиттю радіолокаційних сигналів у бік, протилежний РЛС. Це найбільш ефективний метод, що найчастіше використовують для зменшення відбивальної здатності БПЛА, оскільки його форма не обумовлюється потребами екіпажу, проте є обмеженою стосовно компромісу між вимогами щодо аеродинамічних властивостей та радіолокаційної помітності. Оскільки ціль зазвичай знаходиться під малим кутом місця відносно РЛС, то найбільш критичними є вертикальні поверхні (стабілізатори) та поверхні, що перетинаються під прямими кутами, оскільки вони діють як кутові відбивачі й можуть давати потужні відбиті сигнали[7].

Контроль та ведення РЛР повітряного простору за допомогою РЛС є досить широко поширеним і традиційним способом виявлення повітряних цілей комплексами ППО. Виявлення засобами РЛР є ефективним в тому випадку, коли радіолокаційна помітність мети відповідає роздільній здатності РЛС. показником радіолокаційної помітності мети є її ефективна площа розсіювання (ЕПР). Незважаючи на те, що показник ЕПР має розмірність м<sup>2</sup> він не є геометричною площею, а є енергетичною характеристикою, тобто являє собою коефіцієнт, який враховує відображають властивості мети і залежить від просторової конфігурації цілі, електричних властивостей її матеріалу і відносини лінійних розмірів мети до довжини хвилі.



$$\sigma = (\xi P_{\text{отр}})/E_1 = (\xi D_0 P_{\text{рас}})/E_1 = \xi S D_0, \quad (2.4)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт деполяризації вторинного поля ( $0 \leq \xi \leq 1$ );

$P_{\text{отр}}$  – потужність відбитого від цілі сигналу, Вт ;

$E_1$  – щільність потоку енергії радіолокаційного сигналу на сфері радіусом рівним дальності до мети, Вт·м<sup>2</sup>;

$D_0$  - значення діаграми зворотного розсіювання в напрямку на РЛС;

$S$  - повна площа розсіювання цілі, м<sup>2</sup> .

У радіолокаційних задачах розпізнавання та класифікації цілей зазвичай користуються радіолокаційним портретом повітряної цілі (так званої сигнатурою), який пов'язаний з геометричними, фізичними і кінематичними властивостями мети.

Таблиця 2.1 - Можливості різних типів засобів розвідки при вирішенні завдань, ідентифікації та супроводу малих БПЛА

Характеристика	Радіо		Оптичні			Акустичні
	Засоби РЛР (РЛС)	Засоби РРТР	Засоби ОЕР у видимо-му діапазоні	Засоби ОЕР у ІЧ-діапазоні	Лазерні засоби	Засоби АР
Виявлення в денний час	+	+	+	–	+	+
Виявлення в нічний час	+	+	–	+	+	+
Виявлення в умовах природніх перешкод	+	+	+	+	+	+
Виявлення БПЛА серед природніх об'єктів (перш за все птахів)	–	+	–	–	–	±
Виявлення в складних природніх умовах	±	+	–	–	–	–
Ідентифікація БПЛА	–	+	±	±	–	+
Селекція одиночних та групових цілей	+	+(по різних каналам)	+	+	+	+(для БПЛА різних типів)
Супроводження та формування траєкторії	+	+(для багатопозиційної системи)	+	+	+	+(для багатопозиційної системи)
Дальність дії	вис	вис.	середн.	середн.	середн.	низьк.

Як об'єкти РЛР малі БПЛА характеризуються значенням ЕПР порядку  $0,05 \text{ м}^2 - 0,5 \text{ м}^2$ . При цьому, в більшості робіт для таких БПЛА приймається значення ЕПР рівну  $0,1 \text{ м}^2$ , яке, як показано в, є цілком достатнім значенням, що характеризує сигнатури БПЛА, на яких не використовуються спеціальні засоби зниження помітності, в тому числі - комерційних БПЛА типу «квадрокоптер». В роботі вказується, що розрахункові дальності для виявлення малорозмірних БПЛА з боку РЛС, що знаходяться на озброєнні формувань ППО, при різних значеннях ЕПР БПЛА складають для РЛС МХ діапазону:

- $8 \cdot 10^3 \text{ м} - 14 \cdot 10^3 \text{ м}$  для БПЛА з ЕПР близько  $0,1 \text{ м}^2$ ;
- $0,1 \cdot 10^3 \text{ м} - 1,5 \cdot 10^3 \text{ м}$  для БПЛА з ЕПР близько  $0,01 \text{ м}^2$ .

Для РЛС ДМХ діапазону:

- $9 \cdot 10^3 \text{ м} - 16 \cdot 10^3 \text{ м}$  для БПЛА з ЕПР близько  $0,1 \text{ м}^2$ ;
- $0,8 \cdot 10^3 \text{ м} - 2 \cdot 10^3 \text{ м}$  для БПЛА з ЕПР близько  $0,01 \text{ м}^2$ .

Для РЛС СМХ діапазону:

- $12 \cdot 10^3 \text{ м} - 25 \cdot 10^3 \text{ м}$  для БПЛА з ЕПР близько  $0,1 \text{ м}^2$ ;
- $1,4 \cdot 10^3 \text{ м} - 2,8 \cdot 10^3 \text{ м}$  для БПЛА з ЕПР близько  $0,01 \text{ м}^2$ .

При цьому в військах крім РЛС комплексів ППО є інші РЛС, призначені для ведення розвідки місцевості, спостереження за передвіженим солдатів і техніки, наведення автоматичної зброї на ціль в умовах обмеженої видимості, розвідки артилерійських позицій супротивника, корекції вогню власної артилерії (в тому числі за координатами разризов артилерійських снарядів). Передбачувані можливості таких РЛС по виявленню малорозмірних БПЛА з ЕПР  $0,01 \text{ м}^2$  можуть скласти від  $3,5 \cdot 10^3 \text{ м}$  до  $12 \cdot 10^3 \text{ м}$ .

Однак, як зазначається в роботі, якщо для БПЛА з ЕПР  $0,1 \text{ м}^2$  парні дані і фактичні результати полігонних випробувань по дальності виявлення практично збігаються, то для БПЛА з ЕПР  $0,01 \text{ м}^2$  фактичні дальності виявлення наближаються до нульових значень.

До додаткових факторів, що знижують рівень ЕПР БПЛА, потрібно віднести можливість швидкої зміни швидкісного режиму, аж до «зависання», що призводить до зриву супроводу БПЛА в зв'язку з виходом значення швидкості за кордону стробування по доплерівський зсув в алгоритмах селекції рухомих цілей (СДЦ) РЛС, а також використання в конструкції великої кількості радіопрозорих пластикових і композитних матеріалів.

На рисунку 2.3 показані типові рубежі виявлення гіпотетичного БПЛА (масогабаритні характеристики БПЛА побудовані на основі результатів пропрацювання статистичних даних про них) для РЛС з довжиною хвилі  $\lambda = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . При цьому розрахункові сигнатури БПЛА під різними відносними кутами перераховані на ЕПР пласкої фігури близькою до прямокутної. Діапазон ЕПР для використаних БПЛА склав  $0,05 \text{ м}^2 - 0,5 \text{ м}^2$ .

Як показано на рисунку 2.3, зменшення масогабаритних параметрів БПЛА до значень менше 5 кг призводить до суттєвого зменшення кордону їх пронаруження, а при використанні високої частки радіопрозорих (пластикових і композиційних) матеріалів в конструкції БПЛА робить їх виявлення за допомогою РЛС фактично неможливим. Таким чином, незважаючи на те, що

РЛС є досить надійним засобом контролю повітряного просторових ства, завдання виявлення та ідентифікації малорозмірних малоскоростной БПЛА з малими ЕПР залишається для них до сих пір невирішеною.

Узагальнюючи вищезазначене, можна зробити наступний висновок. Наявні сьогодні на озброєнні традиційні РЛС розвідки повітряного простору практично не здатні проводити ефективно виявлення малорозмірних малоскоростной повітряних цілей типу БПЛА навіть в беспомеховой обстановке. У переважній більшості РЛС ЗРК не будуть виявляти БПЛА з ЕПР близько  $0,01 \text{ м}^2$  і менше.

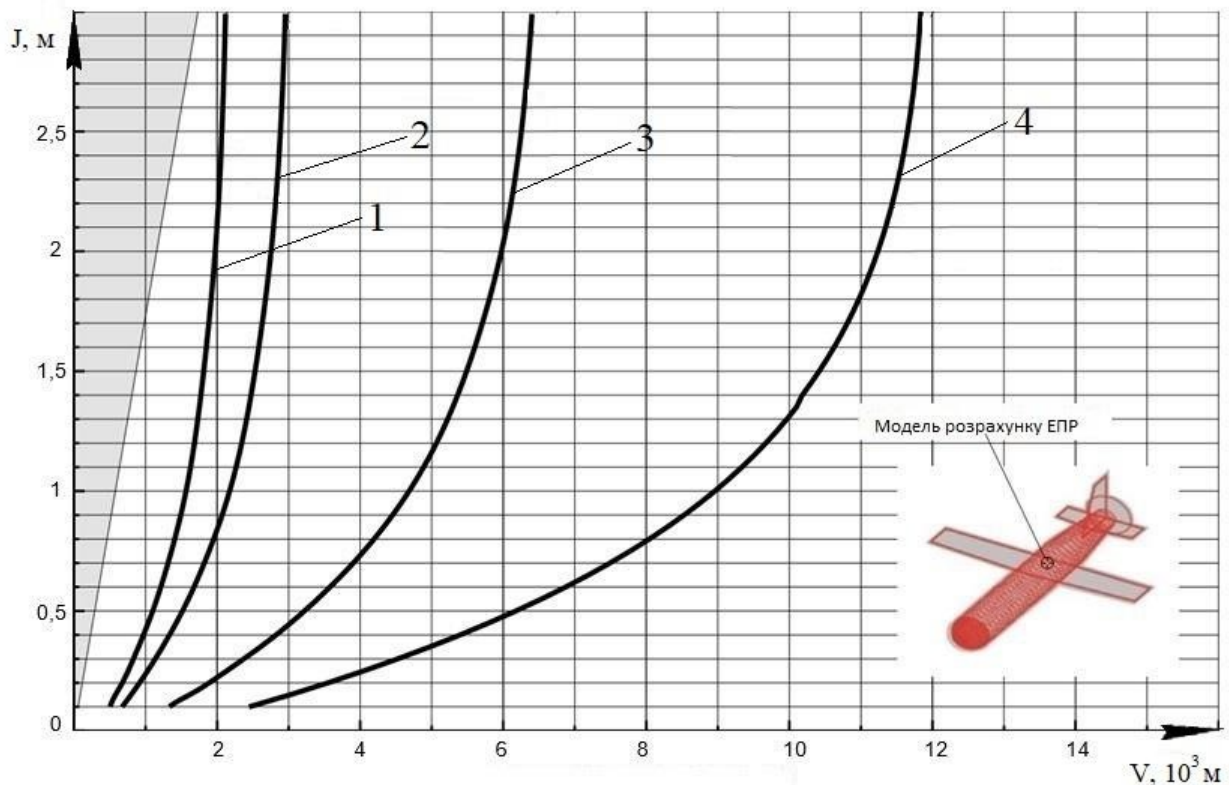


Рисунок 2.3 - Рубежі знаходження БПЛА з різними параметрами для РЛС с  $\lambda=3 \text{ см}$ :

- 1 – для ваги БПЛА 5кг; 2 – для ваги БПЛА 10кг;  
3 – для ваги БПЛА 50кг; 4 – для ваги БПЛА 200кг

Більш того, в умовах застосування противником різних перешкод засобам РЛР, виявиться, що навіть наявні можливості РЛС значно зменшаться. Фактичні ці дальності виявлення не поз- воля забезпечити участь ПУ в управлінні вогнем угруповань ППО при організації і веденні обстрілу малорозмірних БПЛА. Розробляються перспективні РЛС, призначені для вирішення завдання виявлення малорозмірних БПЛА, імовірно будуть здатні виявляти їх на дальностях що не перевищують 3-8 км на висотах польоту 100-300 м, і на дальностях 10-20 км на висотах до 1000 м. Ці дальності виявлення перспективних РЛС можуть бути задовільними для забезпечення своєчасного від- криття вогню і ведення ефективної стрільби по БПЛА тільки в разі якщо час реакції ЗРК, не перевищує декількох секунд.

## 3 ВИРІШЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ ТА АНАЛІЗ ПРАВИЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ

Кількість безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стрімко зростає щороку, а разом з ним і кількість пригод в людних місцях, на об'єктах державного значення, в зоні польотів літаків і вертольотів. Для регулювання повітряних польотів більшість країн світу розробляють правила використання та реєстрації дронів, а контроль за виконанням приписів покладають на авіаційну службу. У той же час виникає проблема недостовірного виявлення і вимірювання координат БПЛА існуючими військовими і цивільними засобами контролю повітряного простору. Малі розміри, композитні конструкції, відсутність літакового відповідача, відносно низька висота польотів сприяють їх невидимості при радіолокаційному, оптичному і акустичному зондуванні, особливо при поганих погодних умовах і вночі. Перспективним в даному випадку вважається інфрачервоний діапазон довжин хвиль, в якому випромінювання БПЛА практично неможливо зменшити або приховати. Але практичні виміри теплових контрастів інфрачервоними датчиками показали низьку дальність виявлення, високий рівень фонового випромінювання і необхідність наявності оператора для прийняття рішень. В результаті виникає протиріччя: з одного боку кількість несанкціонованих польотів постійно зростає, а засоби їх надійного виявлення практично відсутні. Для вирішення даної проблеми пропонується використовувати радіометричні системи.

Вимірювання параметрів власного і переотраженого радіовипромінювання в діапазонах X, K, Ka і W. Справа в тому, що літальні апарати, виконані з композитних матеріалів, мають низьку відбивну здатність і високий коефіцієнт випромінювання власне радіотеплового випромінювання, що значно перевищує випромінювання атмосфери. БПЛА з металізованими конструкціями перевідбивається температуру підстильної поверхні, яка також значно перевищує температуру фонового випромінювання неба. Одночасне використання CM і MM-діапазонів випромінювання дозволяє з одного боку підвищити точність і флуктуаційну чутливість, а з іншого - виконувати вимірювання при будь-яких погодних умовах в будь-який час доби.

У роботі пропонується синтезувати оптимальну структуру радіометричного об'єкту виявлення БПЛА на тлі випромінювання неба і атмосфери, досліджувати щільності вихідного ефекту об'єкту виявлення при різних умовах проведення експериментів і побудувати криві виявлення різних класів БПЛА за критерієм Неймана-Пірсона.

3.1 Синтез оптимального алгоритму виявлення приростів радіотеплового сигналу БПЛА на тлі внутрішніх шумів приймача і фонового випромінювання атмосфери

Завдання статистичного синтезу алгоритму виявлення контрастів радіозображень або збільшень яркостної температури досліджуваного об'єкта полягає в наступному: необхідно за прийнятою реалізацією на інтервалі часу  $t \in [0, \tau]$  прийняти рішення, чи з'явилося на вході приймача радіотеплового сигналу випромінювання БПЛА  $s_{UAV}(t)$  або присутній постійний сигнал

фонового випромінювання атмосфери  $s_{atm}(t)$  в суміші з шумами приймача  $n(t)$

Рівняння спостереження, яке описує сигнали на вході радіометра, має вигляд

$$u(t) = \varepsilon s_{UAV}(t) + s_{atm}(t) + n(t), \quad (3.1)$$

де  $\varepsilon$  – множник вказує на наявність і відсутність радіотеплового випромінювання БПЛА;

$s_{UAV}(t)$  - випромінювання БПЛА, К;

$s_{atm}(t)$  - постійний сигнал фонового випромінювання атмосфери, К.

Для визначення оптимального алгоритму прийняття рішення (оптимальну систему обробки спостережень  $u(t)$ ) скористаємося критерієм відношення функцій правдоподібності:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P(u|1)}{P(u|0)} &> \frac{P(0)}{P(1)} \\ \frac{P(u|1)}{P(u|0)} &< \frac{P(0)}{P(1)} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Для виразу (3.2) наведено скорочення:  $P(u | \varepsilon=1) = P(u | 1)$  та  $P(u | \varepsilon=0) = P(u | 0)$  – функцій правдоподібності,  $P(0)$  та  $P(1)$  – апіорні вірогідності відсутності і присутності радіотеплового випромінювання БПЛА.

Функції правдоподібності для безперервних випадкових процесів мають вигляд:

$$P(u | 0) = \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^2 [\Delta f (N_{0atm} + N_{0n})]^2} \exp \left( -\frac{1}{2} \int_0^\tau u^2(t) dt \right) = \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{1}{(2\pi)^2 [\Delta f k(T_{atm}^\circ + T_n^\circ)]^2} \left( \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u(t) dt \right) \\
&\quad \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{M}{atm \quad n}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P(u|1) &= \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{M}{\Delta f}} \times \\
 & \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} (2\pi)^2 [\Delta f (N_{0UAV} + N_{0atm} + N_{0n})]^2 \\
 & \times \exp \left( - \frac{1}{N_{0UAV} + \Delta N_{0atm} + N_{0n}} \int_0^\tau u^2(t) dt \right) = \\
 & \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{\frac{M}{\Delta f}} \left( \frac{1}{\Delta f} \exp \left[ - k(T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ) \int_0^\tau u(t) dt \right] \right)^2 \\
 & \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{\frac{M}{\Delta f}} \left( \frac{1}{\Delta f} \exp \left[ - k(T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ) \int_0^\tau u(t) dt \right] \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

де  $\Delta f$  – ширина спектра коливань що спостерігаються, Гц;  
 $\Delta t$  – інтервал часу, через який процеси  $s(t)$  і  $n(t)$  будуть некорельовані, с;

$M$  – число некорельованих відліків на інтервалі часу  $t \in (0, \tau)$ ;

$N_{0UAV}$  – спектральні щільності потужності сигналу БПЛА, Вт/Гц;

$N_{0n}$  – спектральні щільності потужності внутрішнього шуму, Вт/Гц;

$N_{0atm}$  – спектральні щільності потужності атмосфери, Вт/Гц;

$k$  – постійна Больцмана;

$T_{UAV}^\circ$  – яскраві температури корисного сигналу БПЛА, К;

$T_{atm}^\circ$  – яскраві температури атмосфери, К;

$T_n^\circ$  – яскраві температури шумова температура приймача, К.

У виразі (3.3) і (3.4) передбачається, що всі процеси, що входять до  $u(t)$ , мають нульове математичне очікування.

Підставивши (3.3) та (3.4) в (3.2), отримаємо:

$$\left( \frac{1}{\Delta T^\circ} \exp \left[ - k(T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ) \int_0^\tau u(t) dt \right] \right)^2 \times \lim_{\substack{\Delta f \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ M \rightarrow \infty}} \frac{1}{\frac{M}{\Delta f}} \left( \frac{1}{\Delta f} \exp \left[ - k(T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ) \int_0^\tau u(t) dt \right] \right)^2 > \frac{P(0)}{P(1)}. \tag{3.5}$$

$$\left| \exp \left\{ \frac{\int_0^{\tau} u(t) dt}{k(T_{UAV} + T_{atm} + T_n)(T_{atm} + T_n)} \right\} \right|$$

Видно, що відношення правдоподібності (3.5) є монотонно зростаючою функцією величини  $\int_0^{\tau} u^2(t) dt$ . Тому з деяким порогом досить порівнювати ці

величини, які є в цьому завданні достатніми статистиками. Таким чином,



рішення поставленого завдання виявлення можна представити виразом

$$Y_{\Delta} = \int_0^{\tau} u^2(t) dt > Y_0, \quad (3.6)$$

де  $Y_{\Delta}$  – вихідний ефект оптимального детектора, В;

$Y_0$  – порогове значення вихідного ефекту, В.

Структурна схема оптимального детектора зображена на рисунку 3.1.

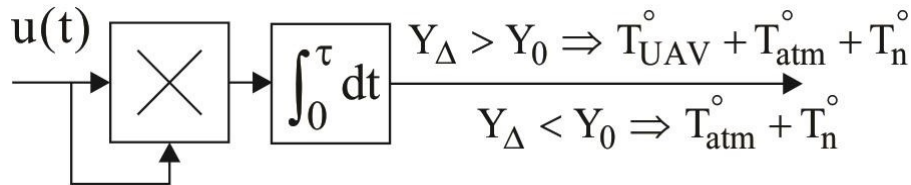


Рисунок 3.1 - Структурна схема оптимального детектора приростів РТВ

### 3.2 Аналіз структури функціонала щільності ймовірності виявлення радіотеплового випромінювання БПЛА

Ймовірносними характеристиками виявлення є ймовірність помилкової тривоги

$$L(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(Y_{\Delta} | 0) dY_{\Delta},$$

ймовірність правильного виявлення  $C(Y_0) = \int_{-\infty}^{Y_0} P(Y_{\Delta} | 0) dY_{\Delta}$ ,

ймовірність правильного виявлення  $D(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(Y_{\Delta} | 1) dY_{\Delta}$

ймовірність пропуску сигналу  $E(Y_0) = \int_{-\infty}^{Y_0} P(Y_{\Delta} | 1) dY_{\Delta}$ .

На практиці найбільший інтерес представляють ймовірності правильного виявлення  $D(Y_0)$  і помилкової тривоги  $L(Y_0)$ . Для їх визначення необхідно знати диференціальні закони розподілу ймовірностей  $P(Y_{\Delta} | 1), P(Y_{\Delta} | 0)$ . У вираженні (3.6) значення  $u(t)$  розподілені по нормальному закону, значення  $u^2(t)$  по закону  $\chi^2$ , значення  $\int_0^{\tau} u^2(t) dt$  по закону  $\chi^2$  з  $M$  степенями свободи.

У практичних ситуаціях число  $M$  може становити сотні тисяч і мільйони. Тому вихідні ефекти (достатні статистики)

$$Y_{\Delta} = \int_0^{\tau} u^2(t) dt$$

в силу центральної граничної теореми Ляпунова можна вважати розподіленими за нормальним законом

$$P(Y_{\Delta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y_{\Delta}}} \exp\left[-\frac{(Y_{\Delta} - \langle Y_{\Delta} \rangle)^2}{2\sigma_{Y_{\Delta}}^2}\right]. \quad (3.7)$$

Для конкретизації  $D(Y_0)$  и  $L(Y_0)$  необхідно знайти відповідні математичні очікування і дисперсії

$$\left. \begin{aligned} M[Y_{\Delta}(u|0)] &= \langle Y_{\Delta}(u|0) \rangle, & M[Y_{\Delta}(u|1)] &= \langle Y_{\Delta}(u|1) \rangle, \\ \sigma^2[Y_{\Delta}(u|0)] &= D[Y_{\Delta}(u|0)] = \langle Y_{\Delta}^2(u|0) \rangle - (\langle Y_{\Delta}(u|0) \rangle)^2, \\ \sigma^2[Y_{\Delta}(u|1)] &= D[Y_{\Delta}(u|1)] = \langle Y_{\Delta}^2(u|1) \rangle - (\langle Y_{\Delta}(u|1) \rangle)^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

При знаходженні виразів (3.8) будемо враховувати, що в практичному випадку спостерігається процес  $u(t)$  має обмежений енергетичний спектр

$G_u(f) = G_{UAV}(f) + G_{atm}(f) + G_n(f)$ , тому є результатом проходження білого шуму, практично має місце на вході первинного приймального антенного елемента приймача, через деякий фільтр з коефіцієнтом передачі  $K(j2\pi f)$ . Енергетичні спектри процесів  $s_{UAV}(t)$ ,  $s_{atm}(t)$  і  $n(t)$  при цьому будуть рівні

$$\left. \begin{aligned} G_{UAV}(f) &= \frac{N_{0UAV}}{2} |K(j2\pi f)|^2 = \frac{kT^{\circ}}{2} |K(j2\pi f)|^2, \\ \Delta G_{atm}(f) &= \frac{\Delta N_{0atm}}{2} |K(j2\pi f)|^2 = \frac{k\Delta T^{\circ}}{2} |K(j2\pi f)|^2, \\ G_n(f) &= \frac{N_{0n}^2}{2} |K(j2\pi f)|^2 = \frac{kT^{\circ}}{2} |K(j2\pi f)|^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Математичні очікування (8) запишемо в такий спосіб:

$$\begin{aligned} \langle Y_{\Delta}(u|0) \rangle &= \langle \int_0^{\tau} [s_{UAV}(t) + n(t)]^2 dt \rangle = \int_0^{\tau} \langle s_{UAV}^2(t) \rangle + \langle n^2(t) \rangle dt = \\ &= \int_0^{\tau} [\sigma_{UAV}^2 + \sigma_n^2] dt = \int_0^{\tau} [\int_0^{\infty} G_{UAV}(f) df + \int_0^{\infty} G_n(f) df] dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_{UAV}(f) + G_n(f)}{|j2\pi f|^2} df = T \left( \frac{kT_{UAV}^\circ}{2} + \frac{kT_n^\circ}{2} \right) \int_{-\infty}^{\infty} |K|^2 df = \quad (3.10) \\
 & = \tau \left( 0,5kT_{UAV}^\circ + 0,5kT_n^\circ \right) 2\Delta f = \tau \left( kT_{UAV}^\circ + kT_n^\circ \right) \Delta f,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\langle Y(u|1) \rangle &= \left\langle \int_0^\tau [s_{UAV}(t) + s_{atm}(t) + n(t)]^2 dt \right\rangle = \\
&= \int_0^\tau \langle s_{UAV}^2(t) \rangle + \langle s_{atm}^2(t) \rangle + \langle n^2(t) \rangle dt = \\
&= \int_0^\tau [\sigma_{UAV}^2 + \sigma_{atm}^2 + \sigma_n^2] dt = \\
&= \int_0^\tau \left[ \int_{-\infty}^{\infty} G_{UAV}(f) df + \int_{-\infty}^{\infty} G_{atm}(f) df + \int_{-\infty}^{\infty} G_n(f) df \right] dt = \\
&= \tau \int_{-\infty}^{\infty} [G_{UAV}(f) + G_{atm}(f) + G_n(f)] df = \\
&= \tau \left( \frac{UAV}{kT_{UAV}^{\circ}} + \frac{atm}{kT_{atm}^{\circ}} + \frac{n}{kT_n^{\circ}} \right) \int_{-\infty}^{\infty} |K(j2\pi f)|^2 df = \\
&= \tau \left( 0,5kT_{UAV}^{\circ} + 0,5kT_{atm}^{\circ} + 0,5kT_n^{\circ} \right) 2\Delta f = \tau \left( kT_{UAV}^{\circ} + kT_{atm}^{\circ} + kT_n^{\circ} \right) \Delta f,
\end{aligned} \tag{3.11}$$

де  $\Delta f$  – полоса пропускання, Гц;

$\sigma_{UAV(atm,n)}^2$  – дисперсії процесів  $s_{UAV}(t)$ ,  $s_{atm}(t)$  и  $n(t)$ .

Другий момент вихідного ефекту  $Y_{\Delta}$  дорівнює :

$$\begin{aligned}
\langle Y_{\Delta}^2(u|0) \rangle &= \left\langle \left( \int_0^\tau [s_{atm}(t) + n(t)] dt \right)^2 \right\rangle = \\
&= \int_0^\tau \int_0^\tau [s_{atm}(t_1) + n(t_1)] [s_{atm}(t_2) + n(t_2)] dt_1 dt_2 = \\
&= \int_0^\tau \left\langle s_{atm}^2(t) + n^2(t) \right\rangle dt + 2 \int_0^\tau \int_0^\tau r_{u|0}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 = \\
&= \left( \int_0^\tau \langle s_{atm}^2(t) \rangle dt \right) + \left( \int_0^\tau \langle n^2(t) \rangle dt \right) + 2 \int_0^\tau \int_0^\tau r_{u|0}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2 = \\
&= \left( \langle Y_{\Delta}(u|0) \rangle \right)^2 + 2 \sigma_{u|0}^4 \int_0^\tau \int_0^\tau r_{u|0}^2(t_1 - t_2) dt_1 dt_2.
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Дисперсія  $Y_{\Delta}(u|0)$

$\sigma^2$

2

$${}^2_{Y_\Delta} [Y_\Delta^{\tau\tau}(u|0)] = \langle Y_\Delta(u|0) \rangle - (\langle Y_\Delta(u|0) \rangle) = 2\sigma_{u|0} \iint_{00} r_{u|0}(t_1 - t_2) dt_1 dt_2. \quad (3.13)$$

Після заміни змінних в подвійному інтегралі ( $t_1 - t_2 = t'$ ,  $t_1, t_2 = t$ ),  
отримаємо:

$$\int_{-\tau}^{\tau} \int_{-\tau}^{\tau} r^2(t-t) dt dt = \tau \int_{-\tau}^{\tau} \left( 1 - \frac{|t|}{\tau} \right) |r_{u|0}(t)| dt \approx \int_{-\infty}^{\infty} r_{u|0}(t) dt = \Delta t, \quad (3.14)$$

Величина  $\alpha$  залежить від конкретної форми амплітудно-частотної характеристики  $|K(j2\pi f)|$  і, як правило, близька до одиниці.

Тоді

$$\sigma^2 [Y(u|0)] = 2\sigma^4 \tau \frac{1}{\tau} = \tau (\sigma_{atm}^2 + \sigma_n^2)^2 \frac{1}{\tau} = \tau \left( kT_{atm}^\circ + kT_n^\circ \right) \Delta f \frac{2\Delta f}{\tau} = \tau \Delta f k^2 \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)^2. \quad (3.15)$$

Аналогічно знаходимо дисперсію величини  $Y_\Delta(u|1)$

$$\sigma^2 [Y(u|1)] = \tau \Delta f k^2 \left( T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)^2. \quad (3.16)$$

Таким чином, узагальнюючи всі величини (3.8), можна записати

$$\left. \begin{aligned} \langle Y_\Delta(u|0) \rangle &= \tau \left( kT_{atm}^\circ + kT_n^\circ \right) \Delta f = 0,5Mk \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right), \\ \langle Y_\Delta(u|1) \rangle &= \tau \left( kT_{UAV}^\circ + kT_{atm}^\circ + kT_n^\circ \right) \Delta f = 0,5Mk \left( T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right), \\ \sigma_{Y_\Delta(u|0)}^2 &= \tau \Delta f k^2 \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)^2 = 0,5Mk^2 \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)^2, \\ \sigma_{Y_\Delta(u|1)}^2 &= \tau \Delta f k^2 \left( T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)^2 = 0,5Mk^2 \left( T_{UAV}^\circ + T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Рівняння (3.7) з урахуванням (3.18) набуде вигляду

$$P(Y_\Delta | 0) = \frac{\exp \left\{ - \frac{1}{2} \left[ \frac{0,5Mk \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)}{0,5Mk \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)} \right]^2 \right\}}{\sqrt{2\pi} \sqrt{0,5Mk \left( T_{atm}^\circ + T_n^\circ \right)}}, \quad (3.18)$$

(

)

$$P(Y_{\Delta}|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{0,5Mk}\left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{\left[\frac{Y_{\Delta}}{0,5Mk}\left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)\right]^2}{0,5Mk^2\left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)^2}\right\}. \quad (3.19)$$

Цікавим є перехід в (3.18) і (3.19) до нормованих випадкових величин  $\eta = Y_{\Delta} | 0,5Mk$ . Ці величини, очевидно, також гаусові, з такими математичними очікуваннями і дисперсіями

$$\left. \begin{aligned} \langle \eta(u|0) \rangle &= \left\langle \frac{Y_{\Delta}(u|0)}{0,5Mk} \right\rangle = \left( T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} \right), \\ \langle \eta(u|1) \rangle &= \left( T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} \right), \\ \sigma_{\eta(u|0)}^2 &= \left\langle \frac{Y_{\Delta}^2(u|0)}{(0,5Mk)^2} \right\rangle - \left( \left\langle \frac{Y_{\Delta}(u|0)}{0,5Mk} \right\rangle \right)^2 = \frac{0,5Mk^2\left(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)^2}{(0,5Mk)^2} = \frac{\left(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)^2}{0,5M}, \\ \sigma_{\eta(u|1)}^2 &= \frac{\left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)^2}{0,5M}. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Перепишемо (18) і (19) з урахуванням введених нормувань

$$P(\eta|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\left(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)}{\sqrt{0,5M}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{\left[\eta - \left(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)\right]^2}{\left(T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)^2 M^{-1}}\right\}, \quad (3.21)$$

$$P(\eta|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)}{\sqrt{0,5M}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{\left[\eta - \left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)\right]^2}{\left(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ}\right)^2 M^{-1}}\right\}. \quad (3.22)$$



Щільності розподілу (3.22) і (3.23) зображені на рисунку 3.2.

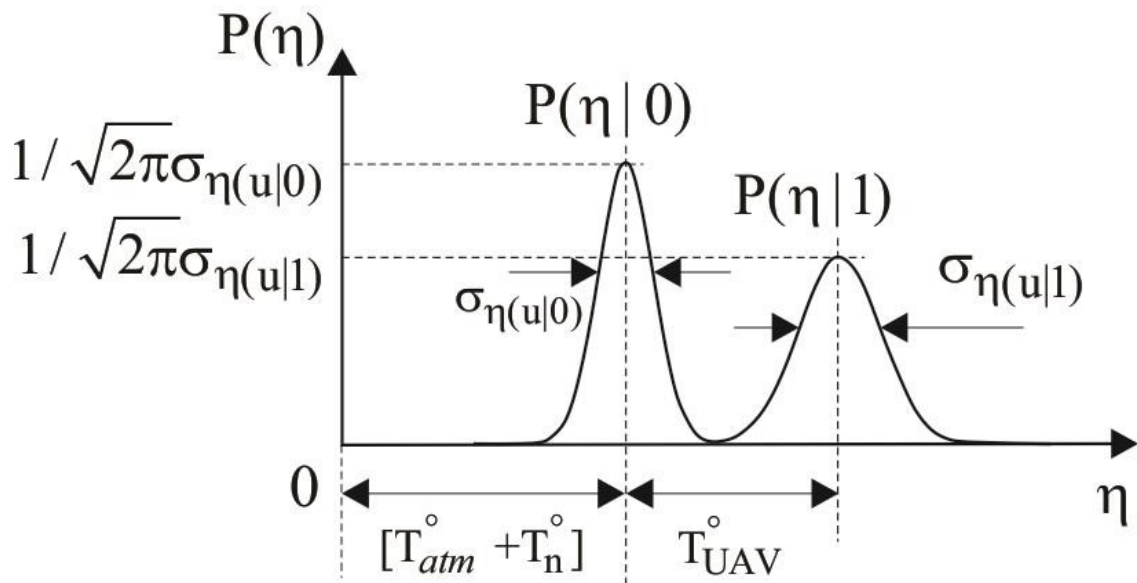


Рисунок 3.2 - Щільності ймовірностей розподілу достатніх статистик  $\eta$

Слід зазначити, що в задачах виявлення збільшень шумових сигналів основним перешкоджаючим процесом є результат недоусердженості процесів  $u^2(t)$  при їх інтегруванні на кінцевому інтервалі  $(0, \tau)$  в алгоритмі (3.6). При

$M = 2\tau\Delta f = \infty$  ця перешкода відсутній і теоретично виявлення приростів корисного сигналу в цьому випадку є безпомилковим[8].

3.3 Розрахунок і аналіз якісних показників виявляча контрастів в різних тактичних умовах і метеоумовах

Згідно критерію Неймана-Пірсона ймовірність правильного виявлення  $D(Y_0)$  розраховується при мінімізації ймовірності помилкової тривоги  $L(Y_0)$ . Величини цих ймовірностей рівні площам під кривими  $P(\eta|0)$  та  $P(\eta|1)$  правіше обраного порога  $Y_0$ , як показано на рисунку 3.3.

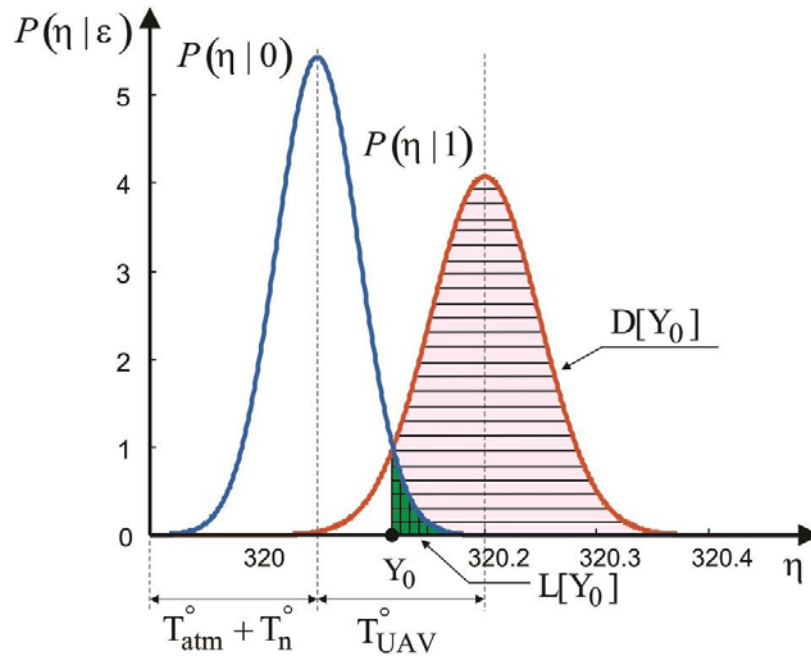


Рисунок 3.3 – Щільності ймовірності нормованого вихідного ефекту радіометричної системи при наявності і відсутності БПЛА в області спостереження

Ймовірність правильного виявлення  $D(Y_0)$  визначити його наступним чином:

$$D(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(\eta|1) dY = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_0}^{\infty} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] dy, \quad (3.23)$$

Складова виразу (3.23) має вигляд:

$$y = \frac{Y - T^{\circ}}{\sigma_{\eta(u|1)}}.$$

Величину  $y_0$  також доцільно записати в такому вигляді

$$y_0 = \frac{Y_0 - T^{\circ}}{\sigma_{\eta(u|1)}} = \frac{Y}{\sigma_{\eta(u|1)}} = \frac{T_{UAV}^{\circ} \sqrt{0,5M}}{(T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ})} \frac{Y}{\sigma_{\eta(u|1)}} \quad (3.24)$$

Складова виразу (3.24) має вигляд:

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

У формулі (3.24) величина

$$\begin{aligned} & \sqrt{0,5M} \frac{T_{UAV}^{\circ}}{\left( T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} \right)} = \frac{\left( T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} \right)}{\sqrt{0,5M}} \\ & \frac{T_{UAV}^{\circ}}{\sqrt{2} \frac{\left( T_{UAV}^{\circ} + T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} \right)}{\sqrt{\tau \Delta F}}} = \frac{T_{UAV}^{\circ}}{\Delta T_{\min}} \end{aligned} \quad (3.25)$$

– співвідношення сигналу-шуму в радіометричних системах, яке показує, в скільки разів перевищує яскраву температуру об'єкта радіотеплого випромінювання чутливість коливань  $\Delta T_{\min}$  радіометра[9].

Ймовірність помилкової тривоги полягає в появі:

$$L(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(\eta|0) dY = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\} dx, \quad (3.26)$$

Складові виразу (3.26) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\eta}{\sigma_{\eta(u|0)}}, \\ x_0 &= \frac{Y_0}{\sigma_{\eta(u|0)}}, \\ \sigma_{\eta(u|0)} &= \frac{\left( T_{atm}^{\circ} + T_n^{\circ} \right)}{\sqrt{0,5M}}. \end{aligned} \right\}$$

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

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y^2}^{\infty}$$

$$M(Y_0) = 1 - \int_{Y_0} P(\eta|1) dY = 1 - \int_{y_0} \exp\left[-\frac{y}{2}\right] dy. \quad (3.27)$$

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ

## 4.1 Вихідні параметри для розрахунків

Для розрахунку величин  $D(Y_0)$ ,  $M(Y_0)$ ,  $L(Y_0)$  у якості вихідних значень

шумових температур приймачів  $T_n^\circ$  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  $T_n^\circ = 3000K$ .

Градації станів атмосфери та значення яскравісних температур відповідно кутів візування  $\theta_{atm}$  наведені у табл. 4.1-4.4. Кут відраховується від площини горизонту.

Таблиця 4.1 - Значення яскравісних температур атмосфери для діапазону частот 10-12 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	80	43	23	16	14,7	13,3	12	10,7	9,3	8
Хмарна атмосфера	103	58	32	22	20	18	16,5	14,7	12,8	11
Дощ	209	125	73	60	55	49	43,5	38	32,5	27

Таблиця 4.2 - Значення яскравісних температур атмосфери для діапазону частот 20-22 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	176	110	62	45	41,3	37,7	34	30,3	26,7	23
Хмарна атмосфера	204	134	79	56	52	47	43	38,7	34,3	30
Дощ	273	237	170	131	122	113	104	95	86	77

Таблиця 4.3 - Значення яскравісних температур атмосфери для діапазону частот 35-36 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	179	112	64	46	42,5	39	35,5	32	28,5	25
Хмарна атмосфера	252	187	123	92	85	77	70	62,7	55,3	48
Дощ	280	278	268	238	226	214	202	190	178	166

Таблиця 4.4 - Значення яскравісних температур атмосфери для діапазону частот 94-96 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	258	199	130	99	91,7	84,3	77	69,7	62,3	55
Хмарна атмосфера	280	271	230	196	184	172	160,5	148,7	136,8	125
Дощ	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:

– у діапазоні частот 10-12 ГГц  $T_{БПЛА}^{\circ} = 86K$  під кутом візування 40°,

– у діапазоні частот 20-22 ГГц  $T_{БПЛА}^{\circ} = 96K$  під кутом візування 40°,

– у діапазоні частот 35-36 ГГц  $T_{БПЛА}^{\circ} = 120,8K$  під кутом візування 40° і

$T_{БПЛА}^{\circ} = 64K$  під кутом візування 90°,

– у діапазоні частот 94-96 ГГц  $T_{БПЛА}^{\circ} = 246,7K$  під кутом візування 30°.

У зв'язку з тим, що під різними кутами змінюється яскравісна температура атмосфери, то температура БПЛА також має змінюватися, особливо при поганих погодних умовах[10]. З аналізу слідує, що залежність яскравісної температури від кута візування описується експоненціальною моделлю, тому теоретично було підібрано закон розподілу  $T_{БПЛА}^{\circ}$  наступному вигляді:

$$T_{БПЛА}^{\circ} = \kappa e^{-\kappa_2 \theta} + \kappa_1 \quad (4.1)$$



Використовуючи модель (4.1), результати експериментальних вимірювань та теоретичні відомості про коефіцієнти віддзеркалення поверхонь під кутами

ковзання, були розраховані значення  $T^{\circ}$  в більшій мірі зробленого зі  
БПЛА  
склотекстоліту для різних діапазонів частот. Результати наведені в таблиці 4.5 -  
таблиці 4.8.

Таблиця 4.5 - Значення яскравісних температур БПЛА в більшій мірі зробленого зі склотекстоліту для діапазону частот 10-12 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	103,5	99,6	93,5	89,1	86	83,8	82,2	81	80,2	79,6
Хмарна атмосфера	126,5	114,6	102,5	95,1	91,5	88,8	86,7	85	83,7	82,6
Дощ	232,5	181,6	143,5	133	126	119	114	108	103	98,6

Таблиця 4.6 - Значення яскравісних температур БПЛА в більшій мірі зробленого зі склотекстоліту для діапазону частот 20-22 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	213,6	165,9	119,4	102,3	96	93,7	92,8	92,5	92,4	92,4
Хмарна атмосфера	241,6	189,9	136,4	113,3	106,3	103,4	101,8	100,9	100,1	99,36
Дощ	310,6	292,9	227,4	188,3	176,7	169	162,8	157,2	151,7	146,4

Таблиця 4.7 - Значення яскравісних температур БПЛА в більшій мірі зробленого зі склотекстоліту для діапазону частот 35-36 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	211,9	194,7	165	140,7	120,8	104,5	91,2	80,3	71,3	64
Хмарна атмосфера	256,8	239,5	209,9	185,6	165,7	149,4	136	125,1	116,2	108,8
Дощ	280,5	279	270	258,2	243,2	229,7	217,6	206,8	197,2	188,5

Таблиця 4.8 - Значення яскравісних температур БПЛА в більшій мірі зробленого зі склотекстоліту для діапазону частот 94-96 ГГц

Стан атмосфери	Кути візування									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Ясна атмосфера	267,9	263,1	254,4	246,7	240	234,2	229	224,6	220,6	217,2
Хмарна атмосфера	284,1	272,9	252,2	233,6	217,1	202,2	189	177,1	166,4	156,9
Дощ	280,3	280,3	280,3	280,3	278,8	277,5	276,3	275,2	274,2	273,4

Розміри БПЛА задамо наступні:  $0,5\text{ м}^2$ ,  $1\text{ м}^2$ ,  $5\text{ м}^2$ ,  $10\text{ м}^2$ ,  $20\text{ м}^2$ . Будемо вважати, що ці значення відповідають сумарній площі БПЛА у нижній частині, яка в більшості випадків складається з фюзеляжу, крил, стабілізатора та ін. У розрахунках будуть використані не ці значення, а їх перетворення з урахуванням проекції нижньої частини БПЛА на область антени, що орієнтована під кутом візування  $\theta_{atm}$  до горизонту. Геометрія зондування показана на рисунку 4.2.

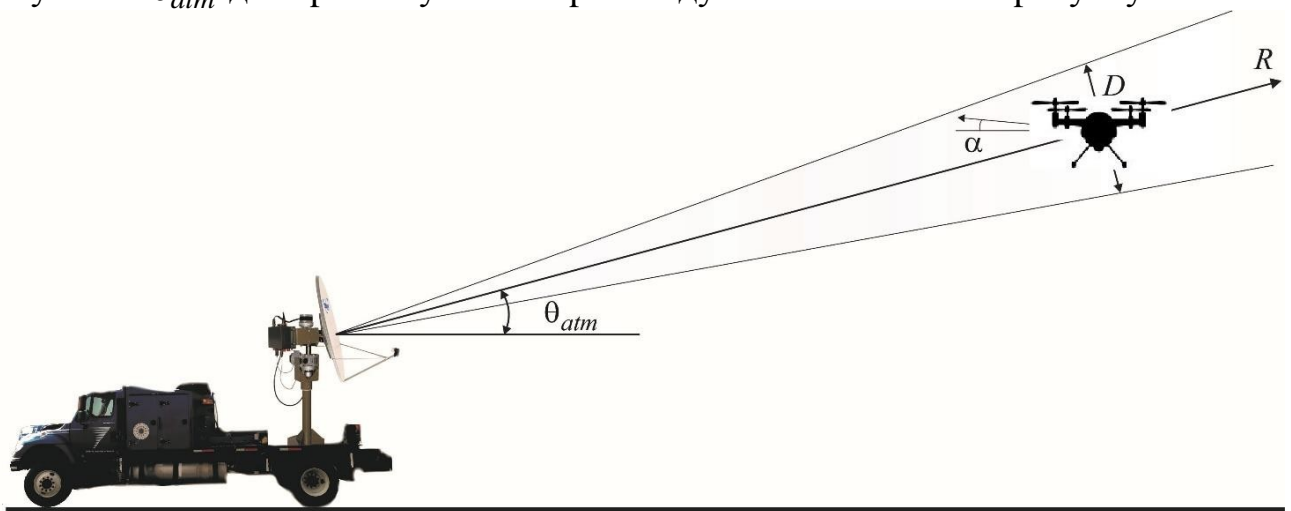


Рисунок 4.1 – Геометрія зондування БПЛА радіометричним комплексом

Відповідно до рисунку 4.2, ефективну площу БПЛА  $\bar{S}_{БнЛА}$  що буде впливати на ймовірність правильного виявлення та ймовірність пропуску цілі будемо розраховувати наступним чином:

$$\bar{S}_{БнЛА} = S_{БнЛА} \cdot \sin(\theta_{atm} + \alpha) + K \cdot S_{БнЛА} \cdot \cos(\theta_{atm} + \alpha), \quad (4.2)$$

де  $\alpha$  – кут атаки БПЛА, град;

$K$  – коефіцієнт пропорційності площі передньої (тильної) частини БПЛА до площі нижньої частини БПЛА[11].

Звичайно, що коефіцієнт  $K$  є унікальним для кожного літального апарату, проте зі збільшенням розмірів БПЛА він також зростає. Для розрахунків в проекті було прийнято, що  $K = 0,1$ .

Смуга пропускання  $\Delta f$  для різних приймачів буде дорівнювати:

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

Діаграми спрямованостей антен радіометричного комплексу мають однакові розміри у вертикальній та горизонтальній площинах. Ширина цих діаграм  $\Delta\theta$  дорівнює  $2^\circ$  для 3 см,  $1,4^\circ$  для 2 см,  $0,87^\circ$  для 8 мм та  $0,66^\circ$  для 3 мм.

Для виявлення БПЛА було запропоновано використовувати швидкість сканування  $20^\circ$  за секунду. Приймаючи це до уваги, розрахуємо постійну часу спостереження для кожної діаграми спрямованості окремо:

$$\left. \begin{aligned} T_{3см} &= \frac{\Delta\theta_{3см}}{20^\circ} \cdot 1с = 0,1с, \\ T_{1,5см} &= 70 мс, \\ T_{8мм} &= 43,5 мс, \\ T_{3мм} &= 33 мс. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Отримані величини (4.3) дозволять побудувати радіометричні зображення без втрати просторової роздільної здатності.

Приріст яскравісної температури  $\Delta T_{БПЛА}^\circ$  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

$$T^\circ + \Delta T^\circ = T^\circ \left( 1 - \frac{S_{БПЛА}}{S_{ДН}(R)} \right) + T^\circ \frac{S_{БПЛА}}{S_{ДН}(R)}, \text{ для } S_{БПЛА} \leq S_{ДН}(R), \quad (4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} T^\circ + \Delta T^\circ &= T^\circ, \text{ для } S_{БПЛА} > S_{ДН}(R), \\ \phi_{БПЛА} & \text{ атм} \left( \frac{S_{БПЛА}}{S_{ДН}(R)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

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

$$S_{ДН}(R) = \pi (D/2)^2 = \pi (\Delta\theta R/2)^2 \quad (4.6)$$

– площа перерізу діаграми спрямованості на дальності  $R$  .

## 4.2 Результати розрахунків ймовірностей правильного виявлення в залежності від дальності, кутів візування та розмірів БПЛА

Для розрахунку ймовірностей (3.24), (3.27) та (3.28) була розроблена комп'ютерна програма в пакеті прикладних програм MatLab, лістинг якої наведено у Додатку А. Зовнішній вигляд програмного забезпечення та варіативні блоки вибору умов розрахунку наведені на рисунку 4.3 – рисунку 4.5.

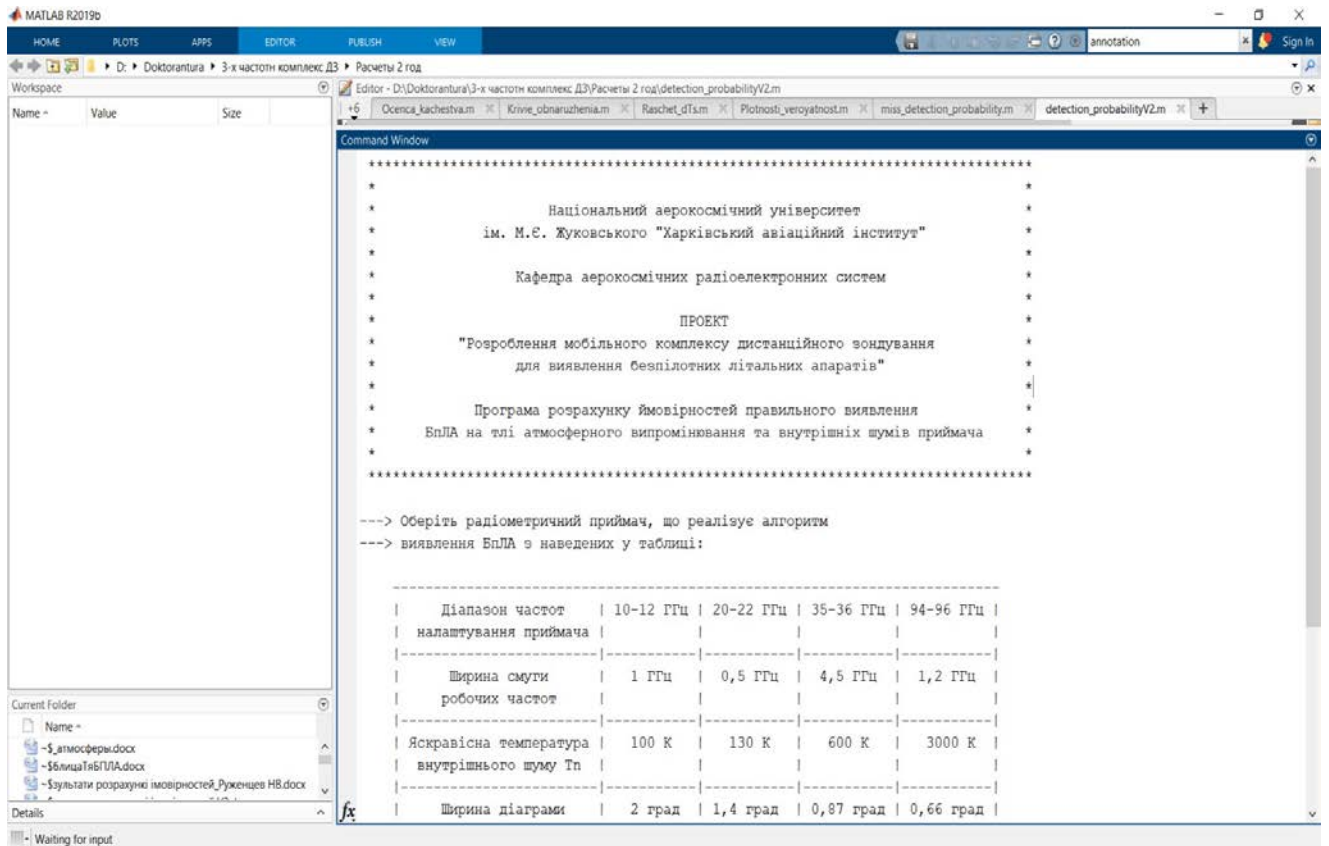


Рисунок 4.2 – Інтерфейс програми розрахунку ймовірностей правильного виявлення БПЛА на тлі атмосферного випромінювання та внутрішніх шумів приймача

---> Оберіть радіометричний приймач, що реалізує алгоритм  
 ---> виявлення БПЛА з наведених у таблиці:

Діапазон частот налаштування приймача	10-12 ГГц	20-22 ГГц	35-36 ГГц	94-96 ГГц
Ширина смуги робочих частот	1 ГГц	0,5 ГГц	4,5 ГГц	1,2 ГГц
Яскравісна температура внутрішнього шуму Tn	100 К	130 К	600 К	3000 К
Ширина діаграми спрямованості антени	2 град	1,4 град	0,87 град	0,66 град
Швидкість сканування	20 град за 1 секунду			
Постійна часу спостереження	0,1 с	70 мс	43,5 мс	33 мс
radiometer_id	1	2	3	4

---> Введіть ціле число від 1 до 4:  
 radiometer id =

**а**

---> Оберіть параметр, для якого будуть побудовані залежності  
 ймовірностей правильного виявлення БПЛА, з наведених у таблиці:

Назва параметру	Дальність	Кут візування	Яскравісна температура атмосфери	Розмір БПЛА
parameter_id	1	2	3	4

---> Введіть ціле число від 1 до 4:  
 parameter\_id =

**б**

---> Розмір БПЛА в метрах квадратних (для прикладу 0.5, 1, 5, 10, 20 або 40)  
 S\_BpLA =

**в**

Рисунок 4.3 – Блоки варіативного вибору умов розрахунку ймовірностей:  
 а – різні приймачі; б – вибір параметру від якого залежить ймовірність  
 правильного виявлення; в – вибір розміру БПЛА

```

---> Оберіть кут спостереження (від горизонту) в градусах з наведених у таблиці:
-----
| Кут спостереження | 5 град | 10 град | 20 град | 30 град | 40 град | 50 град | 60 град | 70 град | 80 град | 90 град |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| angle_id | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
---> Введіть ціле число від 1 до 10:
angle_id = |

а

---> Оберіть стан атмосфери з наведених у таблиці:
-----
| Стан атмосфери | Ясна | Хмарна | Дощ |
| | атмосфера | атмосфера | |
|-----|-----|-----|-----|
| atmosfera_id | 1 | 2 | 3 |
|-----|-----|-----|-----|
---> Введіть ціле число від 1 до 3:
atmosfera_id = |

б

---> Оберіть критерій вибору порогу виявлення, з наведених у таблиці:
-----
| Назва критерію | критерій Неймана-Пірсона | критерій логічного вибору порогу |
| | | з аналізу чутливості приймачів |
|-----|-----|-----|
| criterion_id | 1 | 2 |
|-----|-----|-----|
---> Введіть ціле число від 1 до 2:
criterion_id =

```

в

Рисунок 4.4 – Блоки варіативного вибору умов розрахунку ймовірностей:  
а – варіація кутів візування; б – різні стани атмосфери; в – вибір методу  
визначення порогу виявлення

### 4.3 Розрахунок ймовірності правильного виявлення в залежності від дальності

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $0,5 \text{ м}^2$  з склотекстоліту під кутом візування  $30^\circ$  на тлі ясної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.5- рисунку 4.8 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту під кутом візування  $30^\circ$  на тлі ясної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.9- рисунку 4.12 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $5 \text{ м}^2$  з склотекстоліту під кутом візування  $30^\circ$  на тлі ясної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.13- рисунку 4.16 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $10 \text{ м}^2$  з склотекстоліту під кутом візування  $30^\circ$  на тлі ясної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.17- рисунку 4.20 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $20 \text{ м}^2$  з склотекстоліту під кутом візування  $30^\circ$  на тлі ясної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.21- рисунку 4.24(для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).



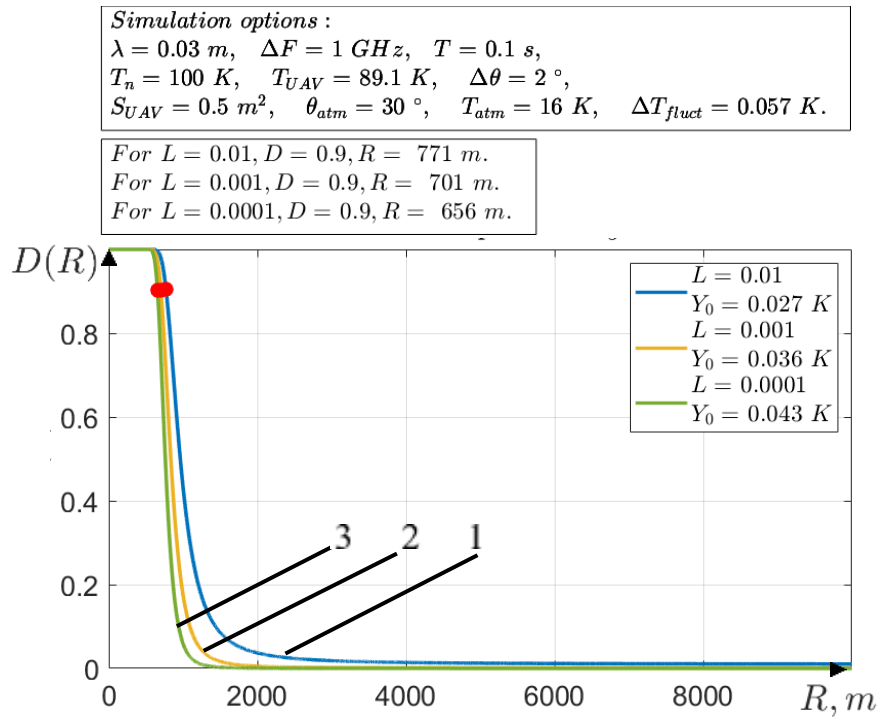


Рисунок 4.5 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.027\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.036\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.043\text{K}$

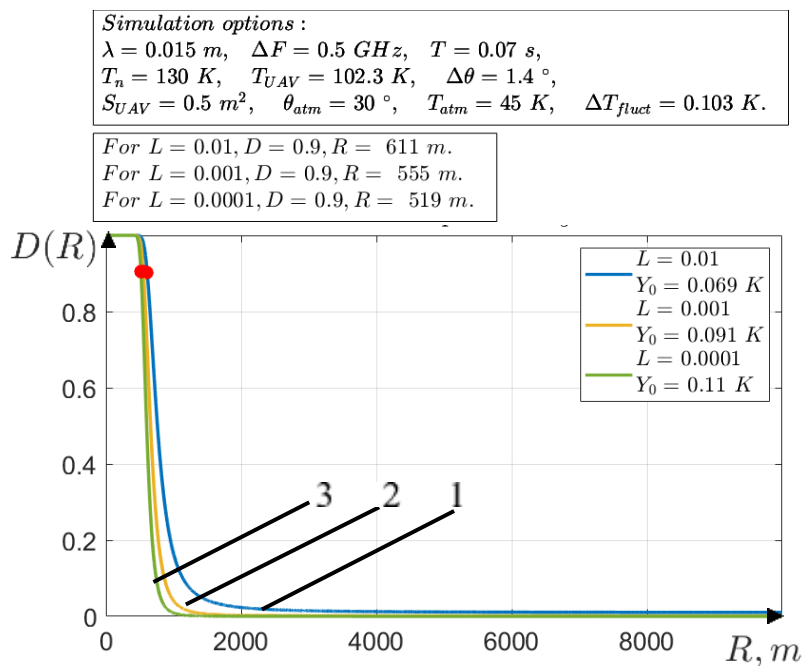


Рисунок 4.6 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.069\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.091\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.11\text{K}$

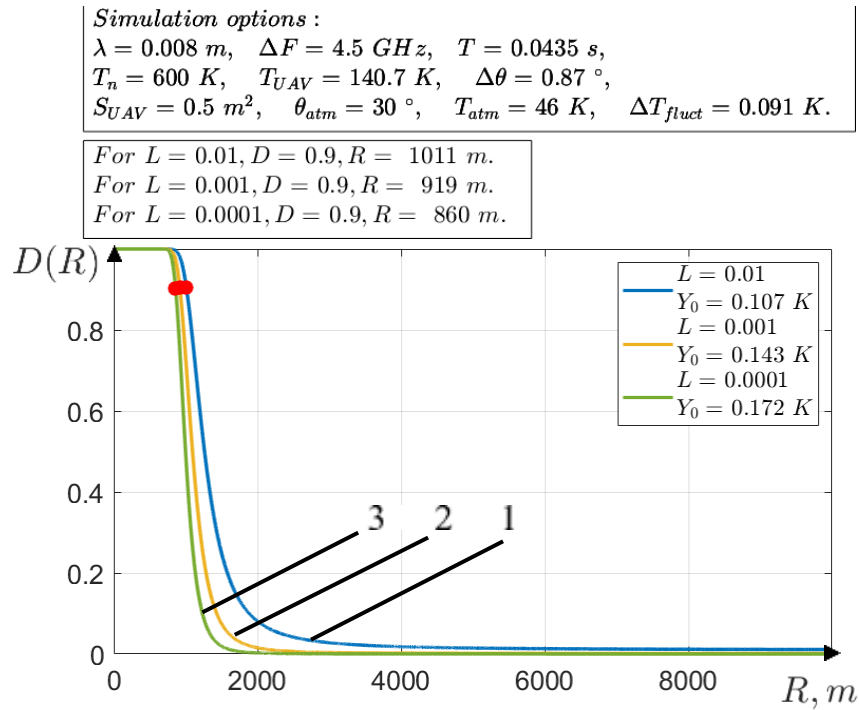


Рисунок 4.7 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц: 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.107\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.143\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.172\text{K}$

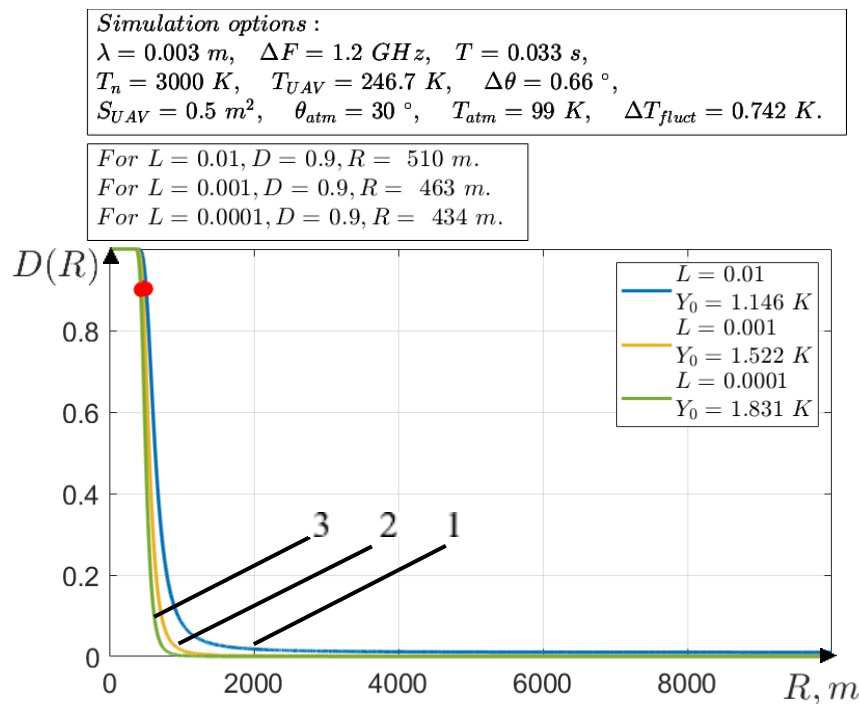


Рисунок 4.8 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц: 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.146\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.522\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.831\text{K}$

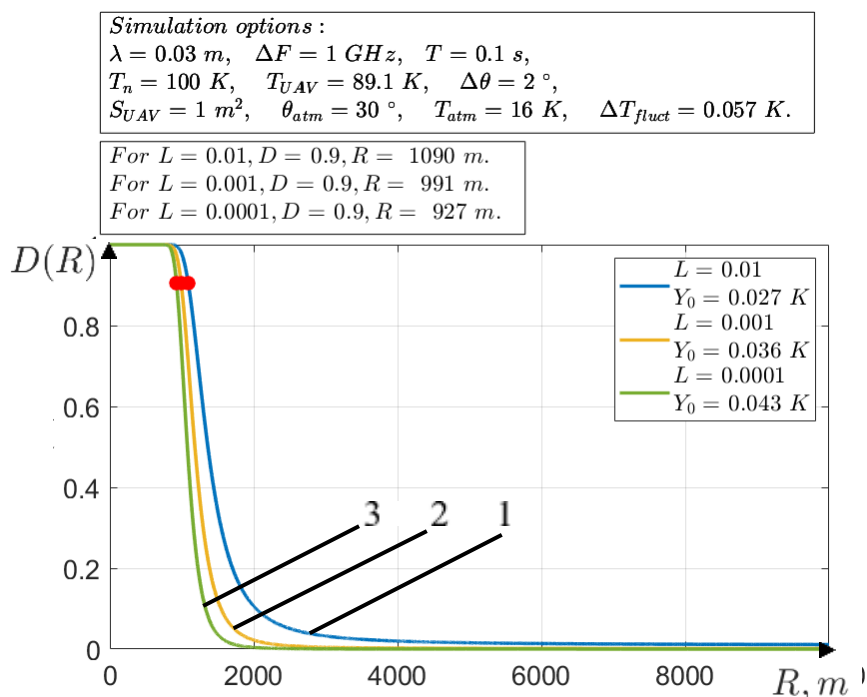


Рисунок 4.9 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.027\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.036\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.043\text{K}$

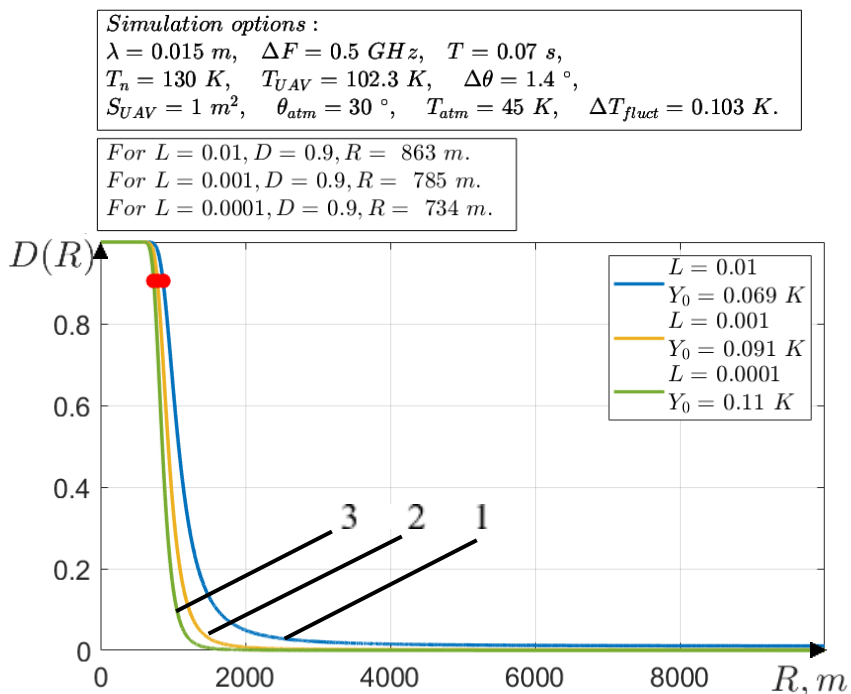


Рисунок 4.10 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.069\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.091\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.11\text{K}$

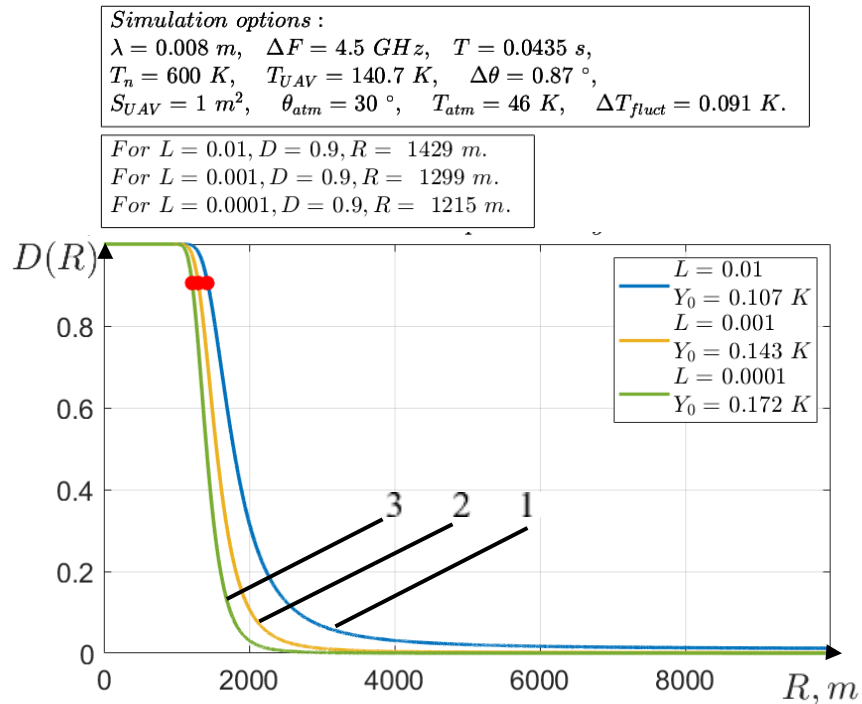


Рисунок 4.11 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.107\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.143\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.172\text{K}$

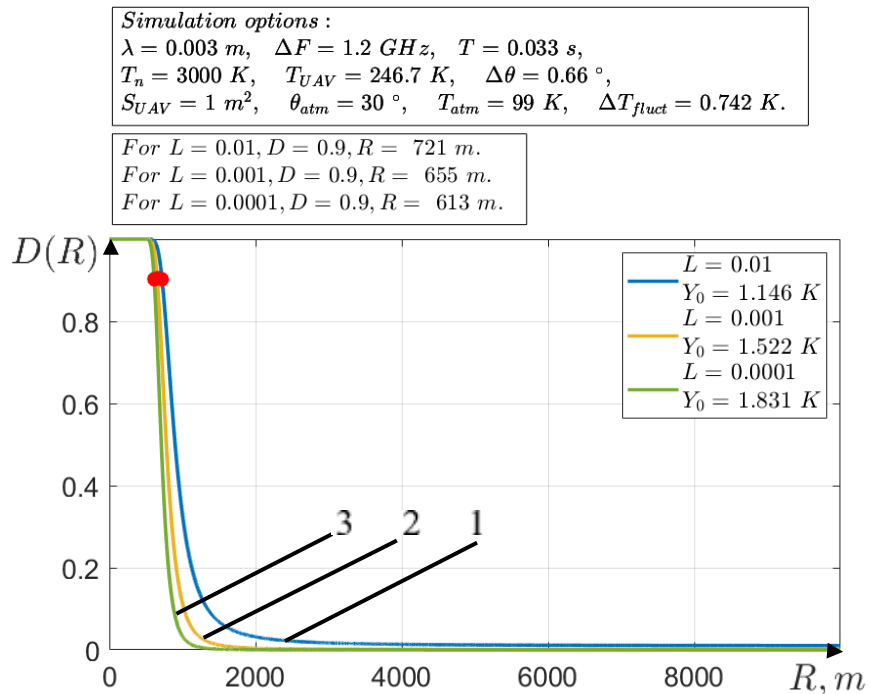


Рисунок 4.12 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.146\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.522\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.831\text{K}$

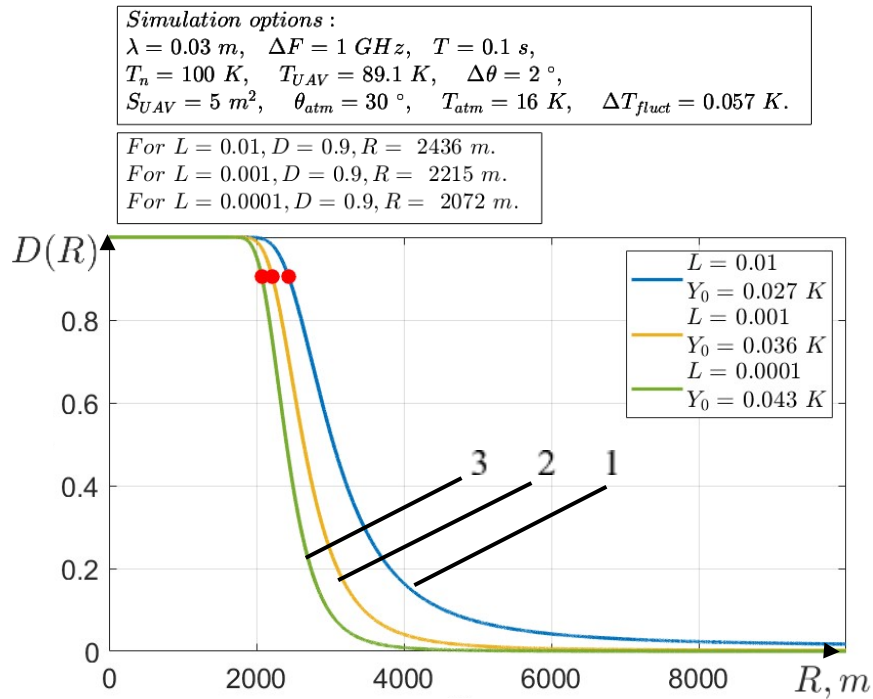


Рисунок 4.13 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.027\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.036\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.043\text{K}$

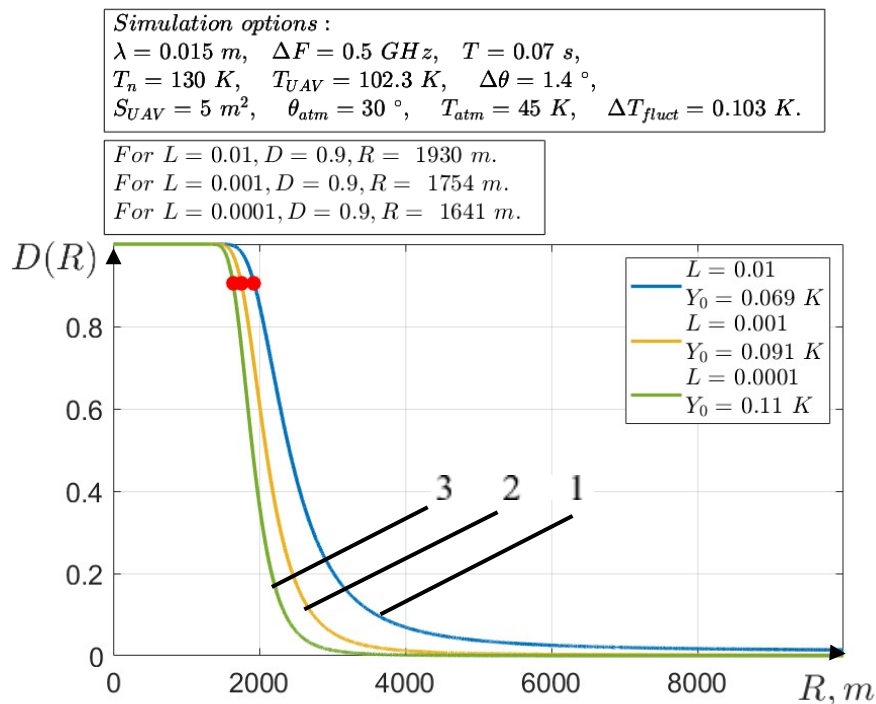


Рисунок 4.14 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.069\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.091\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.11\text{K}$

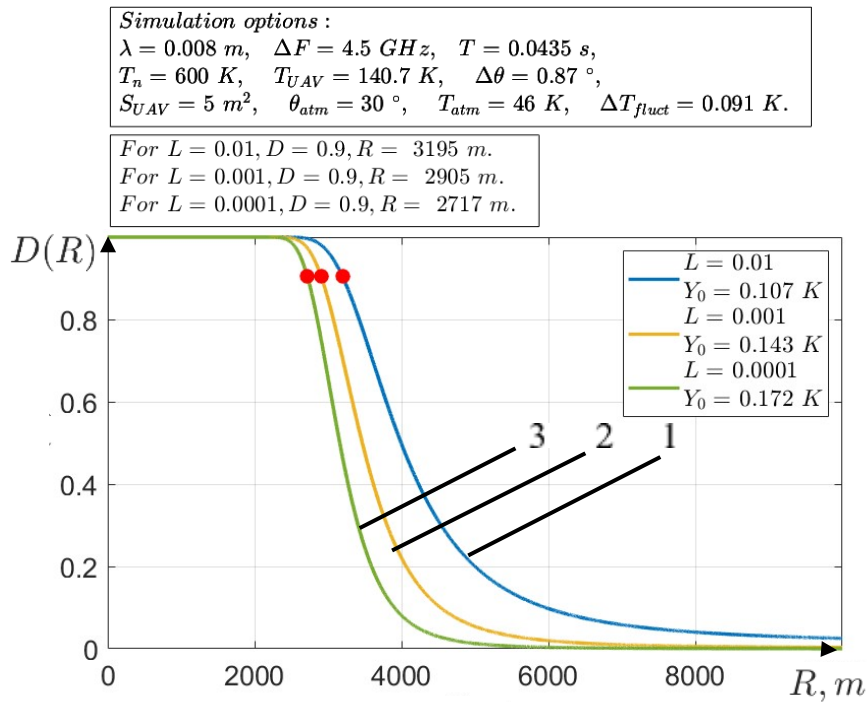


Рисунок 4.15 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.107\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.143\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.172\text{K}$

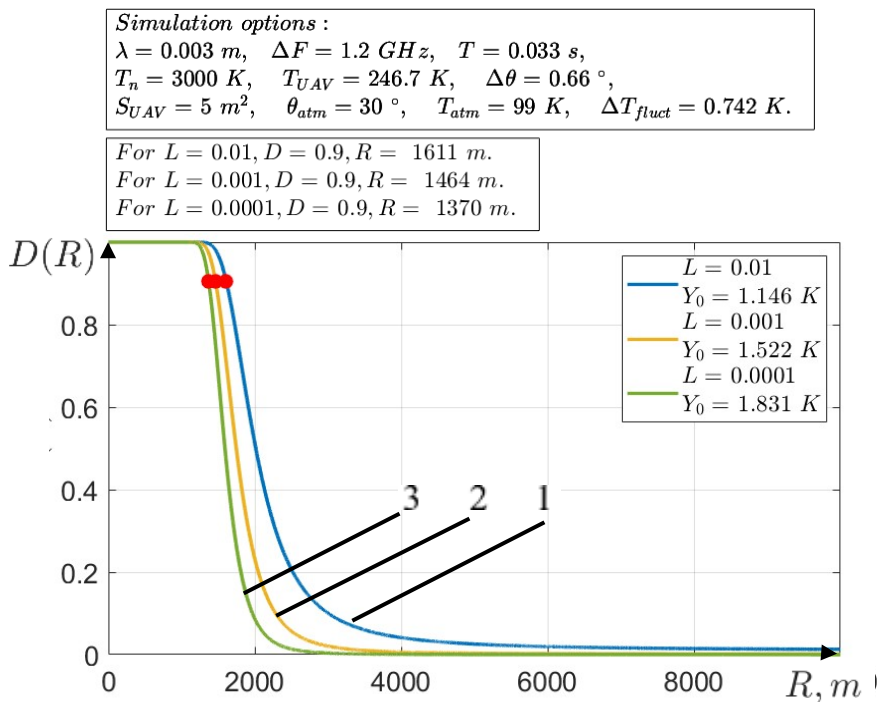


Рисунок 4.16 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.146\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.522\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.831\text{K}$

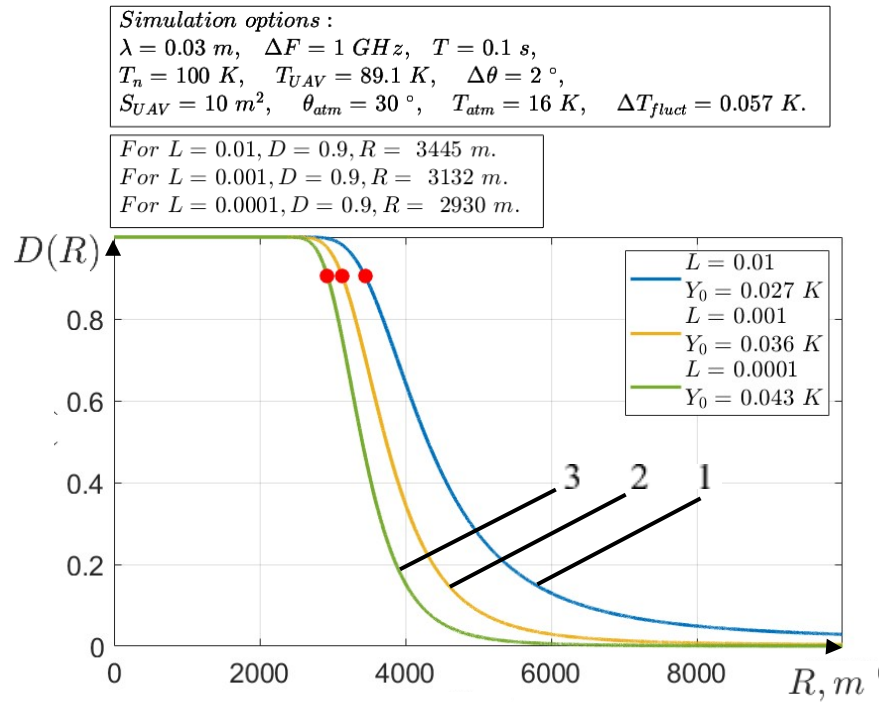


Рисунок 4.17 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.027\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.036\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.043\text{K}$

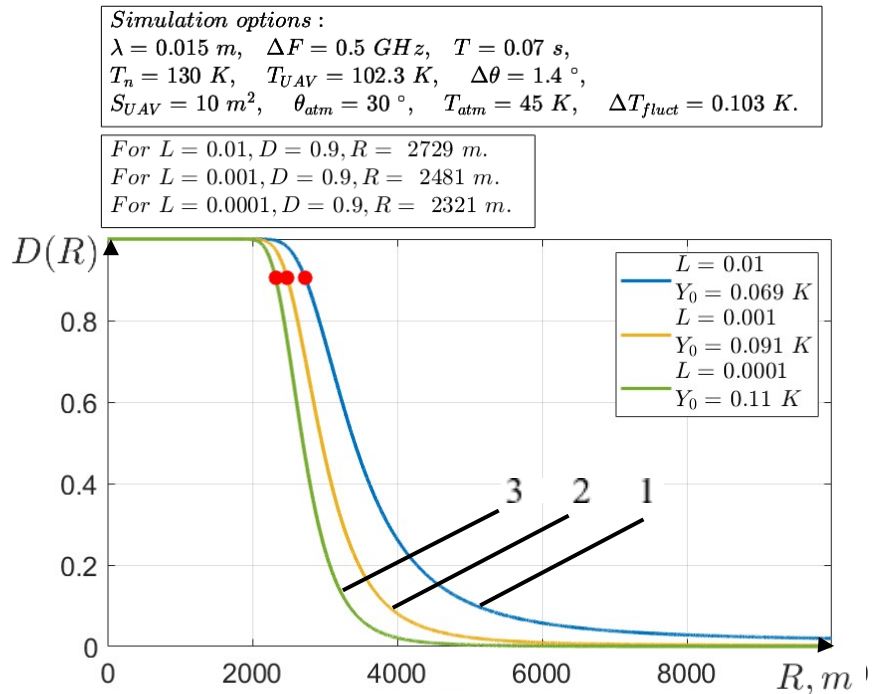


Рисунок 4.18 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.069\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.091\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.11\text{K}$

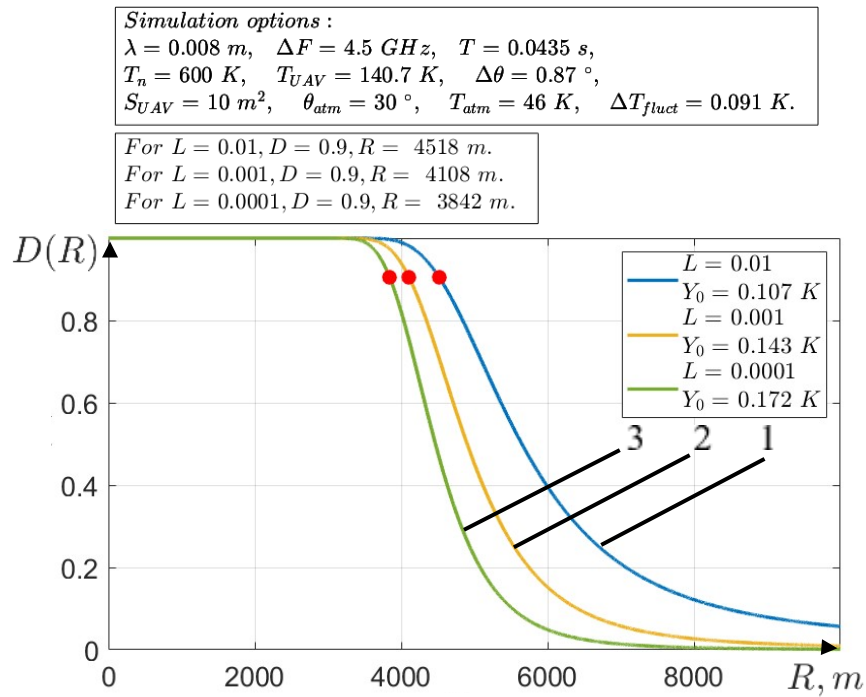


Рисунок 4.19 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.107\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.143\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.172\text{K}$

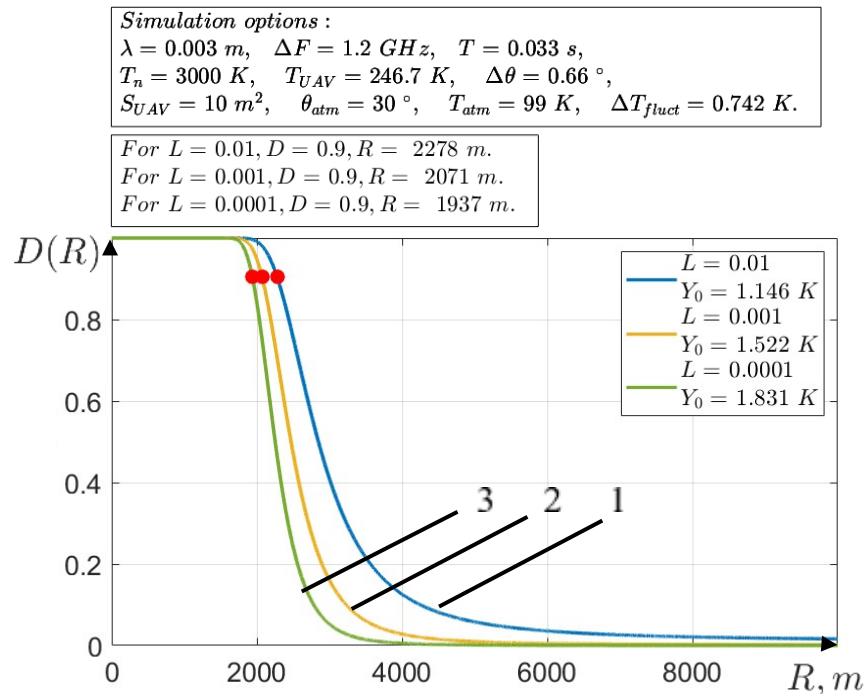


Рисунок 4.20 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=1.146\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=1.522\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=1.831\text{K}$



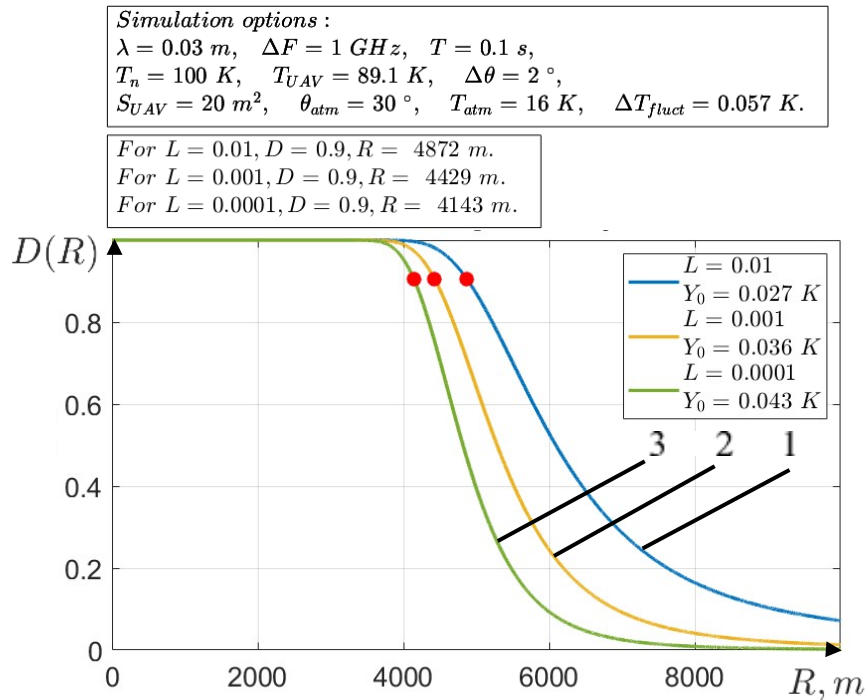


Рисунок 4.21 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.027\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.036\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.043\text{K}$

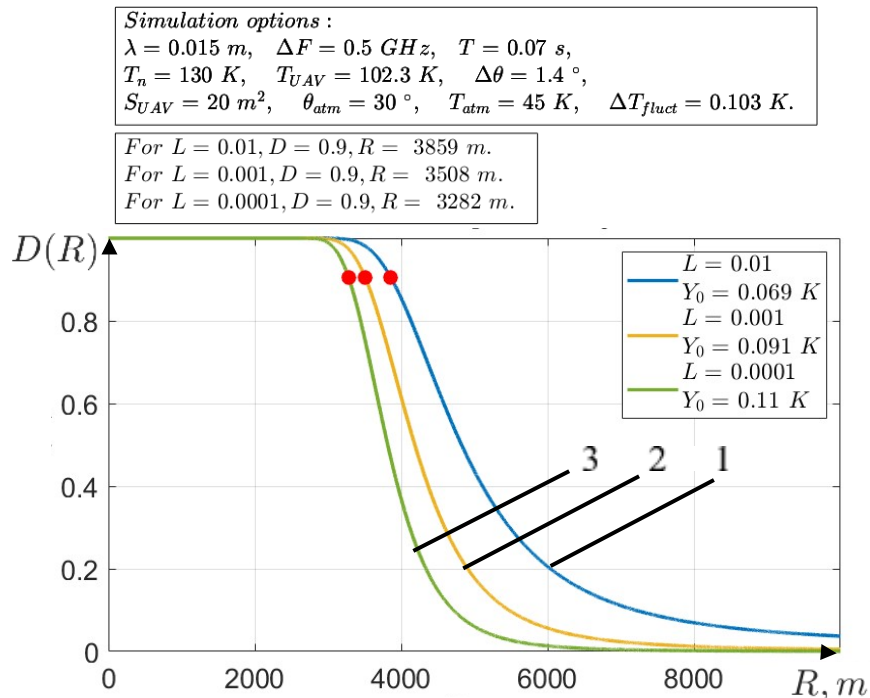


Рисунок 4.22 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.069\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.091\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.11\text{K}$

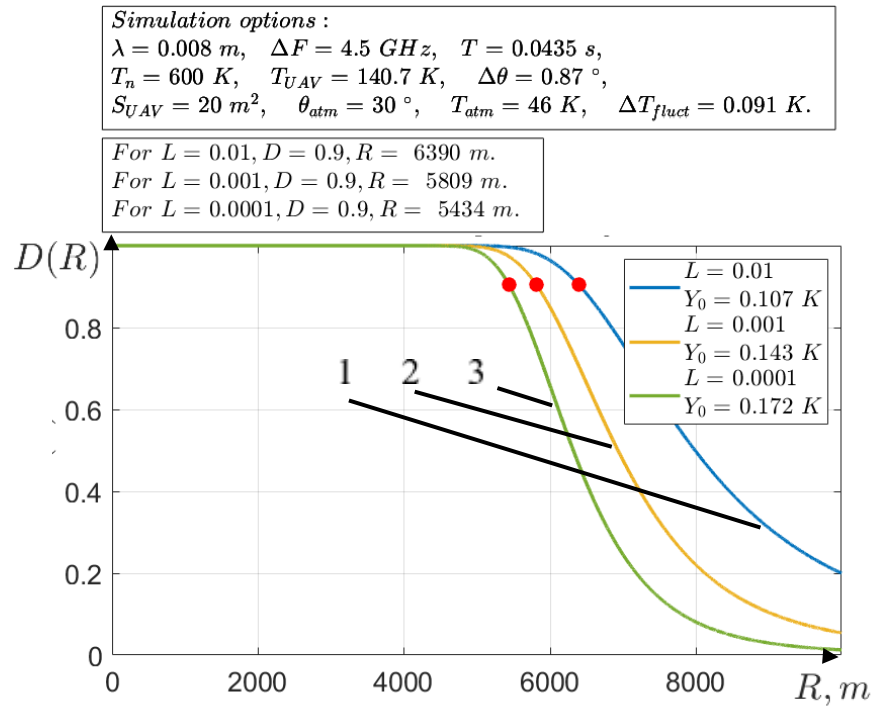


Рисунок 4.23 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.107\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.143\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.172\text{K}$

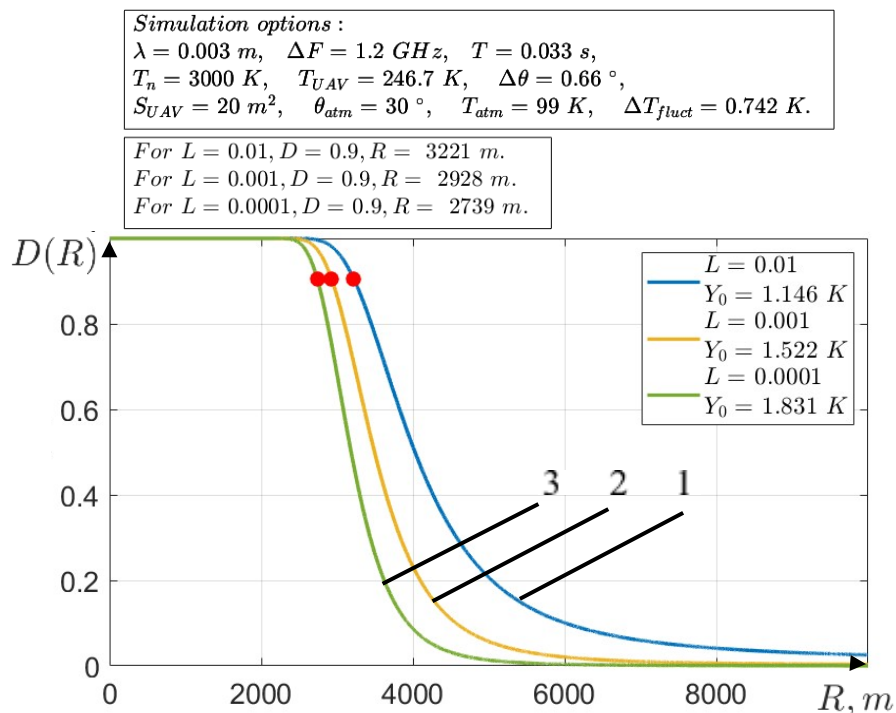


Рисунок 4.24 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.146\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.522\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.831\text{K}$

Узагальнені результати розрахунку дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 на тлі ясної атмосфери для  $L = 10^{-2}$  наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 - Значення дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 на тлі ясної атмосфери

Діапазони частот радіометрів	Розмір БПЛА				
	0,5 м <sup>2</sup>	1 м <sup>2</sup>	5 м <sup>2</sup>	10 м <sup>2</sup>	20 м <sup>2</sup>
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

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 0,5 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° на тлі хмарної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.25 - рисунку 4.28 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 1 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° на тлі хмарної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.29 - рисунку 4.32 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 5 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° на тлі хмарної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.33- рисунку 4.36 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 10 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° на тлі хмарної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.37- рисунку 4.40 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 20 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° на тлі хмарної атмосфери в залежності від дальності показані на рисунку 4.41- рисунку 4.44 (для ймовірності хибної тривоги L).

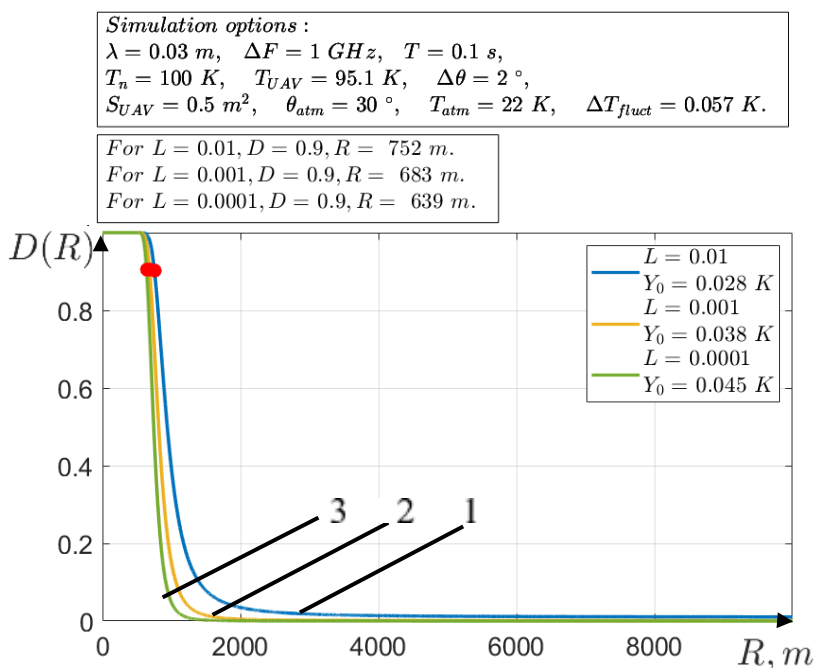


Рисунок 4.25 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.028\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.038\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.045\text{K}$

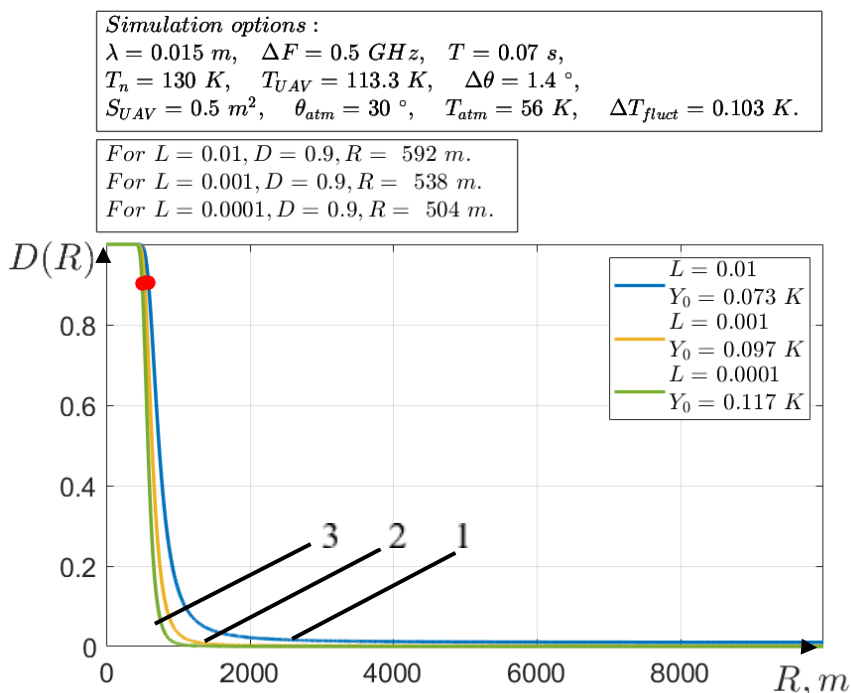


Рисунок 4.26 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.073\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.097\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.117\text{K}$

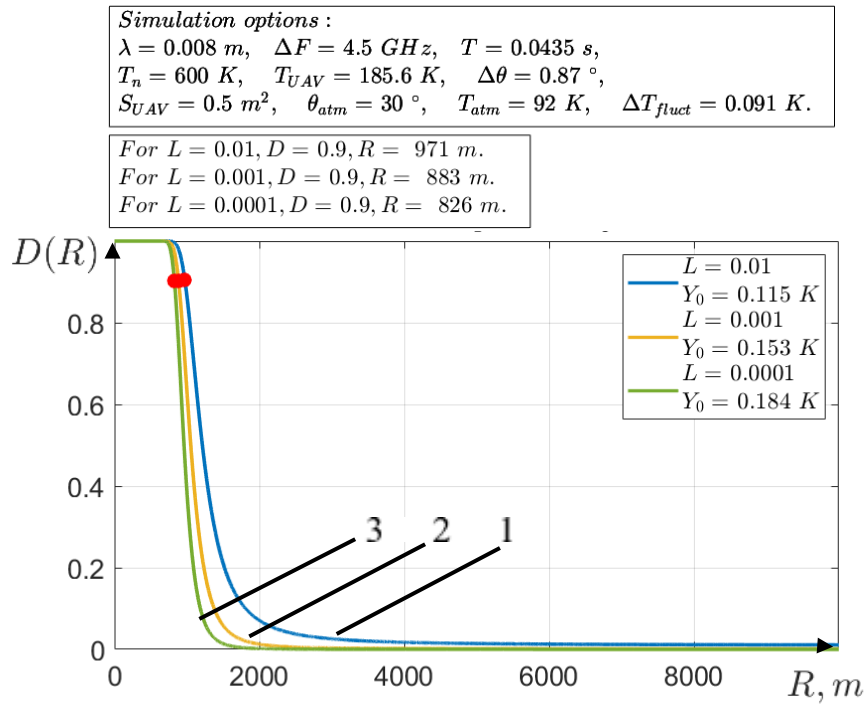


Рисунок 4.27 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.115\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.153\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.184\text{K}$

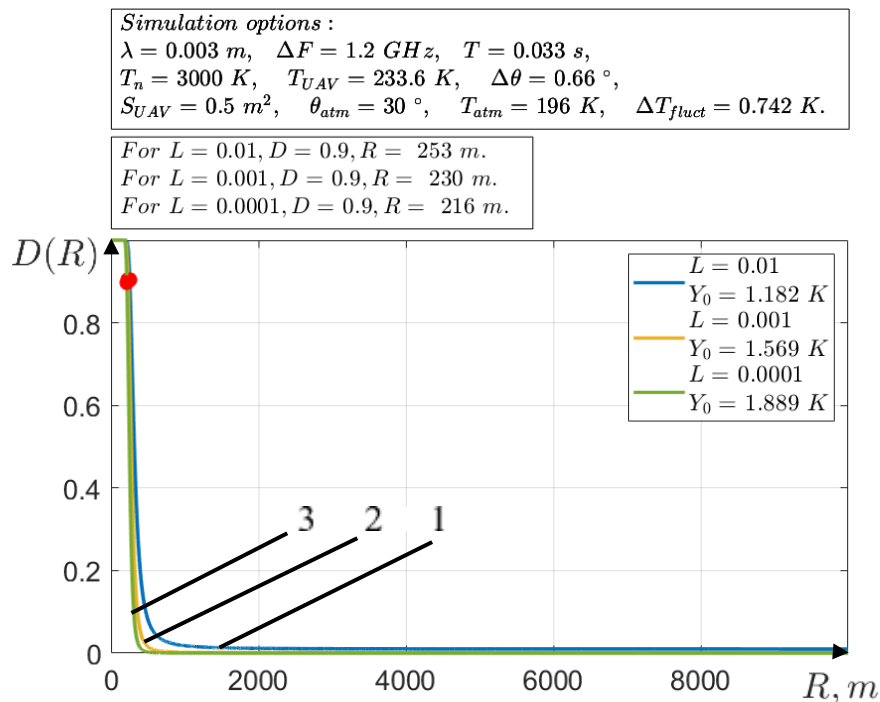


Рисунок 4.28 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=1.182\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=1.569\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=1.889\text{K}$

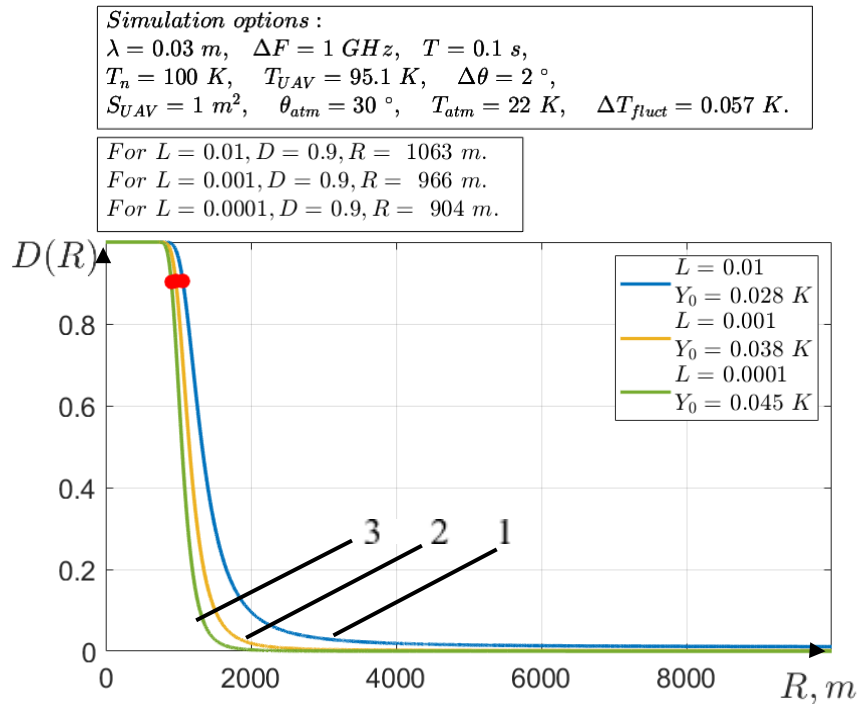


Рисунок 4.29 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.028\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.038\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.045\text{K}$

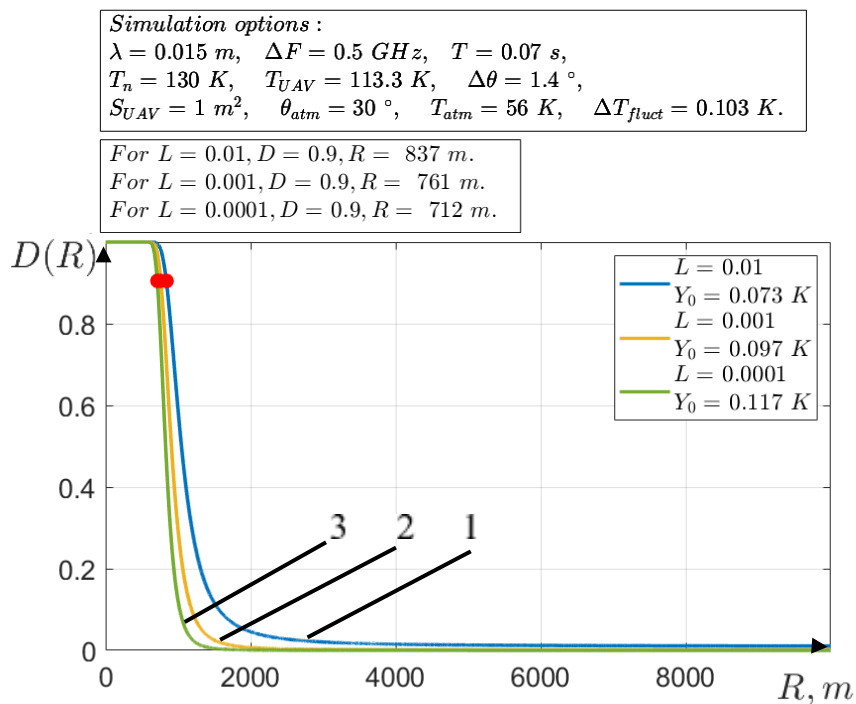


Рисунок 4.30 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.073\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.097\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.117\text{K}$

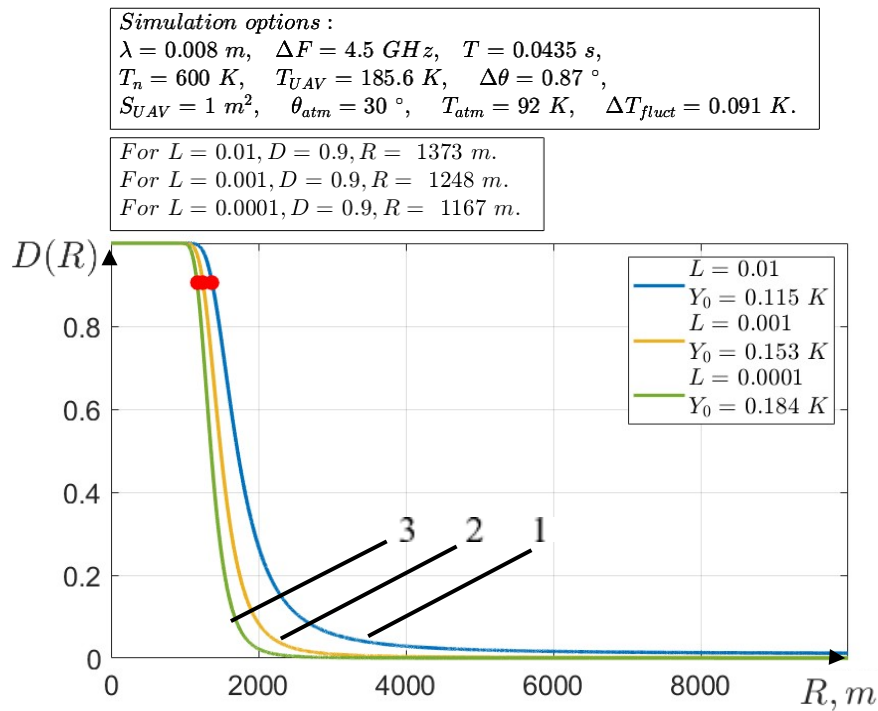


Рисунок 4.31 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.115\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.153\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.184\text{K}$

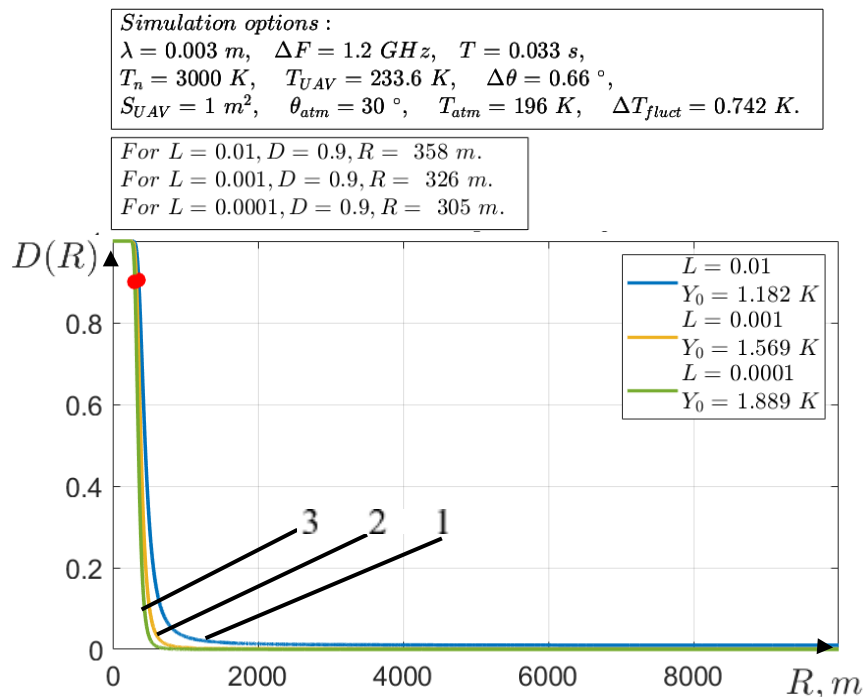


Рисунок 4.32 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=1.182\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=1.569\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=1.889\text{K}$

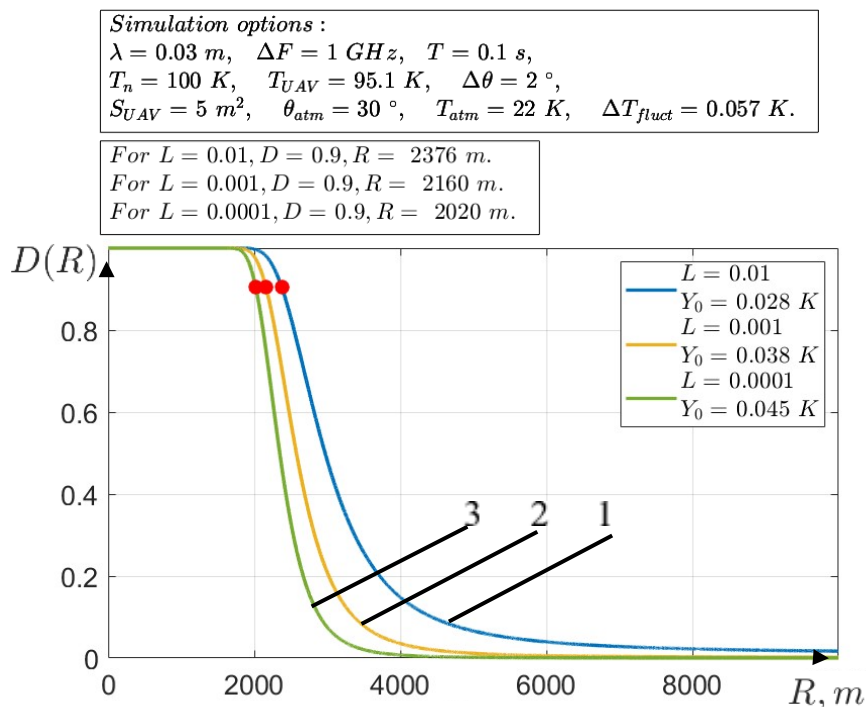


Рисунок 4.33 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.028\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.038\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.045\text{K}$

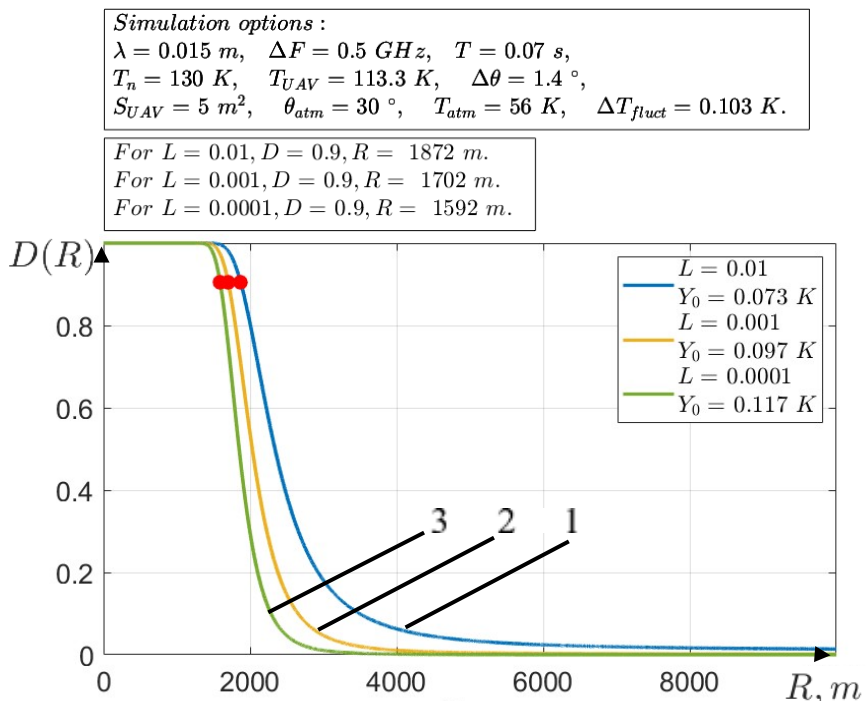


Рисунок 4.34 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.073\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.097\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.117\text{K}$



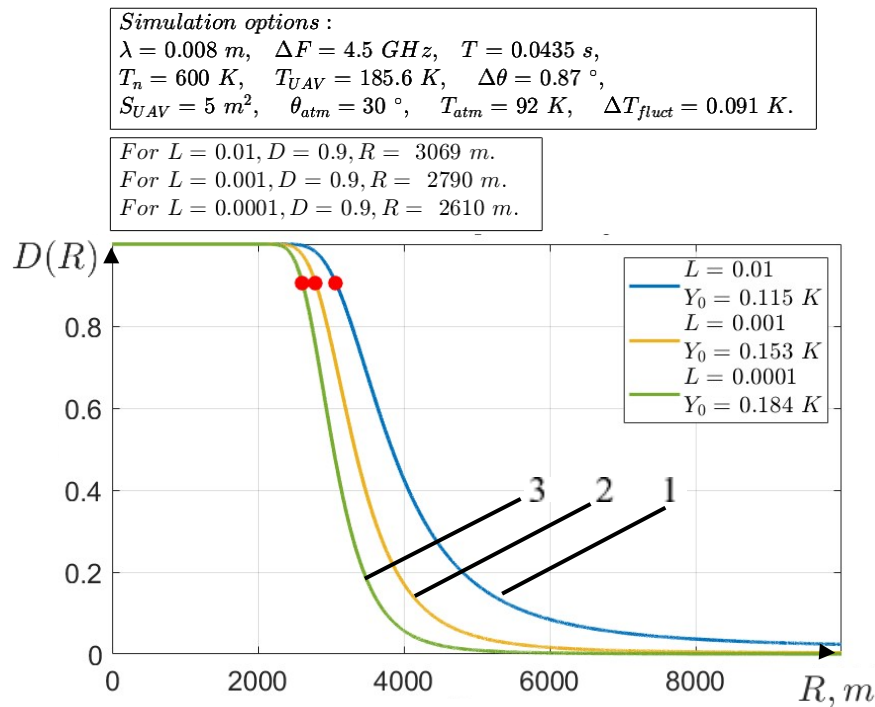


Рисунок 4.35 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.115\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.153\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.184\text{K}$

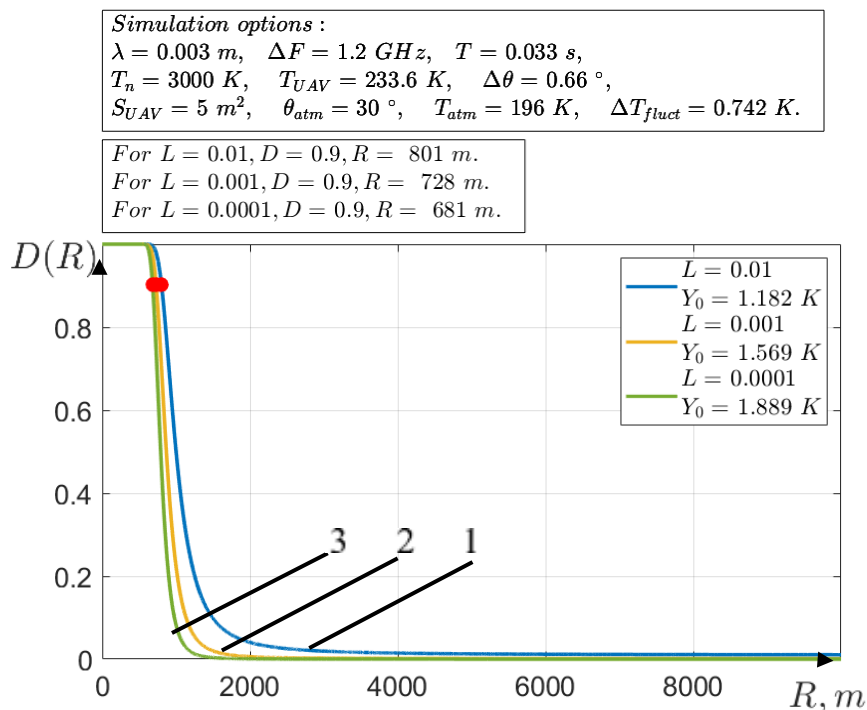


Рисунок 4.36 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=1.182\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=1.569\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=1.889\text{K}$

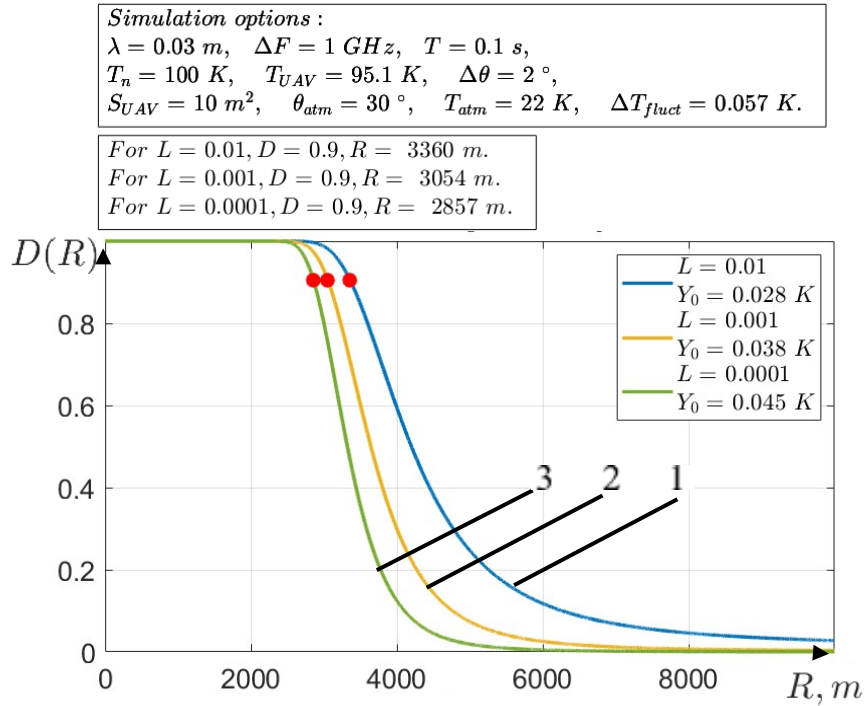


Рисунок 4.37 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.028\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.038\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.045\text{K}$

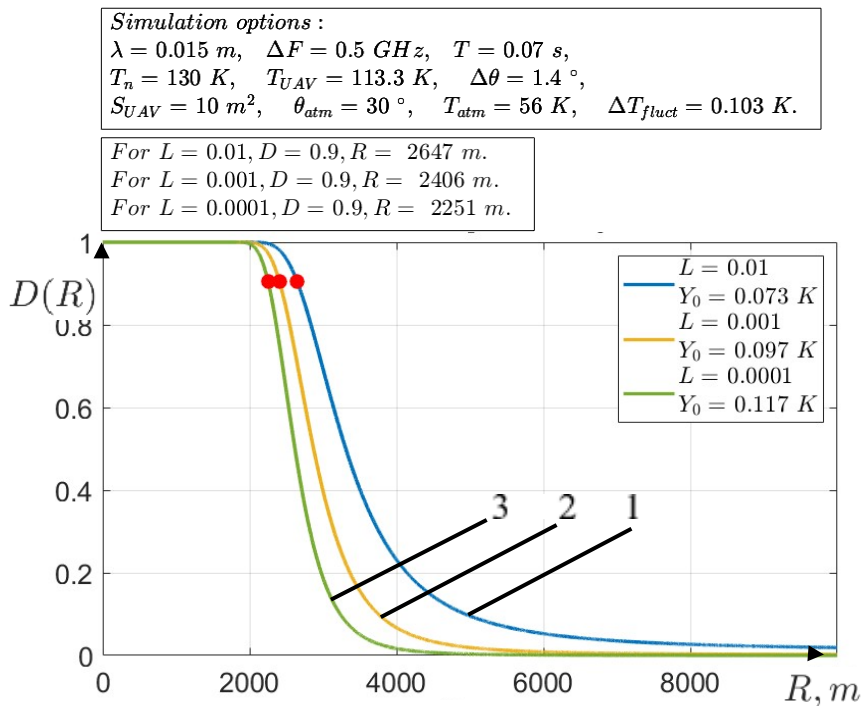


Рисунок 4.38 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.073\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.097\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.117\text{K}$

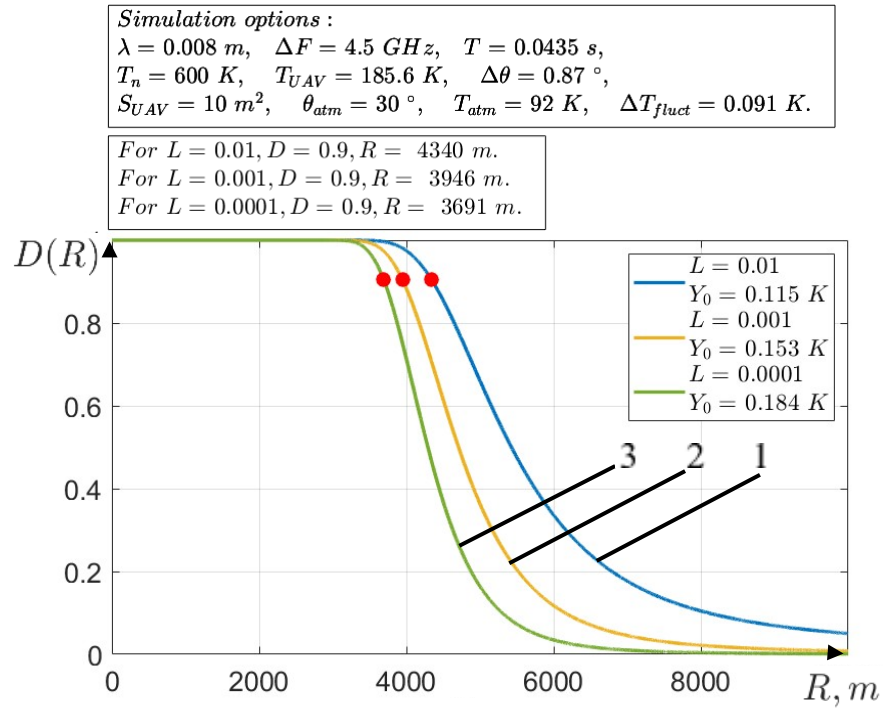


Рисунок 4.39 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.115\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.153\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.184\text{K}$

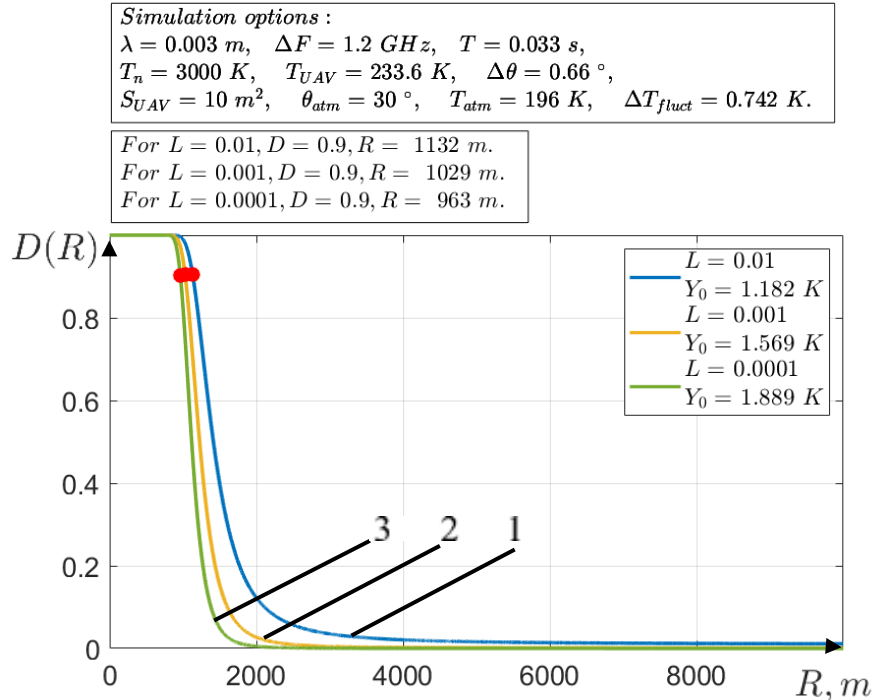


Рисунок 4.40 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.182\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.569\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.889\text{K}$

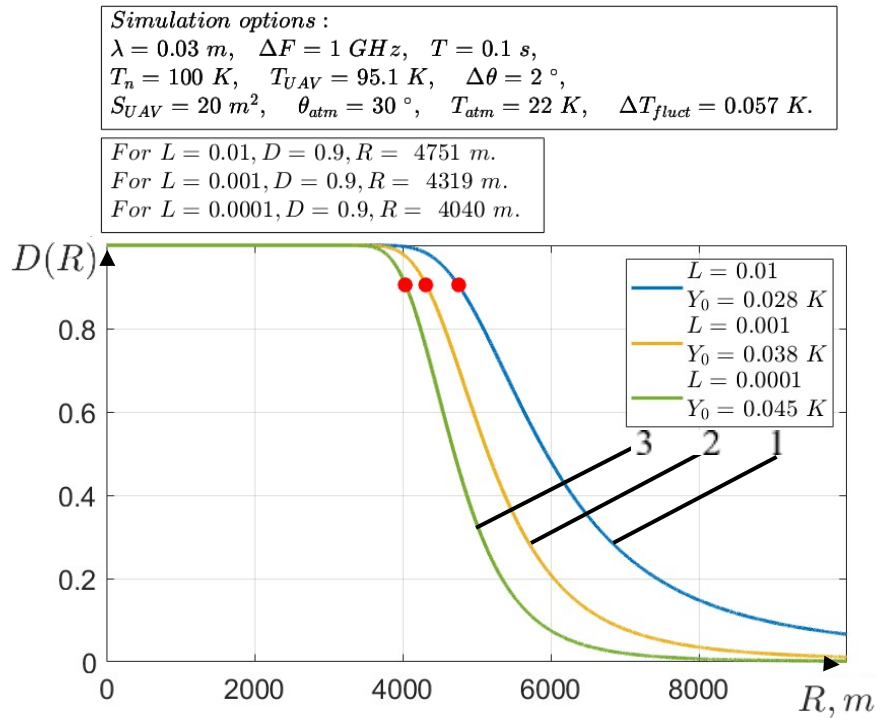


Рисунок 4.41 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.028\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.038\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.045\text{K}$

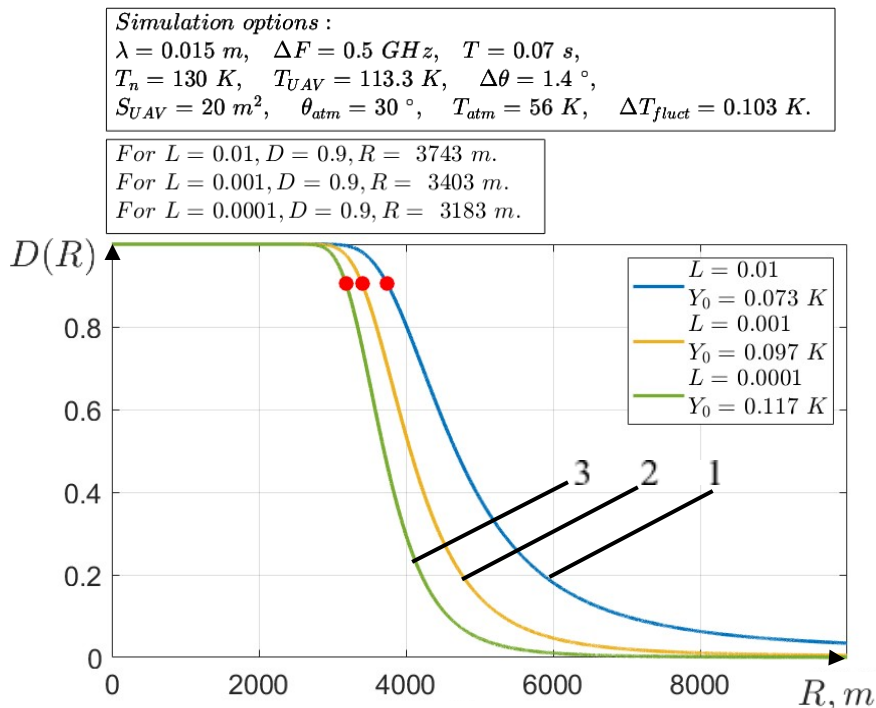


Рисунок 4.42 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.073\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.097\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.117\text{K}$

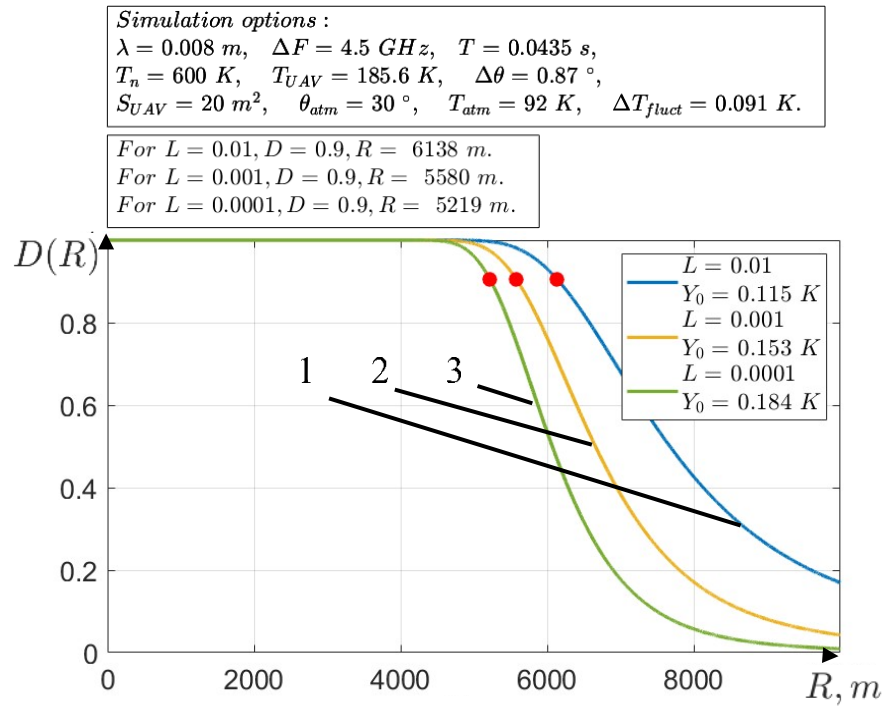


Рисунок 4.43 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.115\text{К}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.153\text{К}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.184\text{К}$

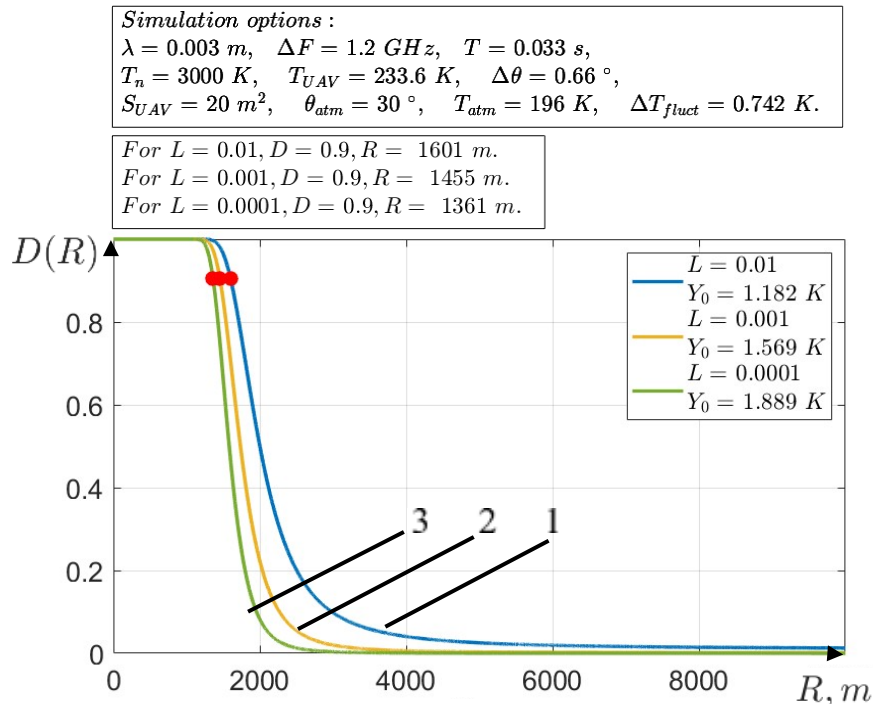


Рисунок 4.44 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.182\text{К}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.569\text{К}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.889\text{К}$

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

Таблиця 4.10 - Значення дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 на тлі хмарної атмосфери

Діапазони частот радіометрів	Розмір БПЛА				
	0,5 м <sup>2</sup>	1 м <sup>2</sup>	5 м <sup>2</sup>	10 м <sup>2</sup>	20 м <sup>2</sup>
10-12 ГГ	752 м (4.19↓ м)	1063 (4.27↓ м)	2376 м (4.60↓ м)	3360 м (4.85↓ м)	4751 м (4.121↓ м)
20-22 ГГц	592 м (4.19↓ м)	837 (4.26↓ м)	1872 м (4.58↓ м)	2647 м (4.82↓ м)	3743 м (4.116↓ м)
35-36 ГГц	971 м (4.40↓ м)	1373 (4.56↓ м)	3069 м (4.126↓ м)	4340 м (4.178↓ м)	6138 м (4.252↓ м)
94-96 ГГц	253 м (4.257↓ м)	358 (4.363↓ м)	801 м (4.810↓ м)	1132 м (4.1146↓ м)	1601 м (4.1620↓ м)

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 0,5 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° під час дощу в залежності від дальності показані на рисунку 4.45- рисунку 4.47 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 1 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° під час дощу в залежності від дальності показані на рисунку 4.48- рисунку 4.50 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 5 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° під час дощу в залежності від дальності показані на рисунку 4.51- рисунку 4.53. (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 10 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° під час дощу в залежності від дальності показані на рисунку 4.54- рисунку 4.56 (для ймовірності хибної тривоги L).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром 20 м<sup>2</sup> з склотекстоліту під кутом візування 30° під час дощу в залежності від дальності показані на рисунку 4.57- рисунку 4.59 (для ймовірності хибної тривоги L).

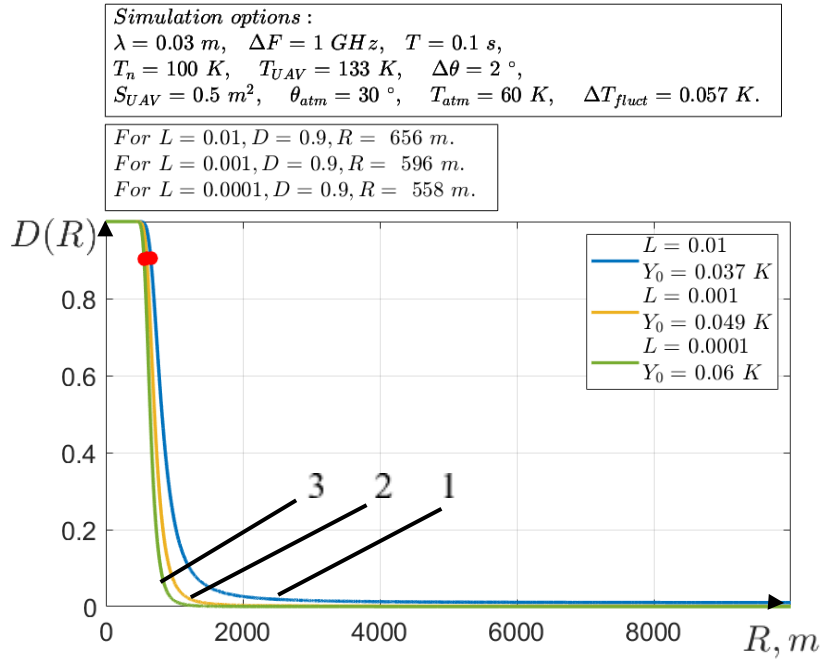


Рисунок 4.45 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.037\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.049\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.06\text{K}$

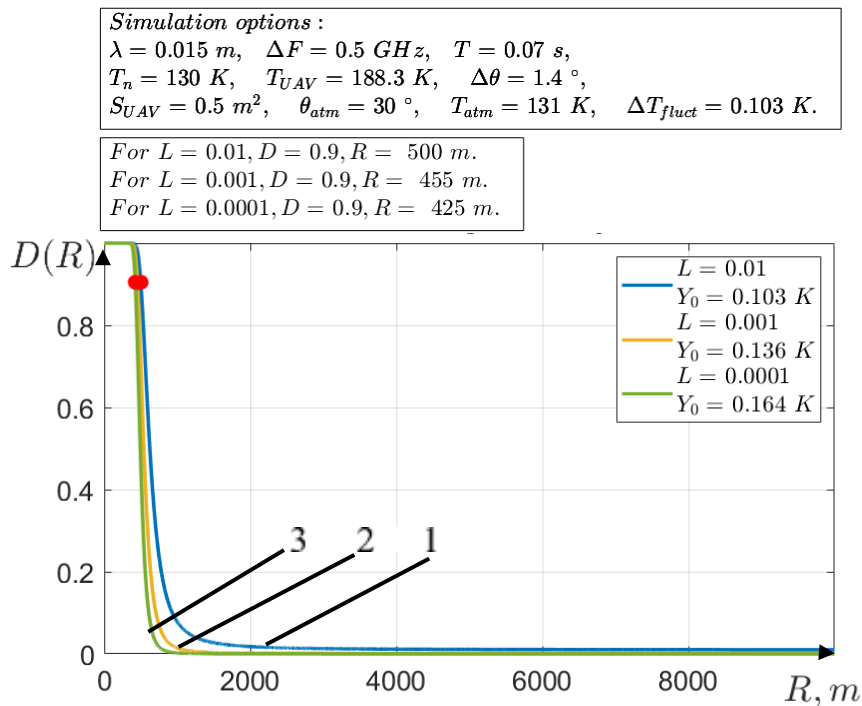


Рисунок 4.46 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.103\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.136\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.164\text{K}$

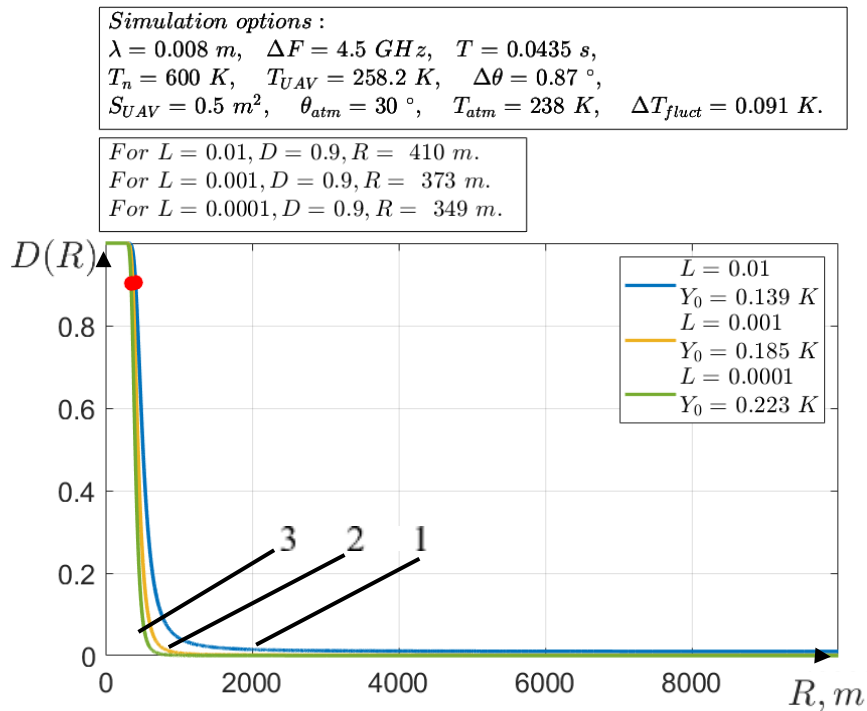


Рисунок 4.47 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $0,5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.139\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.185\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.223\text{K}$

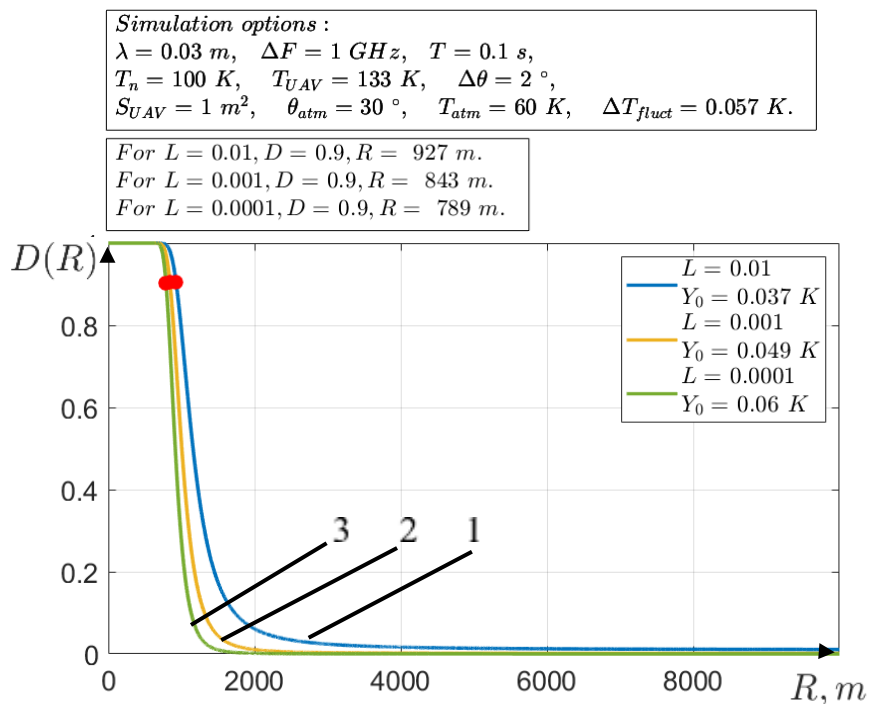


Рисунок 4.48 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.037\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.049\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.06\text{K}$



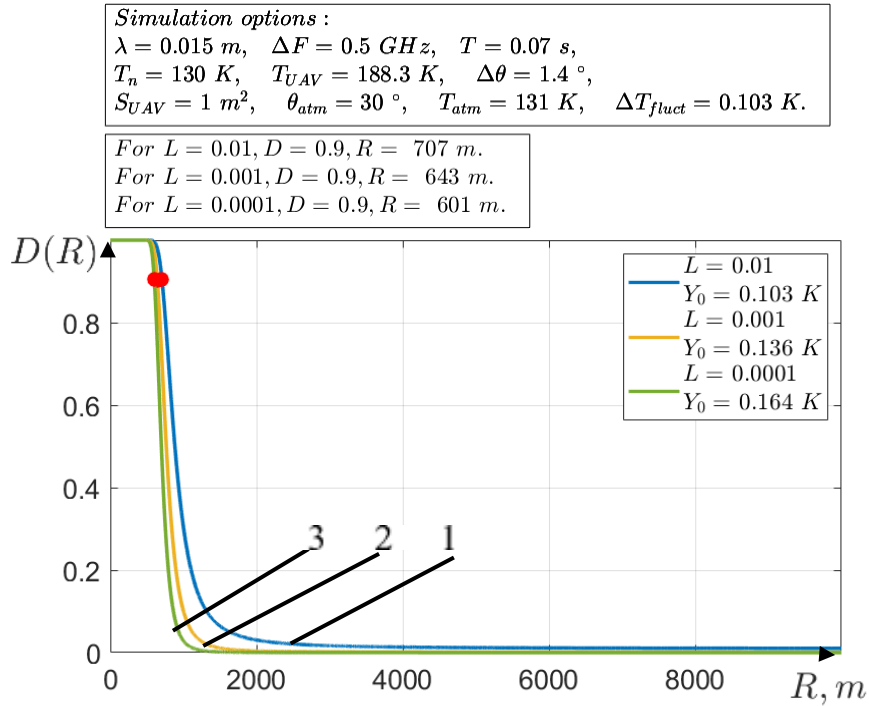


Рисунок 4.49 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.103\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.136\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.164\text{K}$

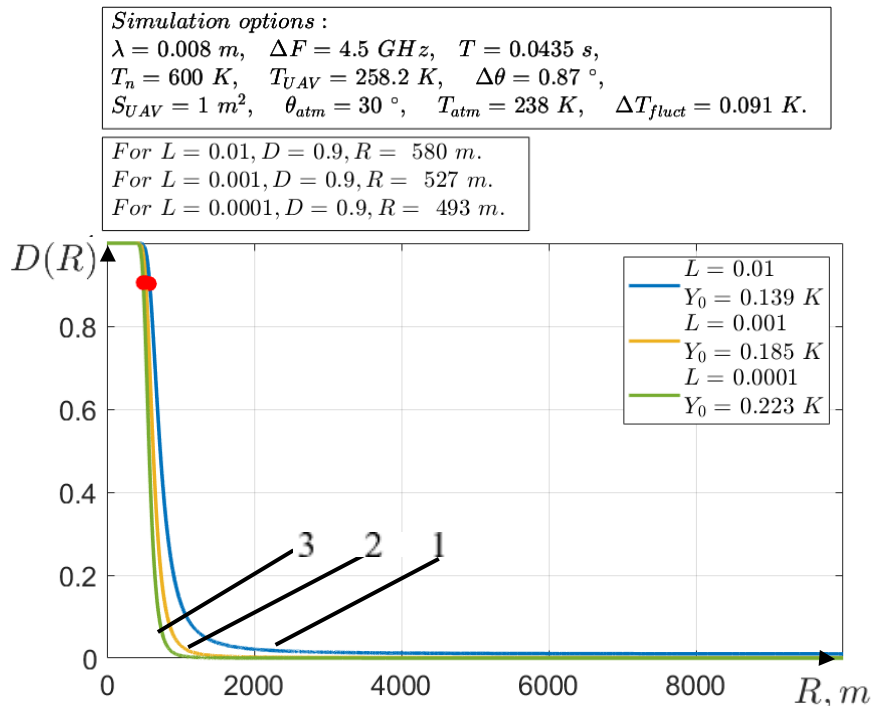


Рисунок 4.50 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.139\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.185\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.223\text{K}$

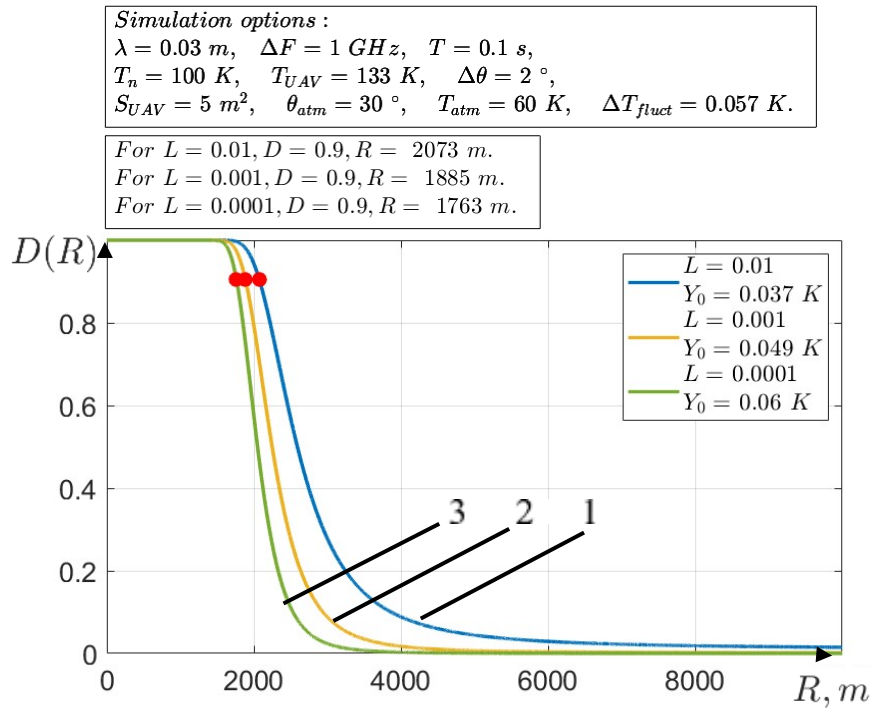


Рисунок 4.51 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.037\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.049\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.06\text{K}$

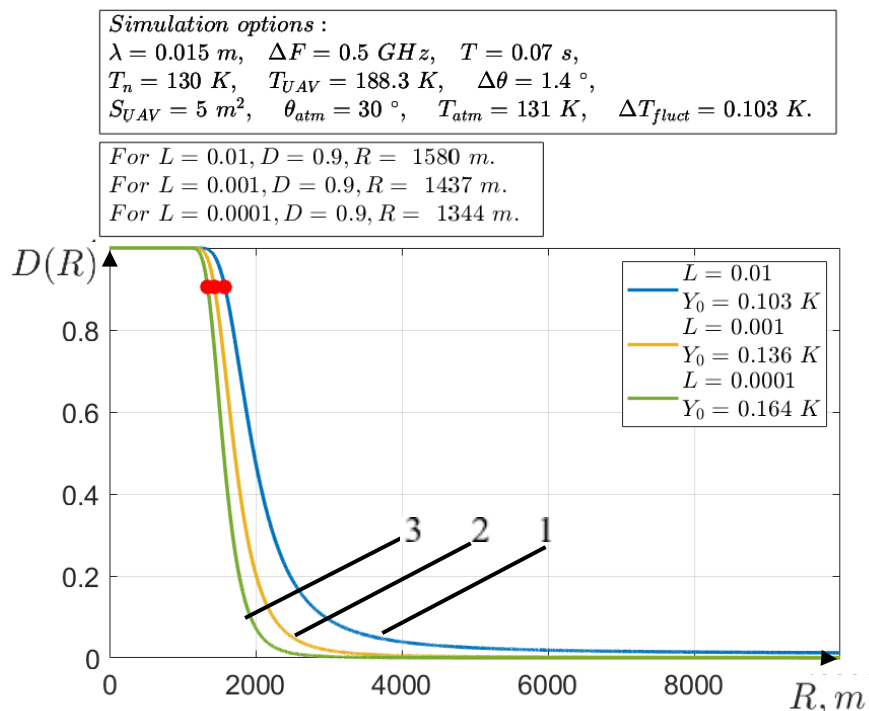


Рисунок 4.52 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.103\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.136\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.164\text{K}$

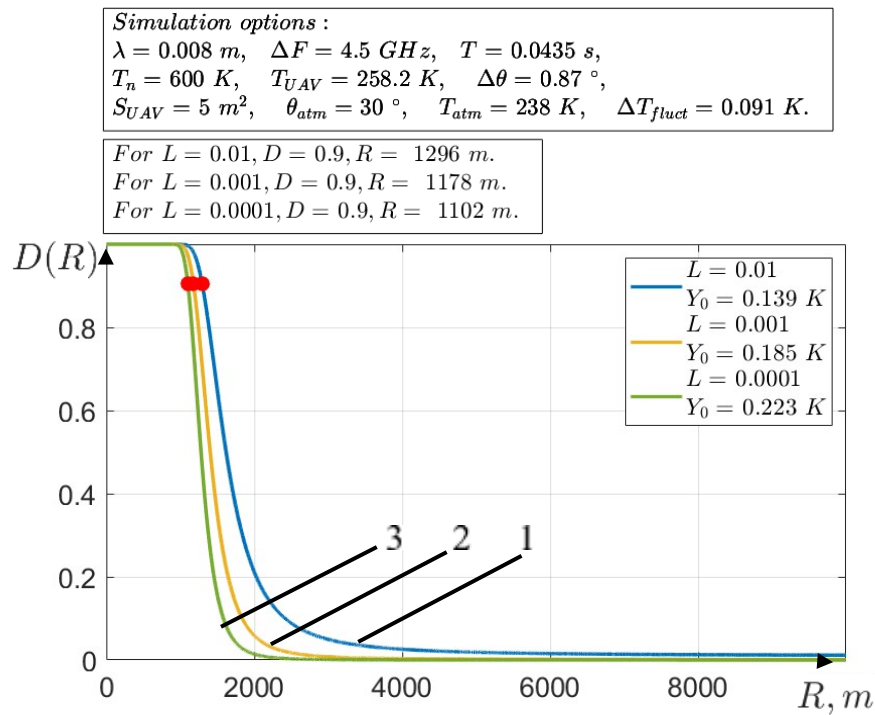


Рисунок 4.53 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $5 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.139\text{К}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.185\text{К}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.223\text{К}$

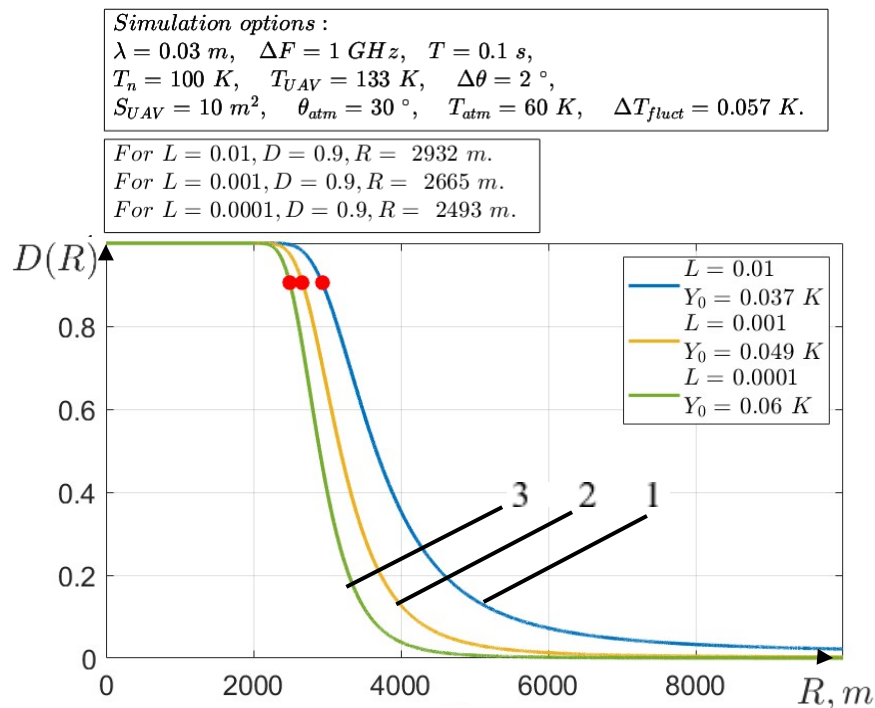


Рисунок 4.54 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.037\text{К}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.049\text{К}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.06\text{К}$

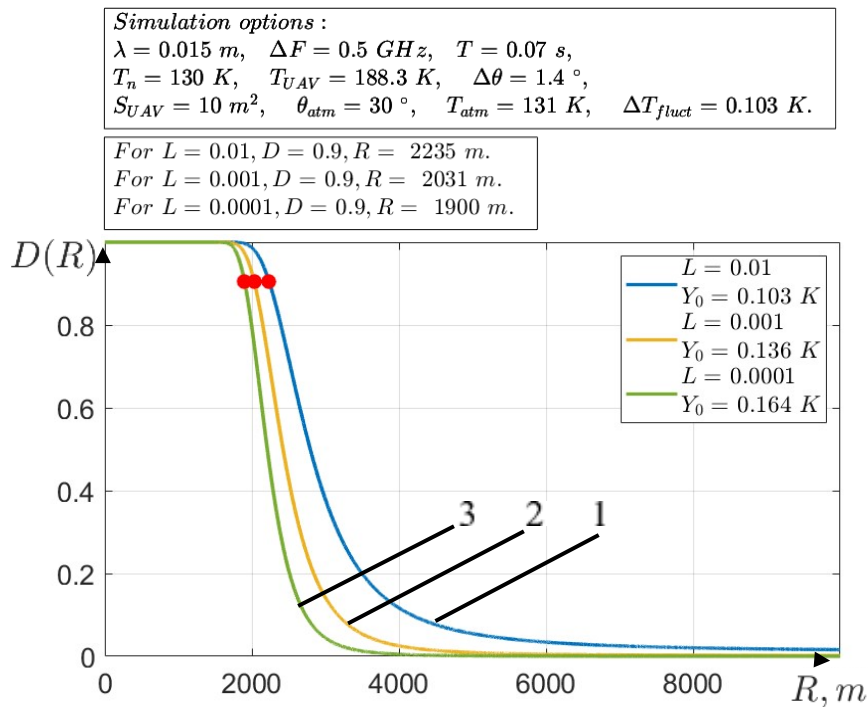


Рисунок 4.55 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.103\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.136\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.164\text{K}$

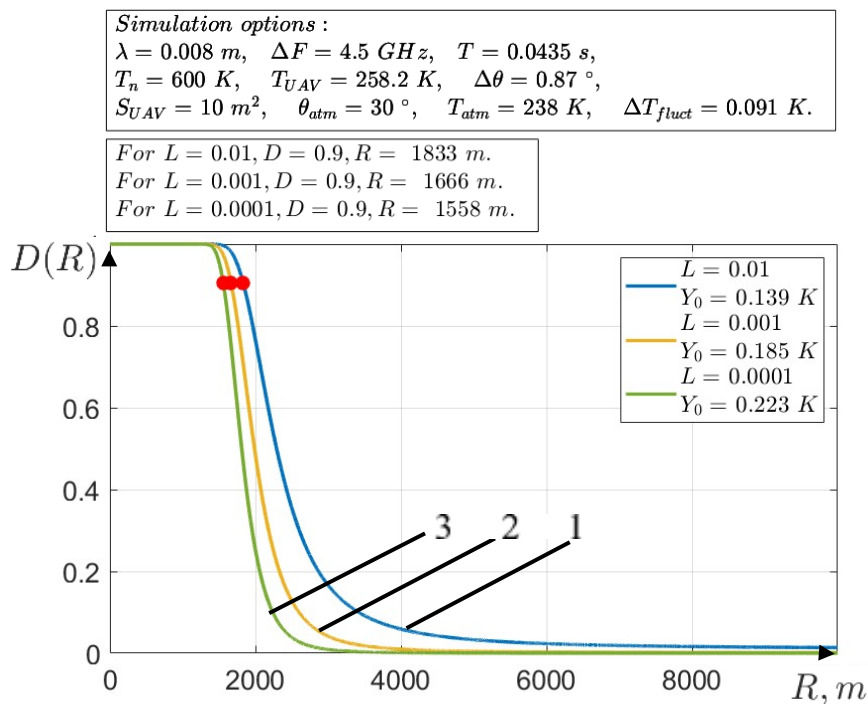


Рисунок 4.56 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $10 \text{ м}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.139\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.185\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.223\text{K}$

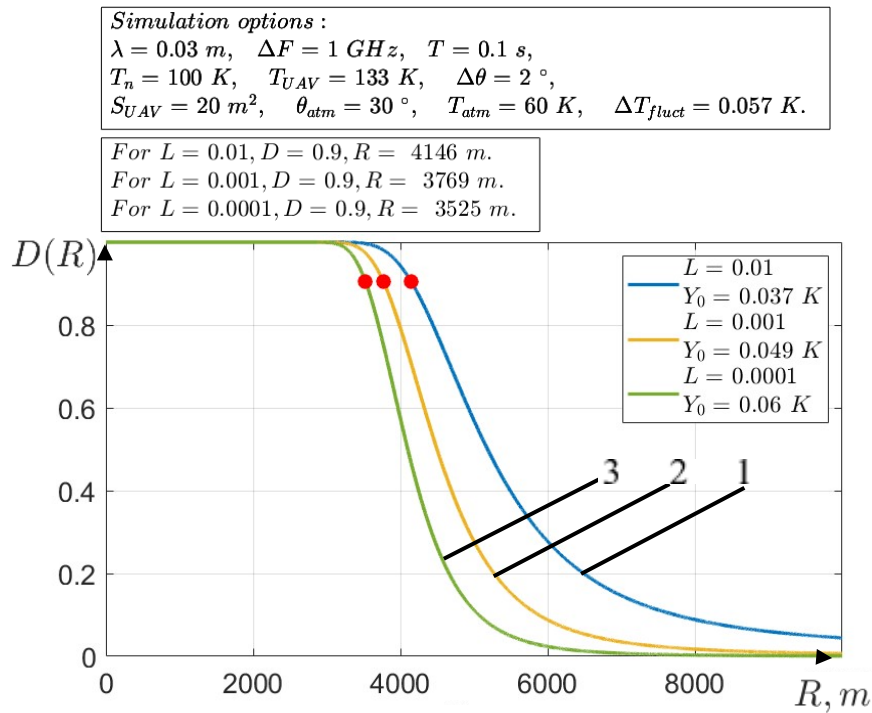


Рисунок 4.57 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.037\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.049\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.06\text{K}$

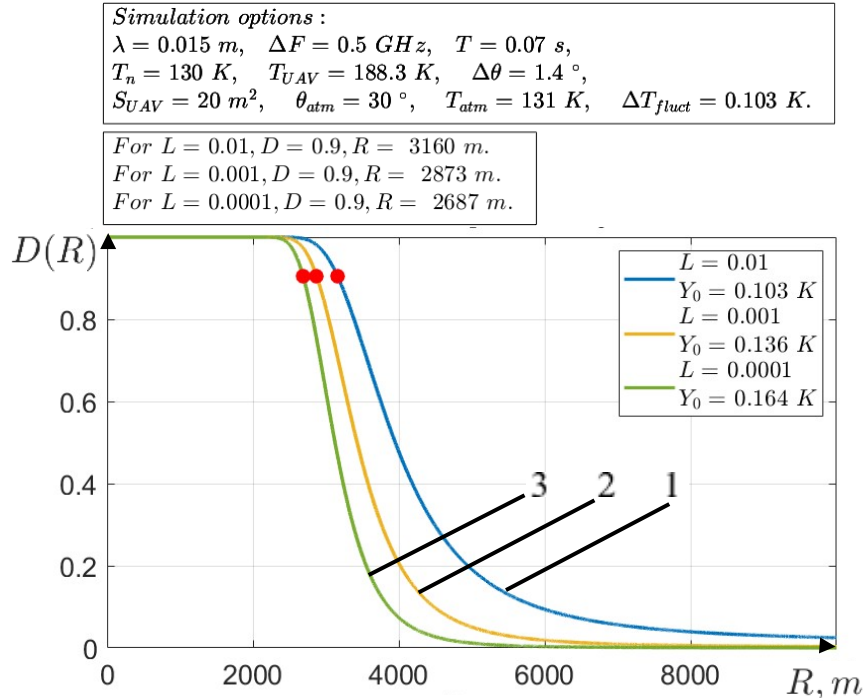


Рисунок 4.58 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 20-22 ГГц:

- 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.103\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.136\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.164\text{K}$

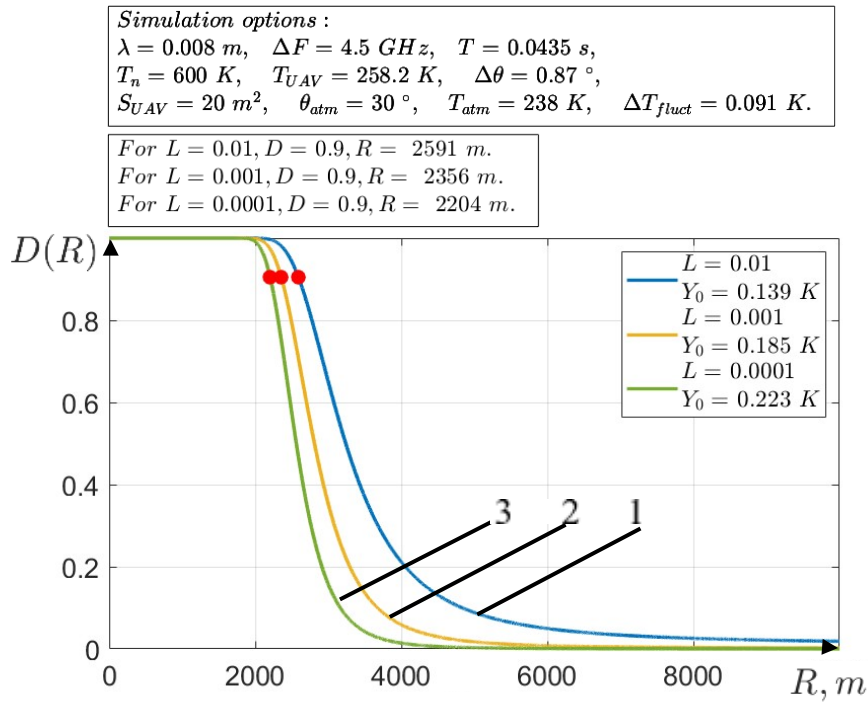


Рисунок 4.59 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $20 \text{ m}^2$  для радіометру діапазону 35-36 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.139\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.185\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.223\text{K}$

Для радіометричного приймача, що працює у діапазоні 94-96 ГГц графіки ймовірності виявлення БПЛА в залежності від дальності на наведені. Це пов'язано з тим, що у цьому діапазоні частот майже відсутній приріст яскравісної температури БПЛА  $\Delta T_{БнЛ\Lambda}^\circ$  над температурою атмосфери  $T_{atm}^\circ$ . Це можна

побачити на графіках залежності  $\Delta T_{БнЛ\Lambda}^\circ$  і  $T_{atm}^\circ$  від кутів візування, що показані на рисунку 4.60 у різних масштабах.

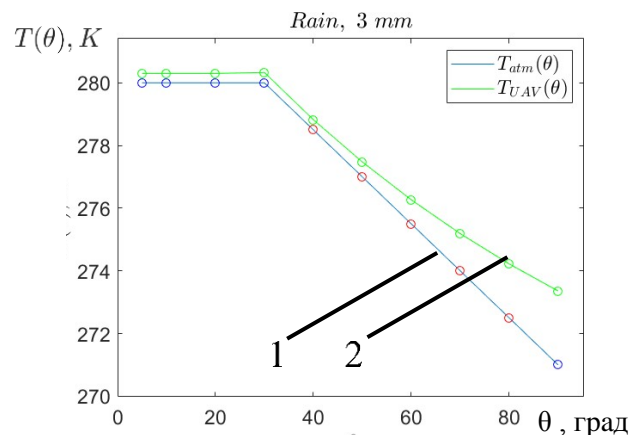


Рисунок 4.60 – Залежності  $\Delta T_{БнЛ\Lambda}^\circ$  і  $T_{atm}^\circ$  від кутів візування для діапазону

температур від 270 К: 1 – при  $T_{atm}^\circ(\theta)$ ; 2 – при  $T_{UAV}^\circ(\theta)$

З аналізу наведених залежностей на рисунку 4.60 слідує, що виявити БПЛА у цьому діапазоні частот під час дощу можливо лише, коли БПЛА повністю заповнить діаграму спрямованості. Максимальні значення дальності для таких випадків наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 - Значення дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 під час дощу для діапазону частот 94-96 ГГц

Розмір БПЛА				
0,5 м <sup>2</sup>	1 м <sup>2</sup>	5 м <sup>2</sup>	10 м <sup>2</sup>	20 м <sup>2</sup>
80 м	90 м	180 м	250 м	360 м

Зведені відомості про дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9 під час ясної атмосфери, хмарної атмосфери та дощу для  $L = 10^{-2}$  наведені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 - Узагальнені значення дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,9

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

### 4.3 Розрахунок ймовірності правильного виявлення в залежності від кута візування

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі ясної атмосфери в залежності від кута візування показані на рисунку 4.61- рисунку 4.64.

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі хмарної атмосфери в залежності від кута візування показані на рисунку 4.65 - рисунку 4.68. Для діапазону частот  $94\text{-}96 \text{ ГГц}$  розрахунки виконані на відстані  $400 \text{ м}$  через низьке значення приросту  $\Delta T_{\text{БнЛА}}^\circ$ .

Ймовірність правильного виявлення БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  під час дощу в залежності від кута візування показані на рисунку 4.69- рисунку 4.72. Для діапазону частот  $94\text{-}96 \text{ ГГц}$  розрахунки виконані на відстані  $100 \text{ м}$ .

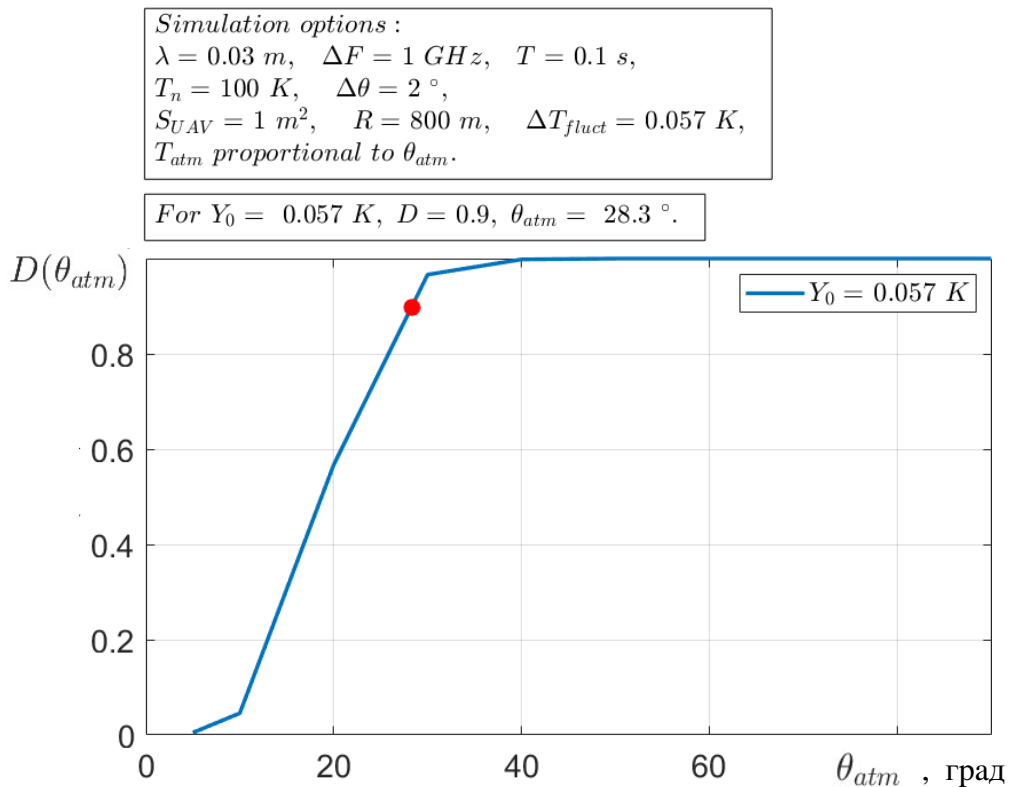


Рисунок 4.61 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі ясної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{\text{atm}}$  для радіометру діапазону  $10\text{-}12 \text{ ГГц}$



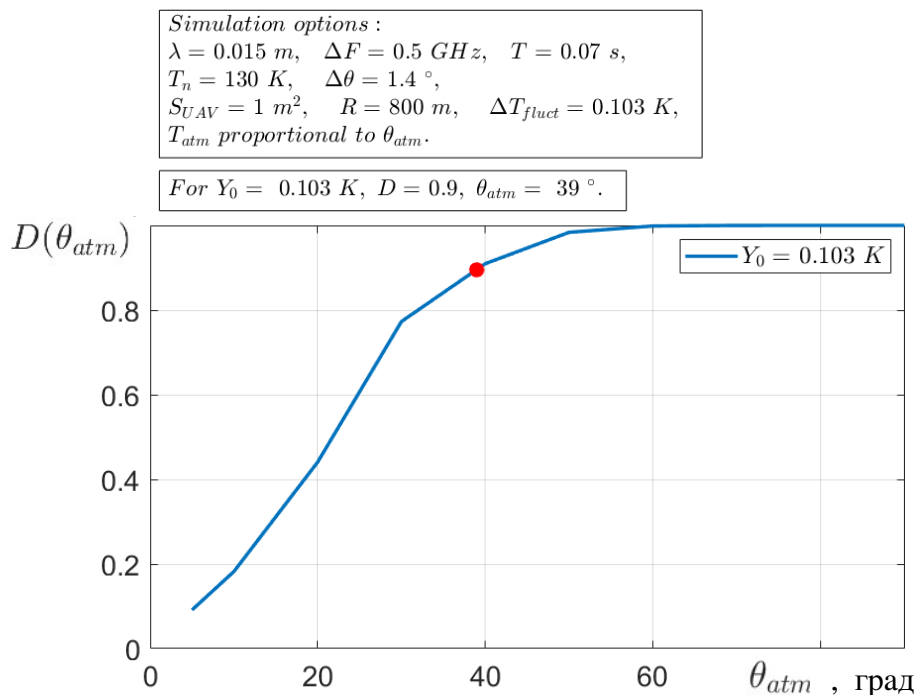


Рисунок 4.62 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі ясної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $20\text{-}22 \text{ ГГц}$

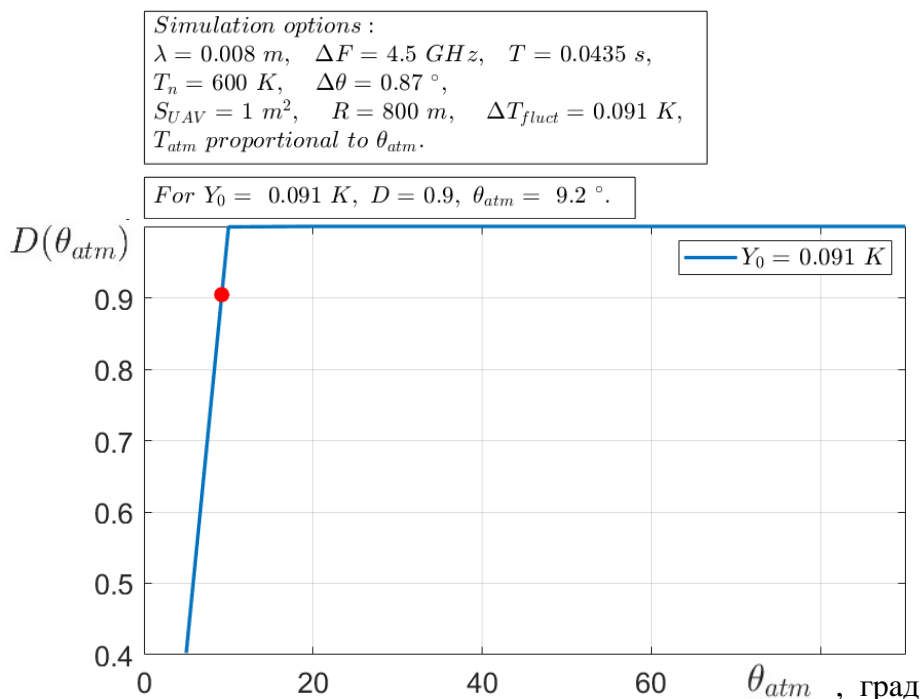


Рисунок 4.63 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі ясної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $35\text{-}36 \text{ ГГц}$

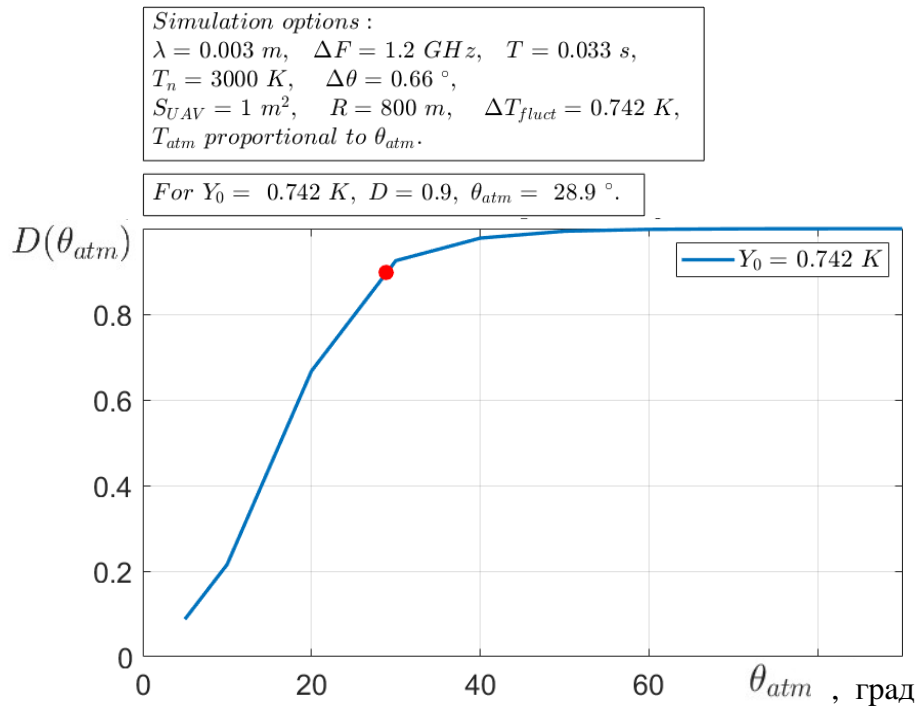


Рисунок 4.64 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі ясної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $94\text{-}96 \text{ ГГц}$

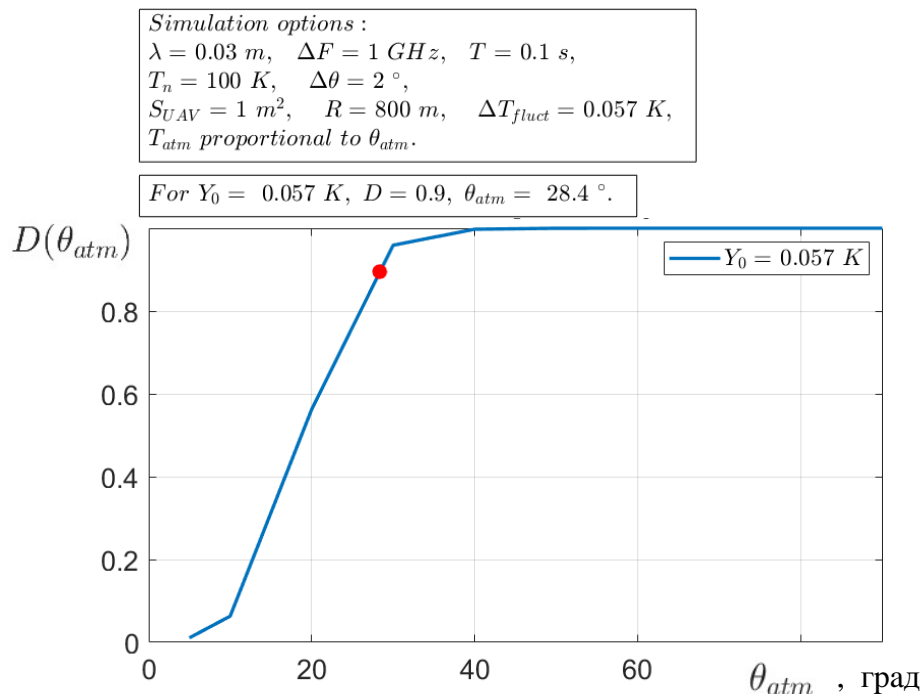


Рисунок 4.65 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі хмарної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $10\text{-}12 \text{ ГГц}$

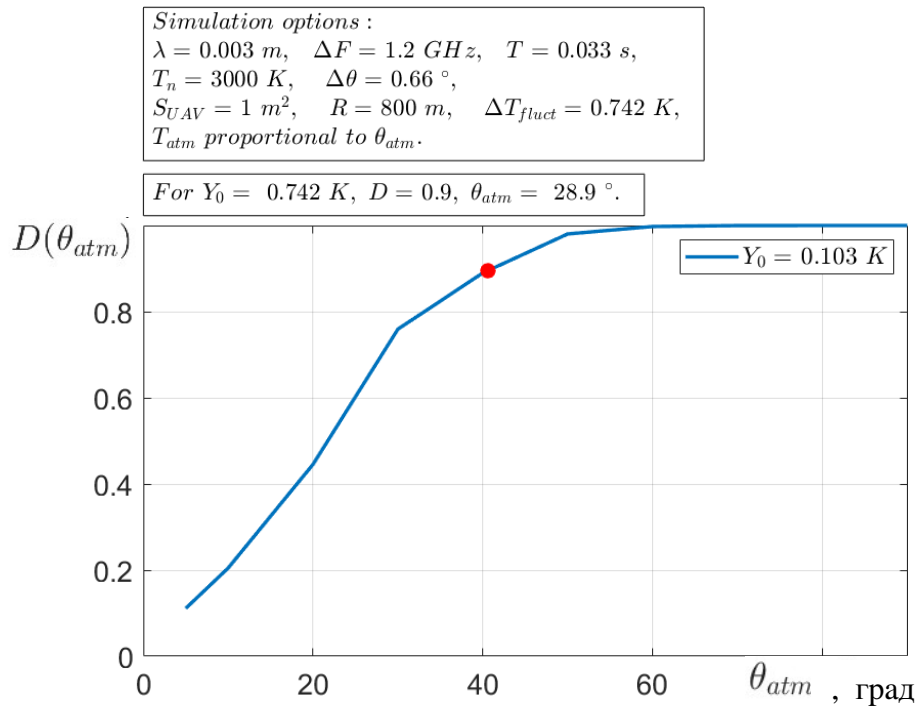


Рисунок 4.66 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі хмарної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $20\text{-}22 \text{ ГГц}$

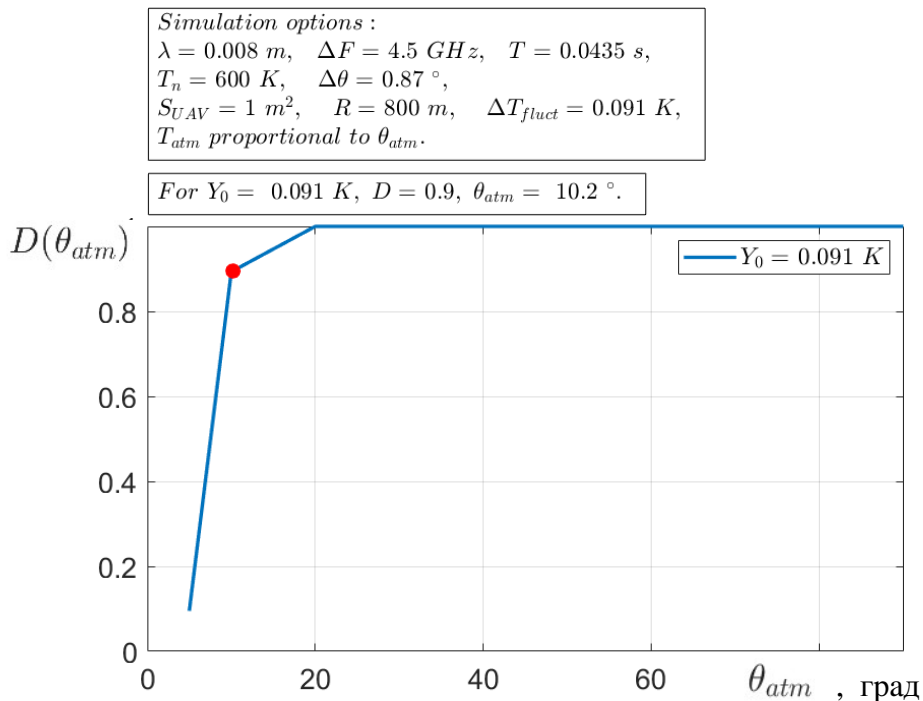


Рисунок 4.67 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  на тлі хмарної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $35\text{-}36 \text{ ГГц}$

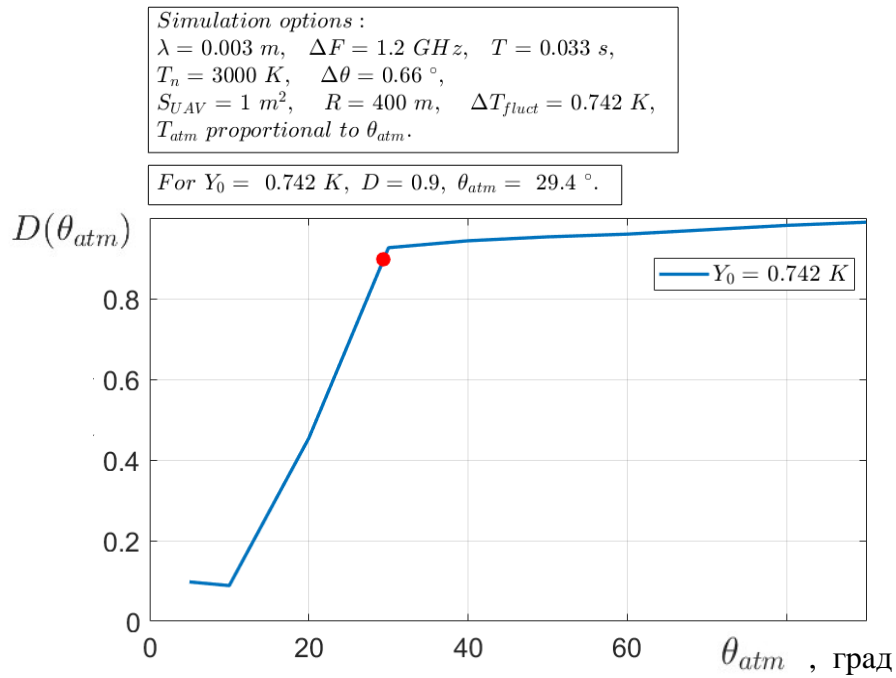


Рисунок 4.68 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $400 \text{ м}$  на тлі хмарної атмосфери в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $94\text{-}96 \text{ ГГц}$

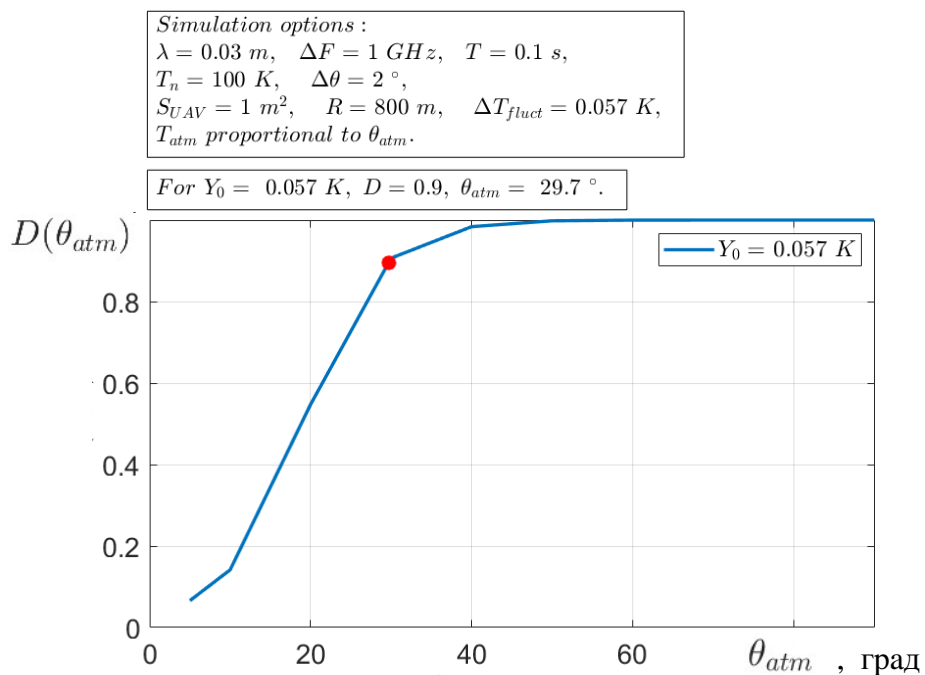


Рисунок 4.69 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  під час дощу в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $10\text{-}12 \text{ ГГц}$

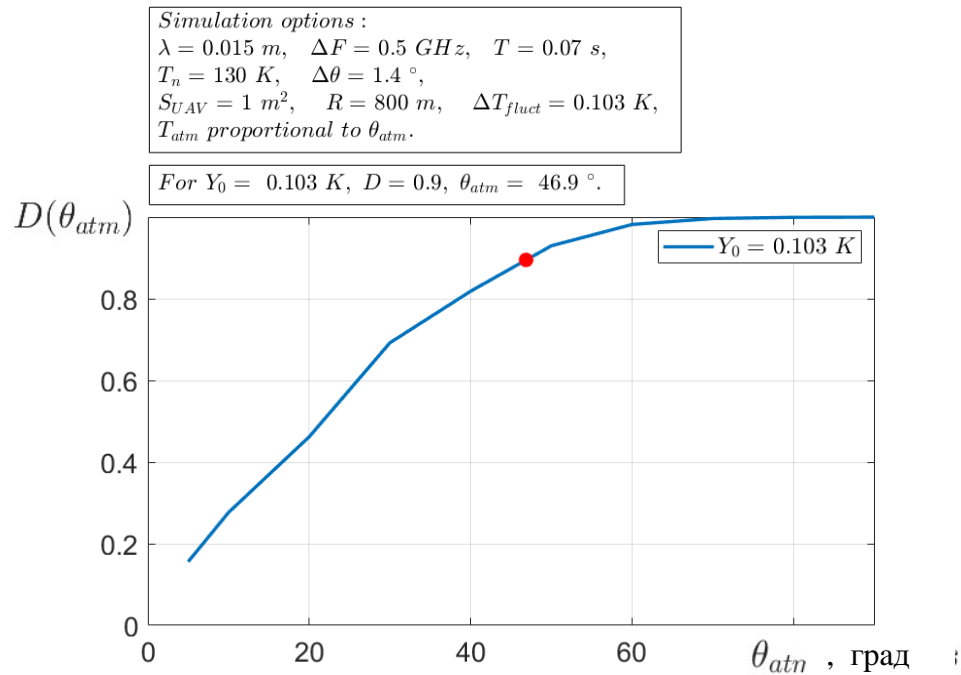


Рисунок 4.70 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  під час дощу в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $20\text{-}22 \text{ ГГц}$

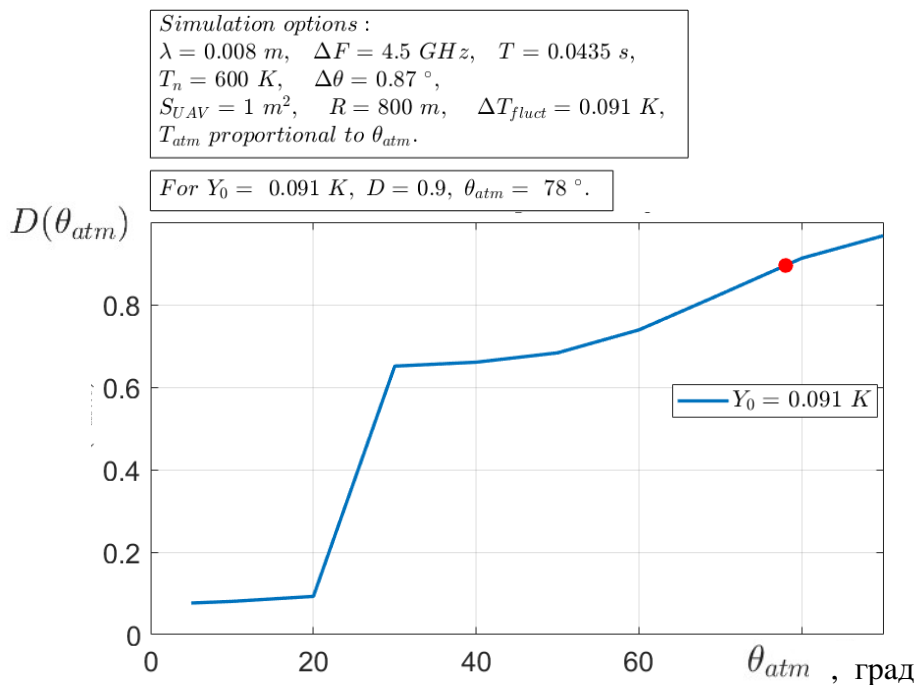


Рисунок 4.71 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $800 \text{ м}$  під час дощу в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $35\text{-}36 \text{ ГГц}$

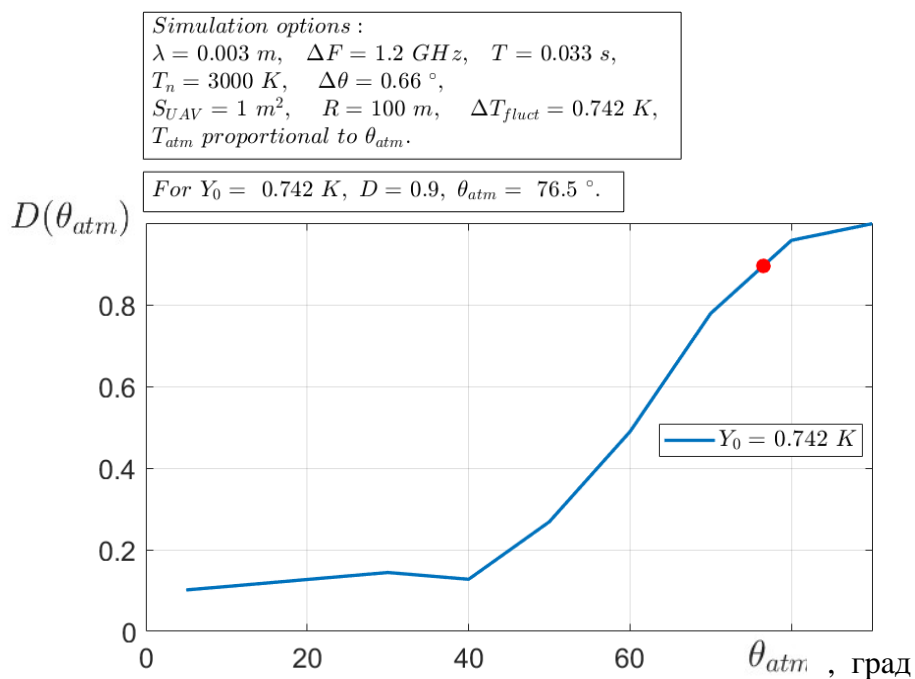


Рисунок 4.72 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з склотекстоліту на відстані  $100 \text{ м}$  під час дощу в залежності від кута візування  $\theta_{atm}$  для радіометру діапазону  $94\text{-}96 \text{ ГГц}$

Отримані результати розрахунку граничного кута візування, при якому можливе виявлення БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$  з ймовірністю  $0,9$  для різних погодних умов, наведені в таблиці 4.13. Для всіх діапазонів частот, окрім  $94\text{-}96 \text{ ГГц}$  дальність виявлення дорівнювала  $800 \text{ м}$ .

Таблиця 4.13 - Мінімальні значення кута візування БПЛА розміром  $1 \text{ м}^2$ , при якому ймовірність виявлення дорівнює  $0,9$

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° (на відстані 400 м)
Дощ	29,7°	46,9°	78°	76,5° (на відстані 100 м)

#### 4.4 Розрахунок ймовірності правильного виявлення в залежності від розміру БПЛА

Ймовірність правильного виявлення БПЛА з склотекстоліту на відстані 1500 м на тлі ясної атмосфери в залежності від його розміру показані на рисунку 4.73- рисунку 4.76 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА з склотекстоліту на відстані 1500 м на тлі хмарної атмосфери в залежності від його розміру показані на рисунку 4.77- рисунку 4.80 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

Ймовірність правильного виявлення БПЛА з склотекстоліту на відстані 1500 м під час дощу в залежності від його розміру показані на рисунку 4.81- рисунку 4.84 (для ймовірності хибної тривоги  $L$ ).

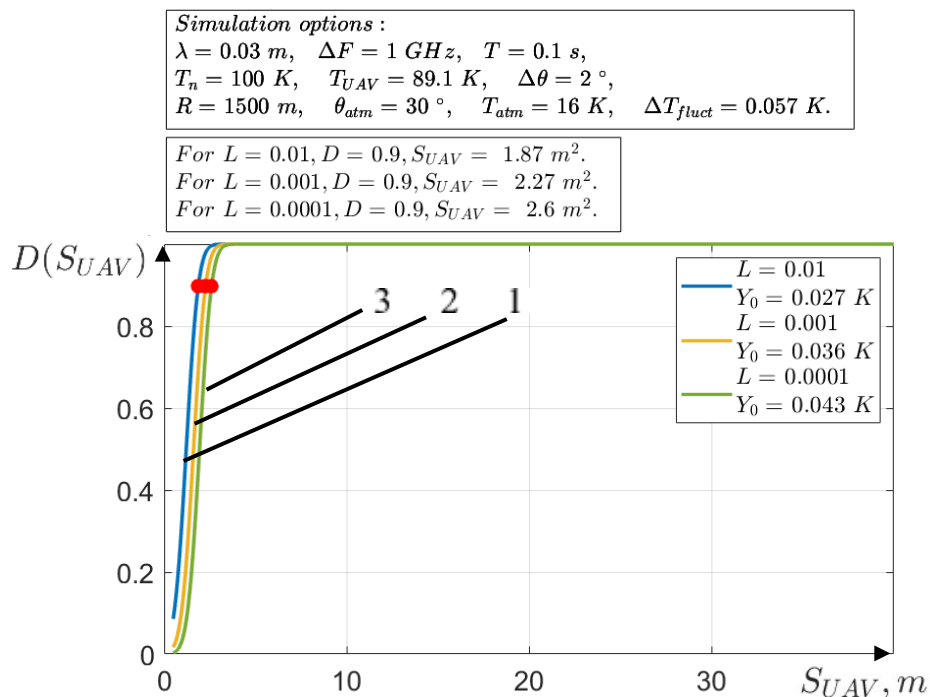


Рисунок 4.73 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі ясної атмосфери для радіометру діапазону 10-12 ГГц:

1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.027\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.036\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.043\text{K}$

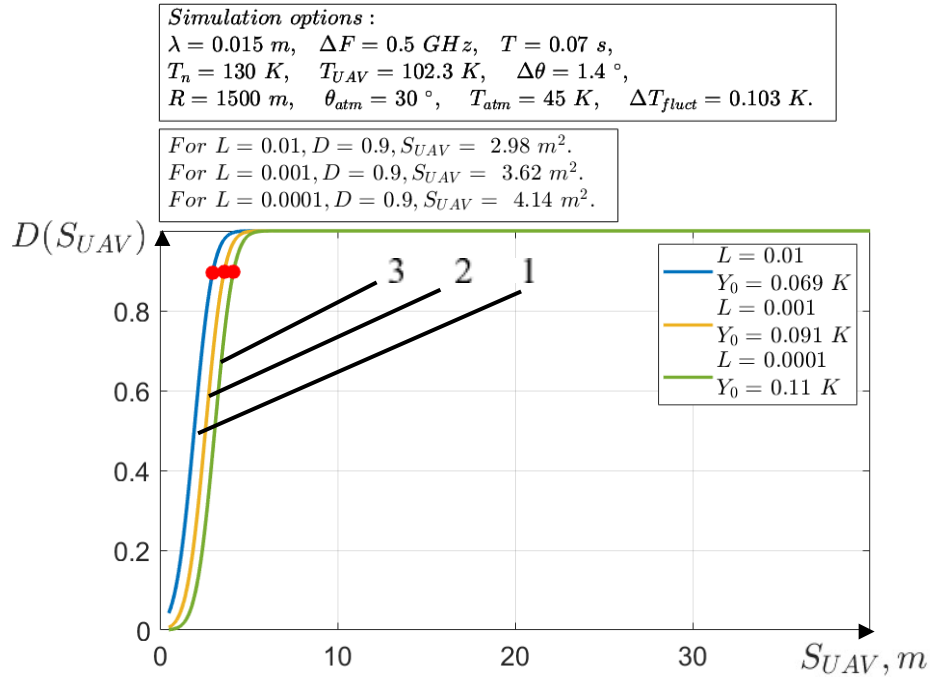


Рисунок 4.74 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі ясної атмосфери для радіометру діапазону 20-22 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.069\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.091\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.11\text{K}$

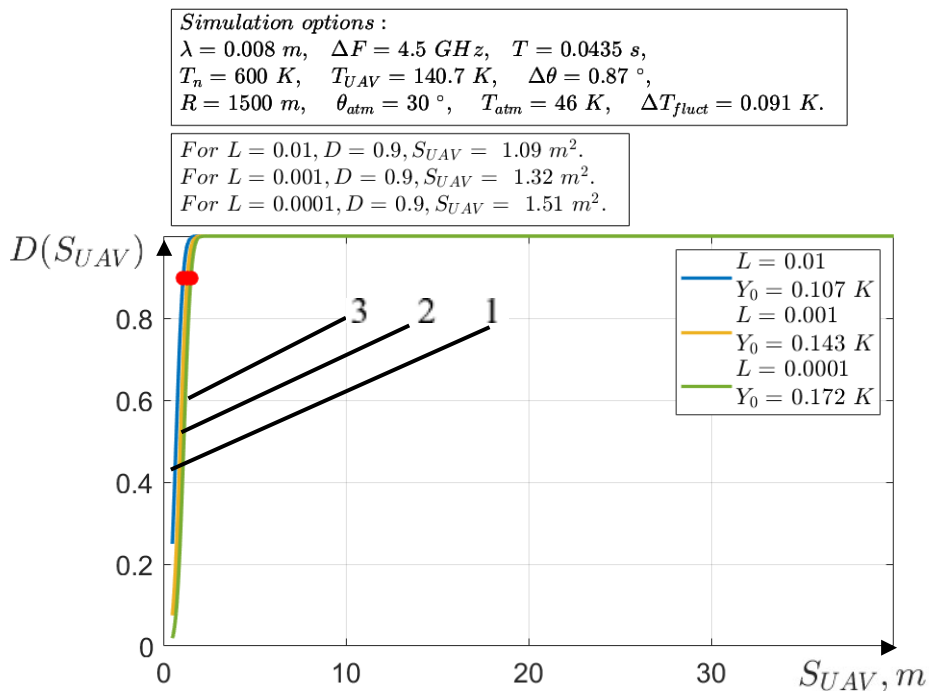


Рисунок 4.75 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі ясної атмосфери для радіометру діапазону 35-36 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.107\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.143\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.172\text{K}$



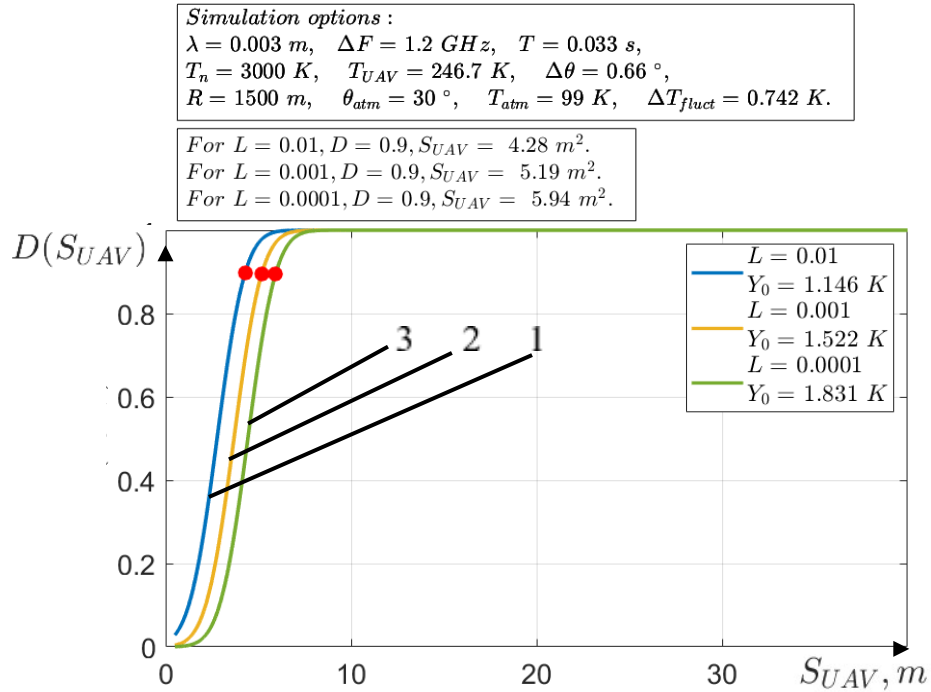


Рисунок 4.76 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі ясної атмосфери для радіометру діапазону 94-96 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.146\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.522\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.831\text{K}$

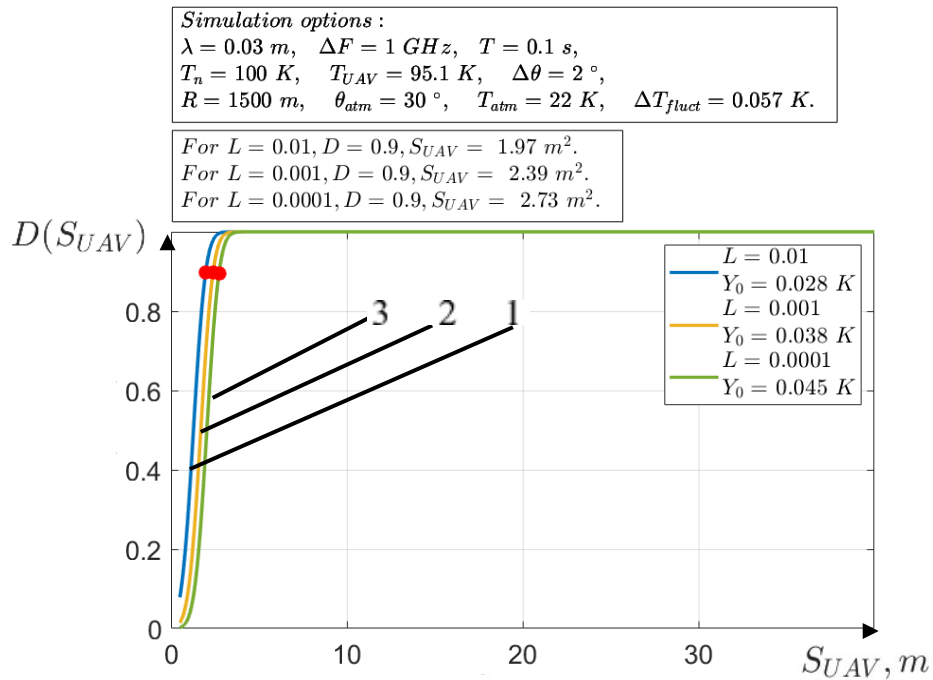


Рисунок 4.77 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі хмарної атмосфери для радіометру діапазону 10-12 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.028\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.038\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.045\text{K}$

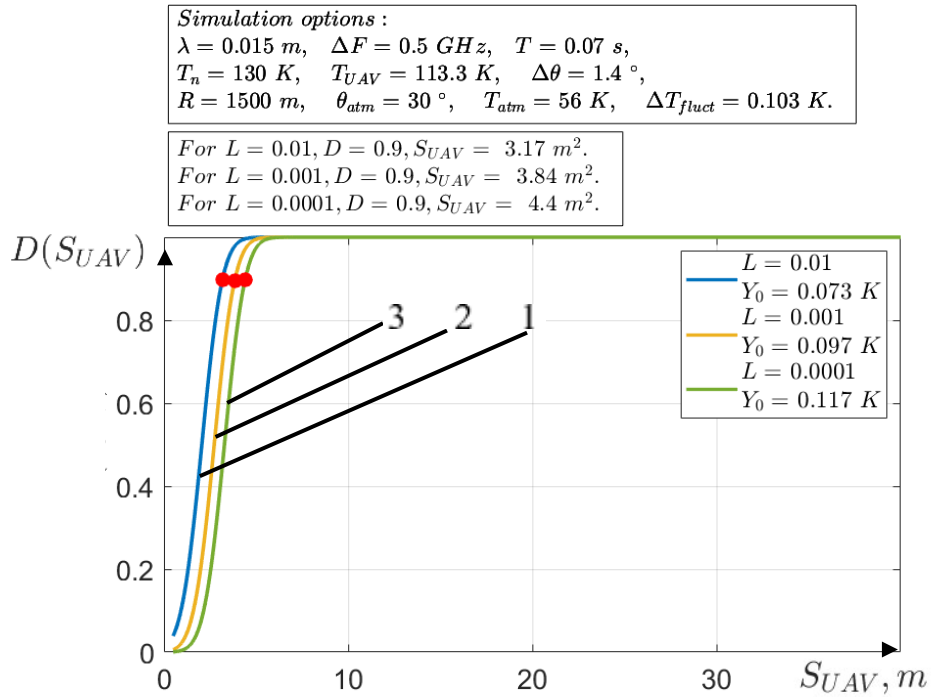


Рисунок 4.78 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі хмарної атмосфери для радіометру діапазону 20-22 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.073\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.097\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.117\text{K}$

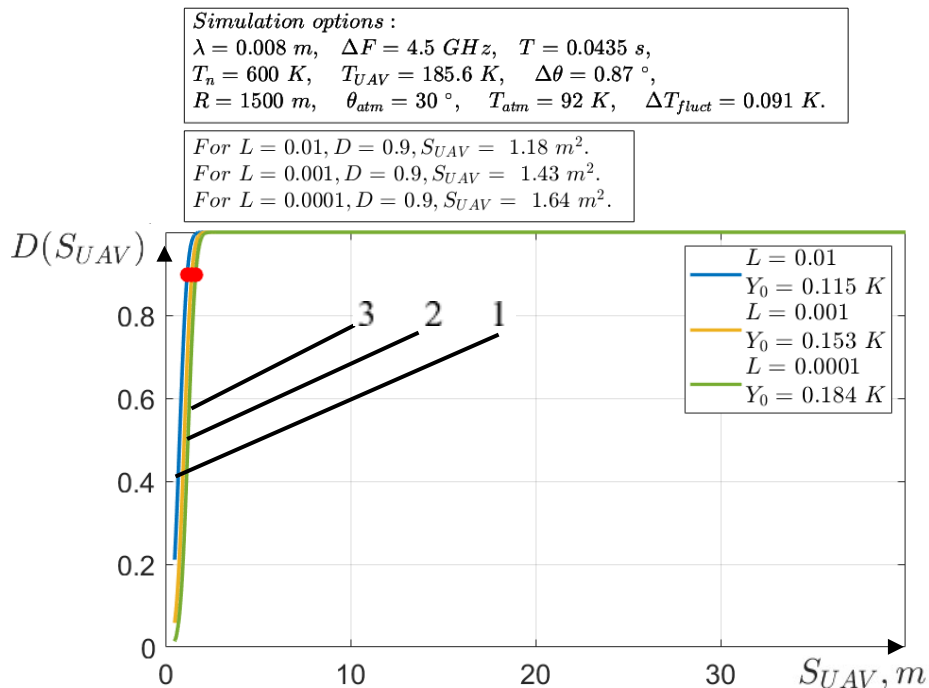


Рисунок 4.79 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі хмарної атмосфери для радіометру діапазону 35-36 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01, Y_0=0.115\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001, Y_0=0.153\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001, Y_0=0.184\text{K}$

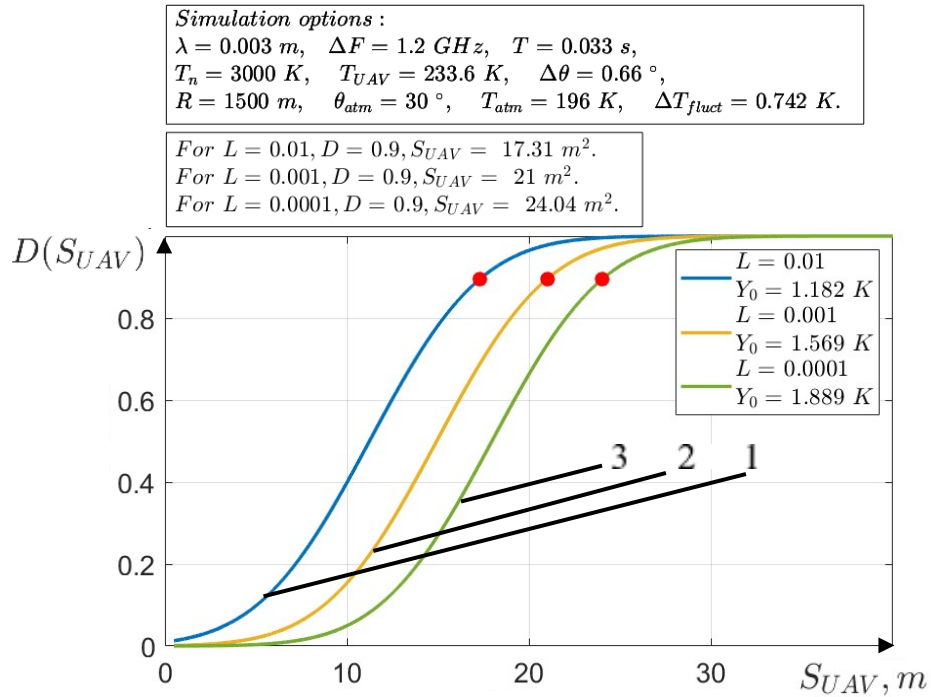


Рисунок 4.80 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м на тлі хмароні атмосфери для радіометру діапазону 94-96 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=1.182\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=1.569\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=1.889\text{K}$

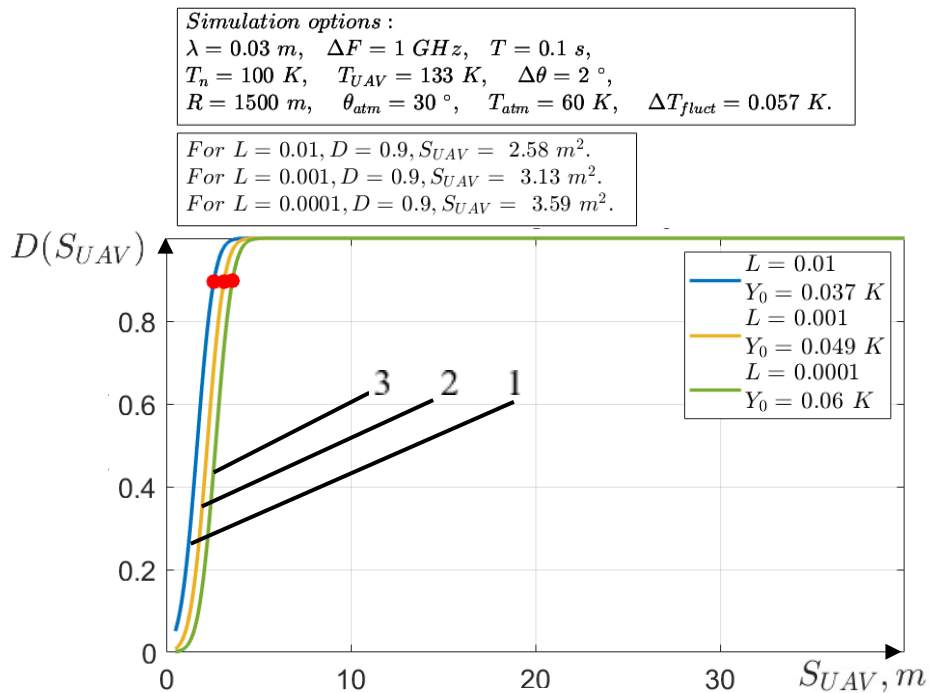


Рисунок 4.81 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м під час дощу для радіометру діапазону 10-12 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.037\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.049\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.06\text{K}$

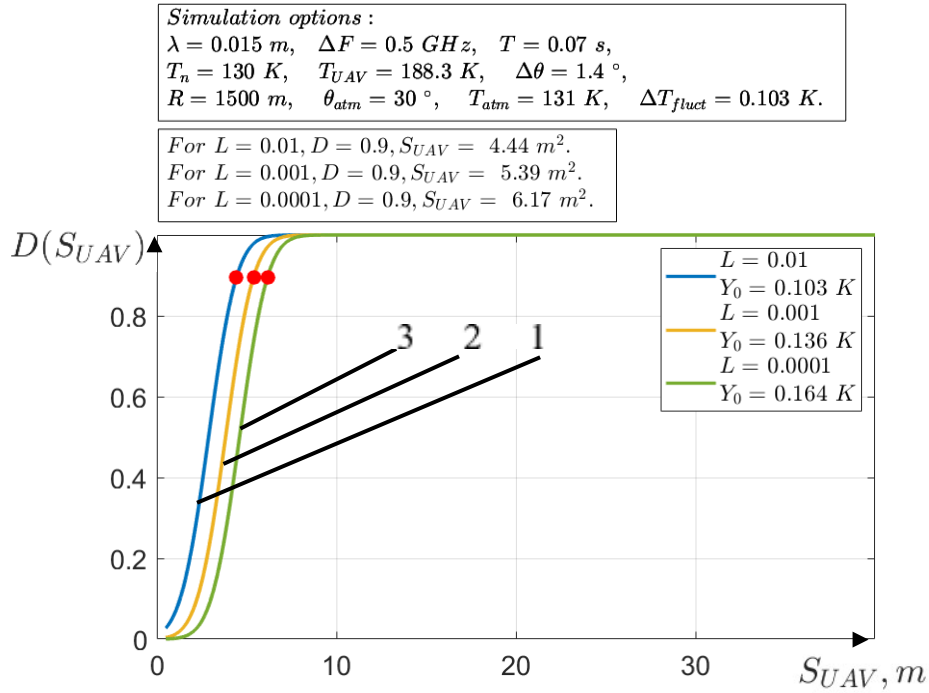


Рисунок 4.82 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м під час дощу для радіометру діапазону 20-22 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.103\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.136\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.164\text{K}$

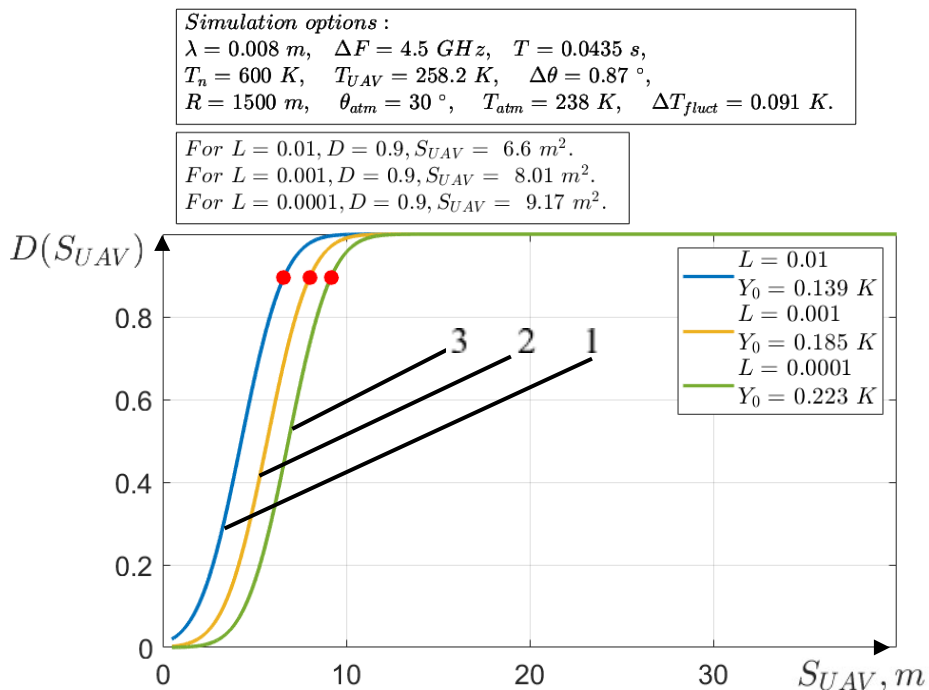


Рисунок 4.83 – Ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА на відстані 1500 м під час дощу для радіометру діапазону 35-36 ГГц:  
 1 – залежність для параметрів  $L=0.01$ ,  $Y_0=0.139\text{K}$ ; 2 - залежність для параметрів  $L=0.001$ ,  $Y_0=0.185\text{K}$ ; 3 - залежність для параметрів  $L=0.0001$ ,  $Y_0=0.223\text{K}$

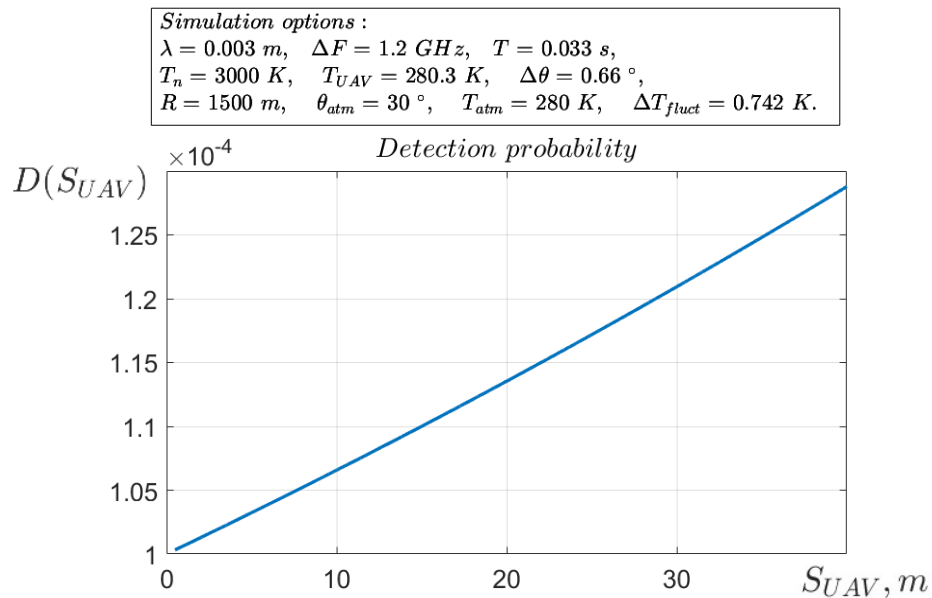


Рисунок 4.84 – Параметри моделювання та результати розрахунку залежності ймовірності правильного виявлення  $D$  БПЛА з склотекстоліту на відстані 1500 м на під час дощу в залежності від його розміру  $S_{БПЛА}$  для радіометру діапазону 94-96 ГГц

Результати розрахунку розміру БПЛА, при якому можливе виявлення з ймовірністю 0,9 для різних погодних умов, наведені в таблиці 4.14. Через низьке значення  $\Delta T_{БПЛА}^\circ$  під час дощу у діапазоні частот 94-96 ГГц виявити БПЛА

можливо лише на дуже близьких відстанях, коли площа БПЛА повністю перекриває діаграму спрямованості. Тому в таблиці для таких умов відсутні данні.

Таблиця 4.13 - Мінімальні значення розміру БПЛА, при якому ймовірність виявлення дорівнює 0,9

Стан атмосфери	Діапазони частот радіометрів			
	10-12 ГГц	20-22 ГГц	35-36 ГГц	94-96 ГГц
Ясна атмосфера	1,87 м <sup>2</sup>	2,98 м <sup>2</sup>	1,09 м <sup>2</sup>	4,28 м <sup>2</sup>
Хмарна атмосфера	1,97 м <sup>2</sup>	3,17 м <sup>2</sup>	1,18 м <sup>2</sup>	17,31 м <sup>2</sup>
Дощ	2,58 м <sup>2</sup>	4,44 м <sup>2</sup>	6,6 м <sup>2</sup>	-

З аналізу усіх отриманих результатів слідує, що для ясної атмосфери найкращі показники ймовірності виявлення має радіометричний приймач у діапазоні частот 35-36 ГГц. Зміна погодних умов майже не впливає на показники виявлення у діапазонах 10-12 ГГц та 20-22 ГГц. Найгірші результати можна

спостерігати для діапазону частот 94-96 ГГц, проте це в більшій мірі пов'язано в вузькою діаграмою спрямованості для даного приймача. 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 покращить якісні показники функціонування всього радіометричного комплексу на наступному етапі при формуванні зображень області спостереження.

## 5 РОЗРАХУНОК ЦІНИ ТА СОБІВАРТОСТІ ПРОГРАММИ

### 5.1 Мета економічної частини

Метою даного розділу в дипломному проекті магістра є економічне обґрунтування розробки радіометричного комплексу виявлення БПЛА у X, K, Ka і W діапазонах. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розрахунок трудомісткості робіт;
- скласти кошторису витрат на розробку комплексу;
- розрахунок собівартості і ціни комплексу.

### 5.2 Опис виробу

У дипломній роботі було розроблено радіометричний комплекс виявлення БПЛА у X, K, Ka і W діапазонах. Комплекс створений в середовищі розробки Matlab.

### 5.3 Розрахунок собівартості та ціни продукту

Собівартість продукції складається з ряду найменувань витрат. Сюди входять: витрати на основні матеріали, на великі комплектуючі вироби, пряма і додаткова заробітна плата, а також цілий ряд загальнодержавних податків і відрахувань.

Для проектування плати необхідна участь наступних робочих: керівника, тестувальника, програміста. Тривалість робочого місяця в середньому вважається 22 дні. Склад виконавців наведено в таблиці 5.1. Розрахуємо тривалість розробки за видами робіт. Результати розрахунків містяться в таблиці 5.2.

Таблиця 5.1 – Склад виконавців роботи

Посади	Посадові оклади, грн	
	Місячні	Денні
Керівник	17 000	773
Програміст	13 000	591
Тестувальник	10 000	455

Таблиця 5.2 – Розрахунок трудомісткості роботи

Вид робіт	Тривалість, дні	Трудомісткість, люд/дні	Виконавець		
			Керівник	Програміст	Тестувальник
Постановка завдання	1	1	+	-	-
Разробка графіка ходу роботи	1	1	+	-	-
Визначення вимог до розробки програми	2	6	+	+	+
Розробка ТЗ	2	6	+	+	+
Узгодження та затвердження ТЗ	1	3	+	+	+
Створення програмного забезпечення	3	6	+	+	-
Адаптивні роботи	1	1	-	-	+
Налаштування	1	1	-	-	+
Тестування програми	1	3	+	+	+
Повірка звітів програми	1	1	+	-	-
Оформлення звіту про виконану роботу	1	3	+	+	+
Здача програми в експлуатацію	1	1	+	-	-
Разом	16	33	14	10	9

Розрахунок собівартості потрібно розпочати з розрахунку фонду основної заробітної плати (ЗП). Необхідно вирахувати заробітну плату розробників комплексу, з урахуванням трудовитрат, кількості виконавців а також середьоднівної ЗП. Необхідно кількість днів, оброблених певними виконавцями по стадіям, та перемножит на їх оклади:



$$ОЗП = \sum N_i * ЗП_{cp}, \quad (5.1)$$

где  $N_i$  - кількість днів, відпрацьовані  $i$ -ми виконавцями за стадіями;

$ЗП_{cp}$  - денні оклади виконавців, грн.

Отже:

$$\begin{aligned} ОЗП &= 14*773 + 10*591 + 9*455 = \\ &= 10822 + 5910 + 4095 = 20827 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Зробимо розрахунок додаткової заробітної плати (ДЗП), яка дорівнює 20% від ОЗП.

$$ДЗП = 20\% ОЗП \quad (5.2)$$

Отже:

$$ДЗП = 0.2 * 20827 = 4165 \text{ грн}$$

Загальний фонд заробітної плати складає

$$\Phi ЗП = ОЗП + ДЗП = 20827 + 4165 = 24992 \text{ грн} \quad (5.3)$$

Нарахування на заробітну плату у відсотках від основної і додаткової заробітної плат (єдиний соціальний внесок) складає 22%.

$$ЄСВ = \Phi ЗП * \frac{H_{соц}}{100} = 24992 * \frac{22}{100} = 5498 \text{ грн} \quad (5.4)$$

## 5.4 Розрахунок вартості матеріалів та виробів для виготовлення пристрою

Таблиця 5.3 – Перелік основних матеріалів

№ п/п	Елемент	Кількість	Ціна за одиницю товару, грн	Сума, грн
1	Робоче місце керівника «Діалог 4 МК»	1	7200	7200
2	Ноутбук	2	15000	30000
	Робоче місце програміста «Діалог 7 МК»	1	6800	6800
3	Робоче місце тестувальника	1	7000	7000
4	Принтер «Canon MP250»	1	6100	6100
5	Система освітлення та система безперервного живлення	3	8000	8000
6	Система очистки повітря	1	6400	6400
Разом				71500

Таблиця 5.4 – Витратні матеріали

№ п/п	Матеріал	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
1	Ліцензія програми «Matlab» + пакет внутрішніх налаштувань	1	1000	1000
2	Степлер	1	20	20
3	Текстильні кріплення універсальні	3	10	30
4	Корпус пластиковий герметичний	1	60	60
5	Гумовий зажим	1	50	50
6	Скріпки	1	10	10

## Продовження таблиці 5.4

№ п/п	Матеріал	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
7	Білий папір «ZOOM A4 500 арк.»	1	80	80
8	Канцелярський набір «ВМ6304-01»	3	125	375
9	Папка пластикова з мультифорою в наборі	10	20	200
10	Карта пам'яті CD з об'ємом 1Гб	1	80	80
Разом				1905

Для визначення собівартості необхідно ще врахувати амортизацію основних засобів:

$$A_{Oz} = \frac{Oz * H_{AM} * T_{\Pi}}{100 * T_{год}}, \quad (5.5)$$

год

де  $Oz$  - основні засоби, грн;

$H_{AM}$  - норма амортизації, грн;

$T_{\Pi}$  - кількість відпрацьованих днів;

$T_{год}$  - кількість робочих днів у році.

Отже:

$$A_{Oz} = \frac{71500 * 25 * 16}{100 * 250} = 1144 \text{ грн}$$

Таблиця 5.5 – Собівартість та ціна продукту

1	Стаття калькуляції	Витрати, грн	Примітки
2	Основна заробітна плата	20827	Формула (1)
3	Додаткова заробітна плата	4165	20% від ОЗП
4	Єдиний соціальний внесок	5498	22% від (ОЗП+ДЗП)
5	Амортизація	1144	Формула (5)
6	Розхідні матеріали	1905	Таблиця 5.4

## Продовження таблиці 5.5

	Стаття калькуляції	Витрати, грн	Примітки
7	Інші витрати	3125	15% від ОЗП
8	Собівартість	31389	П1+П2+П3+П4+П5+П6
9	Прибуток	7847	25% від Собівартості
10	Ціна без НДС	39236	Прибуток+Собівартість
11	НДС	7847	20% від ціни без НДС
12	Ціна с НДС	47083	П10+П11

## 5.5 Розрахунок точки беззбитковості

Перед тим, як знайти точку беззбитковості, необхідно спочатку зрозуміти, які з витрат належать до постійних, а які – до змінних, оскільки вони є обов'язковими компонентами для розрахунку, причому важливо правильно їх розподілити. До постійних належать: амортизаційні відрахування, основна і додаткова заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу (з відрахуваннями), орендна плата та ін. До змінних основні та додаткові матеріали, комплектуючі, напівфабрикати, паливо і енергія на технологічні потреби, основна і додаткова заробітна плата основних робітників (з відрахуваннями) та ін. Постійні витрати не залежать від обсягу виробництва та продажу і майже не змінюються з часом.

Якщо збільшення кількості продукції, що продається, не приведе до зміни її ціни і поточні витрати на одиницю продукції будуть постійними, беззбитковий обсяг випуску слід визначати за формулою

$$V_6 = \frac{V_{\text{п}}}{C_{\text{п}} - V_{\text{зм}}} \quad (5.6)$$

де  $V_6$  - обсяг беззбиткового випуску одиниці продукції, шт;  
 $V_{\text{п}}$  - сукупні постійні витрати, грн;  
 $V_{\text{зм}}$  - змінні витрати на виготовлення одиниці продукції, грн;  
 $C_{\text{п}}$  - ціна одиниці продукції, грн.

Виходячи із загальних розрахунків сукупні постійні витрати складають 18610 грн. на одиницю продукту, змінні витрати 15412 грн. а ціна за одиницю продукції склала 47083 грн. Таким чином ми отримуємо значення обсягу беззбиткового випуску одиниці продукції.

$$0.59 = \frac{18610}{47083 - 15412}$$

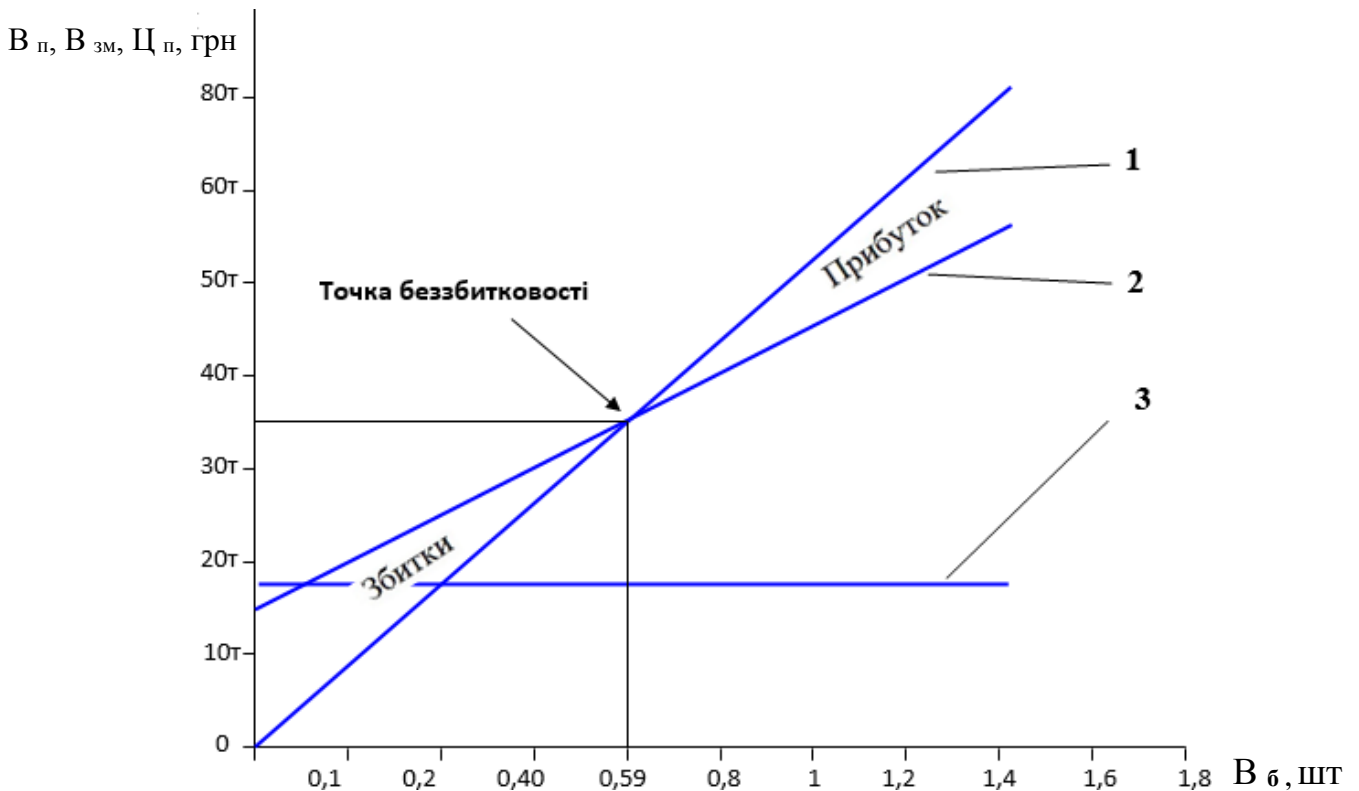


Рисунок 5.1 – Розрахунок точки беззбитковості продукції:  
1 – сумарні витрати; 2 – змінні витрати; 3 – постійні витрати

Висновок: в даному розділі були проведені розрахунки відносно знаходження економічних показників при розробці та створенні радіометричного комплексу виявлення БПЛА у X, K, Ka і W діапазонах.

Для розрахунку даних показників були враховані всі необхідні статті калькуляції, застосовні до даного пристрою, були враховані витрати на матеріали, основні та додаткові заробітні плати, нарахування на заробітну плату за рахунок єдиного соціального внеску.

За допомогою таких розрахунків можна визначити ціну комплексу та в подальшому ураховувати це при міркуваннях про доступність та актуальність того чи іншого продукту.

## ВИСНОВКИ

У даній роботі був розглянутий синтез оптимального алгоритму виявлення приростів радіотеплового сигналу БПЛА на тлі внутрішніх шумів приймача і фонового випромінювання атмосфери розраховані та проаналізовані якісні показники виявляча контрастів в різних тактичних умовах і метеоумовах. Також було промодельовано градації станів атмосфери розрахунків ймовірностей правильного виявлення в залежності від дальності, кутів візування та розмірів БПЛА, отриманні данні були відображені у таблицях та продубльовані у вигляді графіків які відображають ці данні.

Проаналізовано основи теорії випромінювання радіотеплових полів і їх статистичний опис в антенних пристроях. Це дозволило визначити параметри, що підлягають оцінюванню в СВЧ радіометрах, з урахуванням спрямованих характеристик антенних систем, електродинамічних характеристик досліджуваних середовищ і статистичних характеристик поверхонь.

Визначено основні відбивні і випромінювальних характеристики природних середовищ з різними електрофізичними параметрами і статистичними характеристиками поверхонь і атмосфери. Використання наведених електродинамічних моделей дозволить розрахувати оптимальні кути зондування, при яких досягаються мінімальні похибки оцінювання досліджуваних параметрів.

Досліджено основні методи і засоби обробки сигналів в СВЧ радіометрах.

Проаналізовано методологія статистичного синтезу одноканальних радіометричних виявлячів.

Розглянуто всі можливі на даний момент способи і засоби виявлення БПЛА, що дозволило вибрати оптимальний. Результатом роботи стала також програма розрахунку ймовірності правильного виявлення для різних тактичних та погодних умов проведення досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Voxukraine [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://voxukraine.org/ru/ukrainskie-drony-v-nebesah-problemy-ispolzovaniya-bezpilotnikov-v-ukraine/>
2. Robotrends [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <http://robotrends.ru/robopedia/problemy-i-opasnosti-svyazannye-s-bespilotnikami.-incidenty>
3. Авіапорт [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://www.aviaport.ru/news/2019/07/17/596553.html>
4. Dronarium [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://www.dronarium.com.ua/obuchenie/>
5. Nagnews [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://nag.ru/articles/article/100796/pervuyu-v-mire-sistemu-kontrolya-pol-tov-bespilotnikov-protestiruet-vodafone.html>
6. Волосюк В. К., Кьонг В. Т., Тимошук Е. Н., Жила С. С. Синтез оптимального обнаружителя в многоантенной радиометрической системе // Радиотехника. - 2015. - № 182. - С. 5-12.
7. Державні санітарні правила і норми влаштування, утримання загальноосвітніх навчальних закладів та організації навчально-виховного процесу: ДСанПіН 5.5.2.008-01.- Чинний від 14.08.2001.- К.: Держстандарт України, 2001.- 20 с.
8. Радиотехнічні системи: Уч. посіб. / Московський електротехнічний інститут зв'язку; Укл. : Ю. П. Гришин, В. П. Іпатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенський, Ю. Д. Ульяїцкій. - М., 1990. - 486 с.
9. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы: Уч. пособ.- Москва: Высшая школа, 1990. - 488 с.
10. Руженцев Н.В. Вертикальное атмосферное ослабление радиоволн миллиметрового диапазона: Науч. моногр. - Саарбрюккене : LAMBERT Academic Publishing, 2015.- 128 с.
11. Волосюк В.К., Жила С.С., Собколов А.Д., Павликов В.В., Руженцев Н.В., Сальников Д.С., Мерзликин А.А., Цопа А.И. Аппаратурно-методическое обеспечение научно-прикладной радиометрии атмосферы // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2019. – № 196. – С. 5 – 21

## ДОДАТОК А

Лістинг програми розрахунку ймовірності правильного виявлення для різних тактичних та погодних умов проведення досліджень

```

clc
close all
clear all

disp(' *          Програма розрахунку ймовірностей правильного виявлення
*');
disp(' *          БПЛА на тлі атмосферного випромінювання та внутрішніх шумів
приймача *');
disp(' *          *');
disp(' *****');
disp(' ');
disp('---> Оберіть радіометричний приймач, що реалізує алгоритм');
disp('---> виявлення БПЛА з наведених у таблиці:');
disp(' ');
disp(' _____');
disp(' |   Діапазон частот   | 10-12 ГГц | 20-22 ГГц | 35-36 ГГц | 94-96 ГГц |')
disp(' | налаштування приймача |          |          |          |          |')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|');

disp(' |   Ширина смуги   | 1 ГГц | 0,5 ГГц | 4,5 ГГц | 1,2 ГГц |')
disp(' | робочих частот   |          |          |          |          |')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|');

disp(' | Яскравісна температура | 100 К | 130 К | 600 К | 3000 К |')
disp(' | внутрішнього шуму Tn |          |          |          |          |')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|');

disp(' |   Ширина діаграми   | 2 град | 1,4 град | 0,87 град | 0,66 град |')
disp(' | спрямованості антени |          |          |          |          |')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|');

disp(' | Швидкість сканування |          | 20 град за 1 секунду |          |')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|');
disp(' |   Постійна часу   | 0,1 с | 70 мс | 43,5 мс | 33 мс |')
disp(' | спостереження     |          |          |          |          |')
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|');

disp(' |   radiometer_id   | 1 | 2 | 3 | 4 |');
disp(' |-----|');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 4:');
radiometer_id=input('   radiometer_id = ');

Lamda_all = [0.03, 0.015, 0.008, 0.003]; % довжина хвилі налаштування всіх
радіометрів
Lamda = Lamda_all(radiometer_id); % довжина хвилі налаштування
радіометра відповідно radiometer_id

DF_all = [1e9 0.5e9 4.5e9 1.2e9]; % ширина смуги частот кожного радіометра

```



```

T_all = [0.1 0.07 0.0435 0.033];           % постійні часу спостереження кожного
радіометра

DF = DF_all(radiometer_id);               % обираємо ширину смуги частот відповідно
radiometer_id
T = T_all(radiometer_id);                 % постійно часу спостереження відповідно
radiometer_id
M = 2*T*DF;                               % кількість некорельованих відліків

Tn_all = [100 130 600 3000];              % шумова температура приймачів всіх
радіометрів
Tn = Tn_all(radiometer_id);               % шумова температура приймачів відповідно
radiometer_id

D_Teta_all = [2 1.4 0.87 0.66];           %ширина діаграми спрямованості
антени для всіх типів радіометрів
D_Teta = deg2rad(D_Teta_all(radiometer_id)); %ширина діаграми спрямованості
антени відповідно radiometer_id

disp(' ');
disp('---> Оберіть параметр, для якого будуть побудовані залежності');
disp(' ймовірностей правильного виявлення БПЛА, з наведених у таблиці:');
disp(' ');
disp(' | Назва параметру | Дальність | Кут візування | Яскравісна температура |
Розмір БПЛА |');
disp(' | _____ | _____ | _____ | _____ |');
disp(' | parameter_id | 1 | 2 | 3 | 4 |');
disp(' |_____');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 4:');
parameter_id=input(' parameter_id = ');

if parameter_id == 1 %%%%%%%%%%% 1-й параметр - Дальність
%%%%%%%%%%
disp('---> Введіть наступні параметри:');

disp('---> Мінімальне значення дальності в метрах');
min_R=input(' min_R = ');

disp('---> Максимальне значення дальності в метрах');
max_R=input(' max_R = ');

disp('---> Крок дискретизації дальності в метрах');
dR=input(' dR = ');

R = min_R:dR:max_R; % вектор дальності

disp('---> Розмір БПЛА в метрах квадратних (для прикладу 0.5, 1, 5, 10, 20 або
40)');
S_BpLA_0=input(' S_BpLA = '); % найбільша площа БПЛА

disp('---> Оберіть кут спостереження (від горизонту) в градусах з наведених у
таблиці:');

```

```

disp('
-----');
disp(' | Кут спостереження | 5 град | 10 град | 20 град | 30 град | 40 град | 50
град | 60 град | 70 град | 80 град | 90 град |');
disp(' |-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|');
disp(' | angle_id | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
10 |');
disp('-----');
disp('----> Введіть ціле число від 1 до 10:');
angle_id=input(' angle_id = ');

Teta_all = [5 10 20 30 40 50 60 70 80 90]; % усі можливі кути спостереження
Teta = deg2rad(Teta_all(angle_id)); % кут спостереження відповідно angle_id у
радіанах

Teta_alpha = 5; % кут атаки у градусах
Teta_alpha = deg2rad(Teta_alpha); % кут атаки в радіанах
S_BpLA = S_BpLA_0*sin(Teta+Teta_alpha)+0.1*S_BpLA_0*cos(Teta+Teta_alpha);
% розмір видимої частини БпЛА

% з урахуванням кута спостереження

% коефіцієнт 0.1 підбирається в залежності

% від поперечного розміру БпЛА та його

% орієнтації

S_DN = pi*(D_Teta*R/2).^2; % площа зрізу діаграми спрямованості на
кожній дальності

disp(' ');
disp('----> Оберіть стан атмосфери з наведених у таблиці:');
disp('-----');
disp(' | Стан атмосфери | Ясна | Хмарна | Дощ |');
disp(' |-----|-----|-----|');
disp(' | атмосфера | атмосфера | ');
disp(' |-----|');
disp(' | atmosfera_id | 1 | 2 | 3 |');
disp('-----');
disp(' ');
disp('----> Введіть ціле число від 1 до 3:');
atmosfera_id=input(' atmosfera_id = ');

T_atmosfera_all = zeros(3,10,4);
T_atmosfera_all(:, :, 1) = [80 43 23 16 14.7 13.3 12 10.7 9.3 8;...
103 58 32 22 20 18 16.5 14.7 12.8 11;...
209 125 73 60 55 49 43.5 38 32.5 27]; % яскравісні
температури
під різними кутами % атмосфери

```

```

% та для
різних погодних умов для
% довжини
хвилі 3 см
T_atmosfera_all(:,2) = [176 110 62 45 41.3 37.7 34 30.3 26.7 23;...
204 134 79 56 52 47 43 38.7 34.3 30;...
273 237 170 131 122 113 104 95 86 77]; % яскравісні
температури
%
атмосфери під різними кутами
% та для
різних погодних умов для
%
довжини хвилі 1,5 см
T_atmosfera_all(:,3) = [179 112 64 46 42.5 39 35.5 32 28.5 25;...
252 187 123 92 85 77 70 62.7 55.3 48;...
280 278 268 238 226 214 202 190 178 166]; %
яскравісні температури
%
атмосфери під різними кутами
% та
для різних погодних умов для
%
довжини хвилі 8 мм
T_atmosfera_all(:,4) = [258 199 130 99 91.7 84.3 77 69.7 62.3 55;...
280 271 230 196 184 172 160.5 148.7 136.8 125;...
280 280 280 280 278.5 277 275.5 274 272.5 271]; %
яскравісні температури
% атмосфери під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 3 мм
T_atmosfera = T_atmosfera_all(atmosfera_id, angle_id, radiometer_id); % значення
яскравісної температури
%
атмосфери для обраних параметрів

T_BpLA_all = zeros(3,10,4);
T_BpLA_all(:,1) = [103.5 99.6 93.5 89.1 86 83.8 82.2 81 80.2 79.6;...
126.5 114.6 102.5 95.1 91.5 88.8 86.7 85 83.7 82.6;...
232.5 181.6 143.5 133 126 119 114 108 103 98.6];
% яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 3 см

```

```

T_VpLA_all(:,2) = [213.6 165.9 119.4 102.3 96 93.7 92.8 92.5 92.4 92.4;...
                  241.6 189.9 136.4 113.3 106.3 103.4 101.8 100.9 100.1
99.36;...
                  310.6 292.9 227.4 188.3 176.7 169 162.8 157.2 151.7 146.4];
% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 1,5 см
T_VpLA_all(:,3) = [211.9 194.7 165 140.7 120.8 104.5 91.2 80.3 71.3 64;...
                  256.8 239.5 209.9 185.6 165.7 149.4 136 125.1 116.2 108.8;...
                  280.5 279 270 258.2 243.2 229.7 217.6 206.8 197.2 188.5];
% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 8 мм
T_VpLA_all(:,4) = [267.9 263.1 254.4 246.7 240 234.2 229 224.6 220.6 217.2;...
                  284.1 272.9 252.2 233.6 217.1 202.2 189 177.1 166.4 156.9;...
                  280.3 280.3 280.3 280.3 278.7 277.5 276.3 275.2 274.2 273.4];
% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 3 мм

T_VpLA = T_VpLA_all(atmosfera_id, angle_id, radiometer_id); % значення
яскравісної температури % БпЛА

для обраних параметрів

Sigma_0 = (T_atmosfera+Tn)/sqrt(0.5*M); % дисперсія вихідного процесу
% при відсутності БпЛА

disp('---> Оберіть критерій вибору порогу виявлення, з наведених у таблиці: ');
disp(' _____');
disp(' | Назва критерію | критерій Неймана-Пірсона | критерій логічного вибору |');
disp(' порогу |')
disp(' | _____ | з аналізу чутливості приймачів |');
disp(' | _____ |');
disp(' | criterion_id | 1 | 2 |');
disp(' _____');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 2:');

```

```

criterion_id=input(' criterion_id = ');

if criterion_id == 1
    disp('---> Введіть ймовірність хибної тривоги від 0 до 1 (типів значення 10^-2,
10^-3 ...');
    disp(' Для декількох параметрів введіть данні у форматі вектора-строки "
[10^-2, 10^-3, 10^-4] " ');
    L=input(' L = ');

    for i = 1:length(L)
        Y0(i) = (sqrt(2))*erfcinv(2*L(i))*Sigma_0; % значення порогу виявлення за
данними % Ймовірності хибної тривоги
    end

else
    DT = sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF);
    disp('---> Введіть порог виявлення (один або декілька у форматі вектора-
строки " [0.1, 0.01, 0.005] " ');
    disp(' у одиницях яскравісної температури (K)');
    disp([' з теоретичного аналізу чутливості обраного приймача, що
розрахована для експериментального']);
    disp([' значення постійної часу спостереження та дорівнює '
num2str(round(DT,3)) ' K:']);
    Y0=input(' Y0 = ');
    end

    K = S_BpLA./S_DN; % коефіцієнт заповнення діаграми
спрямованості

% розрахунок співвідношення сигнал/завада та дисперсії вихідного
% процесу при наявності БпЛА
for i = 1:length(K)
    if K(i)<=1
        mu(i) = sqrt(0.5*M)*(T_atmosfera*(1-K(i))+T_BpLA*K(i)-
T_atmosfera)/(T_atmosfera*(1-K(i))+T_BpLA*K(i)+Tn);
        Sigma_1(i) = (T_atmosfera*(1-K(i))+T_BpLA*K(i)+Tn)/sqrt(0.5*M);
    else
        mu(i) = sqrt(0.5*M)*(T_BpLA)/(T_BpLA+Tn);
        Sigma_1(i) = (T_BpLA+Tn)/sqrt(0.5*M);
    end
end

for i = 1:length(Y0)
    for j = 1:length(mu)
        x0(i,j) = Y0(i)/Sigma_1(j)-mu(j);
    end
end

D = (1/2)*erfc(x0/sqrt(2)); % розрахунок Ймовірності правильного виявлення

figure('Units', 'normalized', 'Position', [0.25 0.1 0.5 0.75])
axes('Position', [0.15 0.15 0.75 0.5]);

```

```

for i = 1:size(D,1)
p(i) = plot(R,D(i,:), 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('$R, m$', 'Interpreter', 'latex');
ylabel('$D(R)$', 'Interpreter', 'latex');
set(gcf, 'color', 'w');
ax = gca;
ax.FontSize = 16;
yy = get(p(i), 'YData');
[xx,ii]=find(round(yy,2) == 0.9 );
hold on
plot(R(ii(1)),D(i,ii(1)), 'r.', 'MarkerSize', 30)
a = annotation('textbox', [0.14 0.78 .5 .2], ...
    'interpreter', 'latex', 'String', ['$ Simulation\ options:$' newline...
        '$\lambda = \ $' num2str(Lamda) '$\ m, $'...
        '\\ \ '...
        '$\Delta F = \ $' num2str(DF/1e9) '$\ GHz, $'...
        '\\ \ '...
        '$T= \ $' num2str(T) '$\ s, $' newline...
        '$T_{n} = \ $' num2str(Tn) '$\ K, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$T_{UAV} = \ $' num2str(T_BpLA) '$\ K, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$\Delta \theta = \ $' num2str(rad2deg(D_Teta)) '$\
^{\circ}, $' newline...
        '$S_{UAV} = \ $' num2str(S_BpLA_0) '$\ m^2, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$\theta_{atm} = \ $' num2str(rad2deg(Teta)) '$\
^{\circ},
$'...
        '\\ \ \ \ '...
        '$T_{atm} = \ $' num2str(T_atmosfera) '$\ K, $' ...
        '\\ \ \ \ '...
        '$\Delta T_{fluct} = \ $' num2str(
round(sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF), 3) ) '$\ K. $', 'FitBoxToText', 'on');
a.FontSize = 14;

if criterion_id == 1
    str_Ind(i) = {'$L= \ $' num2str(L(i)) newline...
        '$Y_{0}= \ $' num2str( round(Y0(i),3) ) '$\ K $'};
    str_R(i) = {'$For\ L= \ $' num2str(L(i)) '$, D = \ $' num2str(round(D(i,ii(1)),2))
'$, R = \ $' num2str( R(ii(1)) ) '$\ m. $'};
else
    str_Ind(i) = {'$Y_{0}= \ $' num2str(Y0(i)) '$\ K $'};
    str_R(i) = {'$For\ Y_{0}= \ $' num2str(Y0(i)) '$K, \ D = \ $'
num2str(round(D(i,ii(1)),2)) '$, R = \ $' num2str( R(ii(1)) ) '$\ m. $'};
end
end

Ind = legend(p,str_Ind,...
'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');

```

```

b = annotation('textbox',[0.14 0.62 .5 .2],...
    'interpreter','latex','String',str_R,'FitBoxToText','on');
b.FontSize = 14;
title('$Detection \ probability$', 'Interpreter','latex')

elseif parameter_id == 2 %%%%%%%%%%% 2-й параметр - Кут
спостереження %%%%%%%%%%%

disp('---> Введіть наступні параметри:');

disp('---> Дальність в метрах');
R=input('    R = ');

disp('---> Розмір БпЛА в метрах квадратних');
S_BpLA_0=input('    S_BpLA = '); % найбільша площа БпЛА

Teta_all = [5 10 20 30 40 50 60 70 80 90]; % усі можливі кути
спостереження

Teta_alpha = 5; % кут атаки у градусах
Teta_alpha = deg2rad(Teta_alpha); % кут атаки в радіанах
S_BpLA =
S_BpLA_0*sin(deg2rad(Teta_all)+Teta_alpha)+0.1*S_BpLA_0*cos(deg2rad(Teta_all)+Teta
a_alpha); % розмір видимої частини БпЛА

% з урахуванням кута спостереження

% коефіцієнт 0.1 підбирається в залежності

% від поперечного розміру БпЛА та його

% орієнтації

S_DN = pi*(D_Teta*R/2).^2; % площа зрізу діаграми спрямованості на
кожній дальності

disp(' ');
disp('---> Оберіть стан атмосфери з наведених у таблиці:');
disp(' _____');
disp(' | Стан атмосфери | Ясна | Хмарна | Дощ |');
disp(' | _____ | атмосфера | атмосфера | _____ |');
disp(' | _____|_____|_____|_____|');
disp(' | atmosfera_id | 1 | 2 | 3 |');
disp(' _____');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 3:');
atmosfera_id=input('    atmosfera_id = ');

T_atmosfera_all = zeros(3,10,4);
T_atmosfera_all(:,:,1) = [80 43 23 16 14.7 13.3 12 10.7 9.3 8;...
    103 58 32 22 20 18 16.5 14.7 12.8 11;...
    209 125 73 60 55 49 43.5 38 32.5 27]; % яскравісні
температури

```

```

%
атмосфери під різними кутами
% та для
різних погодних умов для
% довжини
хвилі 3 см
T_atmosfera_all(:, :, 2) = [176 110 62 45 41.3 37.7 34 30.3 26.7 23;...
204 134 79 56 52 47 43 38.7 34.3 30;...
273 237 170 131 122 113 104 95 86 77]; %
яскравісні температури
%
атмосфери під різними кутами
% та
для різних погодних умов для
%
довжини хвилі 1,5 см
T_atmosfera_all(:, :, 3) = [179 112 64 46 42.5 39 35.5 32 28.5 25;...
252 187 123 92 85 77 70 62.7 55.3 48;...
280 278 268 238 226 214 202 190 178 166]; %
яскравісні температури
%
атмосфери під різними кутами
% та
для різних погодних умов для
%
довжини хвилі 8 мм
T_atmosfera_all(:, :, 4) = [258 199 130 99 91.7 84.3 77 69.7 62.3 55;...
280 271 230 196 184 172 160.5 148.7 136.8 125;...
280 280 280 280 278.5 277 275.5 274 272.5 271]; %
яскравісні температури
% атмосфери під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 3 мм
T_atmosfera = T_atmosfera_all(atmosfera_id, :, radiometer_id); % значення
яскравісної температури
%
атмосфери для обраних параметрів

T_VpLA_all = zeros(3,10,4);
T_VpLA_all(:, :, 1) = [103.5 99.6 93.5 89.1 86 83.8 82.2 81 80.2 79.6;...
126.5 114.6 102.5 95.1 91.5 88.8 86.7 85 83.7 82.6;...
232.5 181.6 143.5 133 126 119 114 108 103 98.6];
% яскравісні температури
% БПЛА під різними кутами
% та для різних погодних умов для

```



```

% довжини хвилі 3 см
    T_VpLA_all(:, :, 2) = [213.6 165.9 119.4 102.3 96 93.7 92.8 92.5 92.4 92.4;...
                          241.6 189.9 136.4 113.3 106.3 103.4 101.8 100.9 100.1
99.36;...
                          310.6 292.9 227.4 188.3 176.7 169 162.8 157.2 151.7 146.4];
% яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 1,5 см
    T_VpLA_all(:, :, 3) = [211.9 194.7 165 140.7 120.8 104.5 91.2 80.3 71.3 64;...
                          256.8 239.5 209.9 185.6 165.7 149.4 136 125.1 116.2
108.8;...
                          280.5 279 270 258.2 243.2 229.7 217.6 206.8 197.2 188.5];
% яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 8 мм
    T_VpLA_all(:, :, 4) = [267.9 263.1 254.4 246.7 240 234.2 229 224.6 220.6 217.2;...
                          284.1 272.9 252.2 233.6 217.1 202.2 189 177.1 166.4
156.9;...
                          280.3 280.3 280.3 280.3 278.7 277.5 276.3 275.2 274.2
273.4]; % яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 3 мм
    T_VpLA = T_VpLA_all(atmosfera_id, :, radiometer_id); % значення
яскравісної температури % БпЛА для
обраних параметрів

    DT = sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF);

    disp('---> Введіть порог виявлення (один або декілька у форматі вектора-
строки " [0.1, 0.01, 0.005] ")');
    disp(' у одиницях яскравісної температури (K)');
    disp([' з теоретичного аналізу чутливості обраного приймача, що
розрахована для експериментального']);
    disp([' значення постійної часу спостереження та дорівнює '
num2str(round(DT,3)) ' K:']);
    Y0=input(' Y0 = ');

```

```

K = S_BpLA./S_DN; % коефіцієнт заповнення діаграми
спрямованості

% розрахунок співвідношення сигнал/завада та дисперсії вихідного
% процесу при наявності БпЛА

for i = 1:length(Teta_all)
    if K(i)<=1
        mu(i) = sqrt(0.5*M)*(T_atmosfera(i)*(1-K(i))+T_BpLA(i)*K(i)-
T_atmosfera(i))/(T_atmosfera(i)*(1-K(i))+T_BpLA(i)*K(i)+Tn);
        Sigma_1(i) = (T_atmosfera(i)*(1-K(i))+T_BpLA(i)*K(i)+Tn)/sqrt(0.5*M);
    else
        disp('Значення дальності треба збільшити! БпЛА повністю перекриває
діаграму');
        disp('спрямованості і результати розрахунку не залежать від атмосфери
чи кута спостереження! ');
        disp('Запустіть програму заново! ');
    end
end

for i = 1:length(Y0)
    for j = 1:length(mu)
        x0(i,j) = Y0(i)/Sigma_1(j)-mu(j);
    end
end

D = (1/2)*erfc(x0/sqrt(2)); % розрахунок ймовірності правильного виявлення

figure('Units', 'normalized', 'Position', [0.25 0.1 0.5 0.75])
axes('Position', [0.15 0.15 0.75 0.5]);
for i = 1:size(D,1)
%     pp = polyfit(T_atmosfera,D(i,:),5);
    x_pp = 0:0.1:90;
    D1(i,:) = interp1(Teta_all,D(i,:),x_pp,'linear');
    p(i) = plot(x_pp,D1(i,:), 'LineWidth', 2);
    grid on;
    xlabel('\theta_{atm} , degrees','Interpreter','latex');
    ylabel('$D(\theta_{atm})$', 'Interpreter','latex');
    set(gcf,'color','w');
    xlim([0 90.1])
    ax = gca;
    ax.FontSize = 16;

    if max(D1(i,:)) >= 0.89
        yy = get(p(i),'YData');
        [xx,ii]=find(round(yy,2) == 0.9 );
        hold on
        plot(x_pp(ii(1)),D1(i,ii(1)),'r','MarkerSize', 30)
        str_Teta(i) = [{'$For\ Y_{0} = \ $' num2str(Y0(i)) '$\ K, \ D = \ $'
num2str(round(D1(i,ii(1)),2)) '$, \ \theta_{atm} = \ $ ' num2str( x_pp(ii(1)) ) '$\ ^{\circ}. $'}];
    else
        str_Teta(i) = {'';
    end
end

```

```

a = annotation('textbox',[0.14 0.78 .5 .2],...
    'interpreter','latex','String', ['$ Simulation\ options:$' newline...
        '$\lambda = \ $' num2str(Lamda) '$\ m, $'...
        '\\\'...
        '$\Delta F = \ $' num2str(DF/1e9) '$\ GHz, $'...
        '\\\'...
        '$T= \ $' num2str(T) '$\ s, $' newline...
        '$T_{n} = \ $' num2str(Tn) '$\ K, $'...
        '\\\'...
        '$\Delta \theta = \ $' num2str(rad2deg(D_Teta)) '$\
^{\circ}, $' newline...
        '$S_{UAV} = \ $' num2str(S_BpLA_0) '$\ m^2, $'...
        '\\\'...
        '$R = \ $' num2str(R) '$\ m, $' ...
        '\\\'...
        '$\Delta T_{fluct} = \ $' num2str(
round(sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF), 3) ) '$\ K, $' newline...
        '$T_{atm} \ proportional \ to \ \theta_{atm}.'
$'], 'FitBoxToText', 'on');
    a.FontSize = 14;

    str_Ind(i) = {'$Y_{0} = \ $' num2str(Y0(i)) '$\ K $'};

end

Ind = legend(p, str_Ind, ...
    'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');

b = annotation('textbox',[0.14 0.68 .5 .1],...
    'interpreter','latex','String', str_Teta, 'FitBoxToText', 'on');
b.FontSize = 14;
title('$Detection \ probability$', 'Interpreter', 'latex')

elseif parameter_id == 3 %%%%%%%%%%% 3-й параметр -
Температура атмосфери %%%%%%%%%%%

disp('---> Введіть наступні параметри:');

disp('---> Дальність в метрах');
R=input('    R = ');

disp('---> Розмір БпЛА в метрах квадратних');
S_BpLA_0=input('    S_BpLA = '); % найбільша площа БпЛА

Teta_all = [5 10 20 30 40 50 60 70 80 90]; % усі можливі кути
спостереження

Teta_alpha = 5; % кут атаки у градусах
Teta_alpha = deg2rad(Teta_alpha); % кут атаки в радіанах
S_BpLA =
S_BpLA_0*sin(deg2rad(Teta_all)+Teta_alpha)+0.1*S_BpLA_0*cos(deg2rad(Teta_all)+Tet
a_alpha); % розмір видимої частини БпЛА

% з урахуванням кута спостереження

```

% коефіцієнт 0.1 підбирається в залежності

% від поперечного розміру БПЛА та його

% орієнтації

$S_{DN} = \pi \cdot (D_{Teta} \cdot R/2)^2;$  % площа зрізу діаграми спрямованості на кожній дальності

```
disp(' ');
disp('---> Оберіть стан атмосфери з наведених у таблиці:');
disp(' _____');
disp(' | Стан атмосфери | Ясна | Хмарна | Дощ |');
disp(' | _____ | атмосфера | атмосфера | _____ |');
disp(' | _____ | _____ | _____ | _____ |');
disp(' | атмосфера_id | 1 | 2 | 3 |');
disp(' _____');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 3:');
atmosfera_id=input(' атмосфера_id = ');
```

T\_atmosfera\_all = zeros(3,10,4);

T\_atmosfera\_all(:,:,1) = [80 43 23 16 14.7 13.3 12 10.7 9.3 8;...  
103 58 32 22 20 18 16.5 14.7 12.8 11;...  
209 125 73 60 55 49 43.5 38 32.5 27];

температури

% яскравісні

%

атмосфери під різними кутами

% та для

різних погодних умов для

% довжини

хвилі 3 см

T\_atmosfera\_all(:,:,2) = [176 110 62 45 41.3 37.7 34 30.3 26.7 23;...  
204 134 79 56 52 47 43 38.7 34.3 30;...  
273 237 170 131 122 113 104 95 86 77];

яскравісні температури

%

%

атмосфери під різними кутами

% та

для різних погодних умов для

%

довжини хвилі 1,5 см

T\_atmosfera\_all(:,:,3) = [179 112 64 46 42.5 39 35.5 32 28.5 25;...  
252 187 123 92 85 77 70 62.7 55.3 48;...  
280 278 268 238 226 214 202 190 178 166];

%

яскравісні температури

%

атмосфери під різними кутами

% та

для різних погодних умов для

довжини хвилі 8 мм

```
T_atmosfera_all(:, :, 4) = [258 199 130 99 91.7 84.3 77 69.7 62.3 55;...
    280 271 230 196 184 172 160.5 148.7 136.8 125;...
    280 280 280 280 278.5 277 275.5 274 272.5 271];
```

яскравісні температури

% атмосфери під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 3 мм

T\_atmosfera = T\_atmosfera\_all(atmosfera\_id, :, radiometer\_id); % значення  
яскравісної температури

атмосфери для обраних параметрів

```
T_VpLA_all = zeros(3,10,4);
T_VpLA_all(:, :, 1) = [103.5 99.6 93.5 89.1 86 83.8 82.2 81 80.2 79.6;...
    126.5 114.6 102.5 95.1 91.5 88.8 86.7 85 83.7 82.6;...
    232.5 181.6 143.5 133 126 119 114 108 103 98.6];
```

% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 3 см

```
T_VpLA_all(:, :, 2) = [213.6 165.9 119.4 102.3 96 93.7 92.8 92.5 92.4 92.4;...
    241.6 189.9 136.4 113.3 106.3 103.4 101.8 100.9 100.1
    99.36;...
    310.6 292.9 227.4 188.3 176.7 169 162.8 157.2 151.7 146.4];
```

% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 1,5 см

```
T_VpLA_all(:, :, 3) = [211.9 194.7 165 140.7 120.8 104.5 91.2 80.3 71.3 64;...
    256.8 239.5 209.9 185.6 165.7 149.4 136 125.1 116.2
    108.8;...
    280.5 279 270 258.2 243.2 229.7 217.6 206.8 197.2 188.5];
```

% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 8 мм

```

T_BpLA_all(:, :, 4) = [267.9 263.1 254.4 246.7 240 234.2 229 224.6 220.6 217.2;...
                    284.1 272.9 252.2 233.6 217.1 202.2 189 177.1 166.4
156.9;...
                    280.3 280.3 280.3 280.3 278.7 277.5 276.3 275.2 274.2
273.4]; % яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 3 мм

T_BpLA = T_BpLA_all(atmosfera_id, :, radiometer_id); % значення
яскравісної температури % БпЛА для
обраних параметрів

DT = sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF);
disp('---> Введіть порог виявлення (один або декілька у форматі вектора-
строки " [0.1, 0.01, 0.005] ")');
disp(' у одиницях яскравісної температури (K)');
disp([' з теоретичного аналізу чутливості обраного приймача, що
розрахована для експериментального']);
disp([' значення постійної часу спостереження та дорівнює '
num2str(round(DT,3)) ' K:']);
Y0=input(' Y0 = ');

K = S_BpLA./S_DN; % коефіцієнт заповнення діаграми
спрямованості

% розрахунок співвідношення сигнал/завада та дисперсії вихідного
% процесу при наявності БпЛА

for i = 1:length(Teta_all)
    if K(i)<=1
        mu(i) = sqrt(0.5*M)*(T_atmosfera(i)*(1-K(i))+T_BpLA(i)*K(i)-
T_atmosfera(i))/(T_atmosfera(i)*(1-K(i))+T_BpLA(i)*K(i)+Tn);
        Sigma_1(i) = (T_atmosfera(i)*(1-K(i))+T_BpLA(i)*K(i)+Tn)/sqrt(0.5*M);
    else
        disp('Значення дальності треба збільшити! БпЛА повністю перекриває
діаграму');
        disp('спрямованості і результати розрахунку не залежать від атмосфери
чи кута спостереження! ');
    end
end

for i = 1:length(Y0)
    for j = 1:length(mu)
        x0(i,j) = Y0(i)/Sigma_1(j)-mu(j);
    end
end

```

```

D = (1/2)*erfc(x0/sqrt(2)); % розрахунок Ймовірності правильного
Виявлення

figure('Units', 'normalized', 'Position', [0.25 0.1 0.5 0.75])
axes('Position', [0.15 0.15 0.75 0.5]);
for i = 1:size(D,1)
%   pp = polyfit(T_atmosfera,D(i,:),5);
   x_pp = 2.7:0.1:300;
   D1(i,:) = interp1(T_atmosfera,D(i,:),x_pp,'linear');
   p(i) = plot(x_pp,D1(i,:), 'LineWidth', 2);
   grid on;
   xlabel('$T_{atm}$ , K$', 'Interpreter', 'latex');
   ylabel('$D(T_{atm})$', 'Interpreter', 'latex');
   set(gcf, 'color', 'w');
   ax = gca;
   ax.FontSize = 16;

   if max(D1(i,:)) >= 0.89
       yy = get(p(i), 'YData');
       [xx,ii]=find(round(yy,2) == 0.9 );
       hold on
       plot(x_pp(ii(1)),D1(i,ii(1)),'r','MarkerSize', 30)
       str_Teta(i) = { ['$For Y_{0} = \ $ num2str(Y0(i)) '$ K, \ D = \ $'
num2str(round(D1(i,ii(1)),2)) '$, \ T_{atm} = \ $ ' num2str( x_pp(ii(1)) ) '$ K. $']};
   else str_Teta(i) = {};
   end

   a = annotation('textbox',[0.14 0.78 .5 .2],...
       'interpreter','latex','String', ['$ Simulation\ options:$' newline...
       '$\lambda = \ $' num2str(Lamda) '$\ m, $'...
       '\\ \ '...
       '$\Delta F = \ $' num2str(DF/1e9) '$\ GHz, $'...
       '\\ \ '...
       '$T= \ $' num2str(T) '$\ s, $' newline...
       '$T_{n} = \ $' num2str(Tn) '$\ K, $'...
       '\\ \ \ '...
       '$\Delta \theta = \ $' num2str(rad2deg(D_Teta)) '$\
^{\circ}, $' newline...
       '$S_{UAV} = \ $' num2str(S_BpLA_0) '$\ m^{2}, $'...
       '\\ \ \ '...
       '$R = \ $' num2str(R) '$\ m, $'...
       '\\ \ \ '...
       '$\Delta T_{fluct} = \ $' num2str(
round(sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF), 3) ) '$\ K, $' newline...
       '$\theta_{atm} \ proportional \ to \ T_{atm}.'
$'], 'FitBoxToText', 'on');
   a.FontSize = 14;

   str_Ind(i) = { ['$Y_{0} = \ $' num2str(Y0(i)) '$\ K $']};

```

```

end

Ind = legend(p,str_Ind,...
'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');

b = annotation('textbox',[0.14 0.68 .5 .1],...
'interpreter','latex','String',str_Teta,'FitBoxToText','on');
b.FontSize = 14;
title('$Detection \ probability$', 'Interpreter', 'latex')

elseif parameter_id == 4 %%%%%%%%%%% 4-й параметр -
Розмір БпЛА %%%%%%%%%%%
disp('---> Введіть наступні параметри:');

disp('---> Мінімальне значення розміру БпЛА в метрах квадратних');
min_S_BpLA_0=input(' min_S_BpLA = ');

disp('---> Максимальне значення розміру БпЛА в метрах квадратних');
max_S_BpLA_0=input(' max_S_BpLA = ');

disp('---> Крок дискретизації розміру БпЛА в метрах квадратних');
dS_BpLA_0=input(' dR_S_BpLA = ');

S_BpLA_0 = min_S_BpLA_0:dS_BpLA_0:max_S_BpLA_0; % вектор дальності

disp('---> Дальність в метрах');
R=input(' R = ');

disp('---> Оберіть кут спостереження (від горизонту) в градусах з наведених у
таблиці:');
disp('
_____
_____');
disp(' | Кут спостереження | 5 град | 10 град | 20 град | 30 град | 40 град | 50
град | 60 град | 70 град | 80 град | 90 град |');
disp(' | _____|
_____|_____');
disp(' | angle_id | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
10 |');
disp('
_____
_____');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 10:');
angle_id=input(' angle_id = ');

Teta_all = [5 10 20 30 40 50 60 70 80 90]; % усі можливі кути спостереження
Teta = deg2rad(Teta_all(angle_id)); % кут спостереження відповідно angle_id у
радіанах

Teta_alpha = 5; % кут атаки у градусах
Teta_alpha = deg2rad(Teta_alpha); % кут атаки в радіанах
S_BpLA = S_BpLA_0*sin(Teta+Teta_alpha)+0.1*S_BpLA_0*cos(Teta+Teta_alpha);
% розмір видимої частини БпЛА

% з урахуванням кута спостереження

```



% коефіцієнт 0.1 підбирається в залежності

% від поперечного розміру БПЛА та його

% орієнтації

S\_DN = pi\*(D\_Teta\*R/2).^2; % площа зрізу діаграми спрямованості на кожній дальності

```
disp(' ');
disp('---> Оберіть стан атмосфери з наведених у таблиці:');
disp(' _____');
disp(' | Стан атмосфери | Ясна | Хмарна | Дощ |');
disp(' | _____ | атмосфера | атмосфера | _____ |');
disp(' | _____|_____|_____|_____|');
disp(' | атмосфера_id | 1 | 2 | 3 |');
disp(' _____');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 3:');
atmosfera_id=input(' атмосфера_id = ');
```

T\_atmosfera\_all = zeros(3,10,4);

```
T_atmosfera_all(:, :, 1) = [80 43 23 16 14.7 13.3 12 10.7 9.3 8;...
                            103 58 32 22 20 18 16.5 14.7 12.8 11;...
                            209 125 73 60 55 49 43.5 38 32.5 27];
```

% яскравісні

температури

% атмосфери

під різними кутами

% та для

різних погодних умов для

% довжини

хвилі 3 см

```
T_atmosfera_all(:, :, 2) = [176 110 62 45 41.3 37.7 34 30.3 26.7 23;...
                            204 134 79 56 52 47 43 38.7 34.3 30;...
                            273 237 170 131 122 113 104 95 86 77];
```

% яскравісні

температури

%

атмосфери під різними кутами

% та для

різних погодних умов для

%

довжини хвилі 1,5 см

```
T_atmosfera_all(:, :, 3) = [179 112 64 46 42.5 39 35.5 32 28.5 25;...
                            252 187 123 92 85 77 70 62.7 55.3 48;...
                            280 278 268 238 226 214 202 190 178 166];
```

%

яскравісні температури

%

атмосфери під різними кутами

% та

для різних погодних умов для

```

%
довжини хвилі 8 мм
    T_atmosfera_all(:, :, 4) = [258 199 130 99 91.7 84.3 77 69.7 62.3 55;...
                               280 271 230 196 184 172 160.5 148.7 136.8 125;...
                               280 280 280 280 278.5 277 275.5 274 272.5 271]; %
яскравісні температури
% атмосфери під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 3 мм
    T_atmosfera = T_atmosfera_all(atmosfera_id, angle_id, radiometer_id); % значення
яскравісної температури
%
атмосфери для обраних параметрів

    T_VpLA_all = zeros(3,10,4);
    T_VpLA_all(:, :, 1) = [103.5 99.6 93.5 89.1 86 83.8 82.2 81 80.2 79.6;...
                           126.5 114.6 102.5 95.1 91.5 88.8 86.7 85 83.7 82.6;...
                           232.5 181.6 143.5 133 126 119 114 108 103 98.6];
% яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 3 см
    T_VpLA_all(:, :, 2) = [213.6 165.9 119.4 102.3 96 93.7 92.8 92.5 92.4 92.4;...
                           241.6 189.9 136.4 113.3 106.3 103.4 101.8 100.9 100.1
99.36;...
                           310.6 292.9 227.4 188.3 176.7 169 162.8 157.2 151.7 146.4];
% яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 1,5 см
    T_VpLA_all(:, :, 3) = [211.9 194.7 165 140.7 120.8 104.5 91.2 80.3 71.3 64;...
                           256.8 239.5 209.9 185.6 165.7 149.4 136 125.1 116.2 108.8;...
                           280.5 279 270 258.2 243.2 229.7 217.6 206.8 197.2 188.5];
% яскравісні температури
% БпЛА під різними кутами
% та для різних погодних умов для
% довжини хвилі 8 мм
    T_VpLA_all(:, :, 4) = [267.9 263.1 254.4 246.7 240 234.2 229 224.6 220.6 217.2;...

```

```

284.1 272.9 252.2 233.6 217.1 202.2 189 177.1 166.4 156.9;...
280.3 280.3 280.3 280.3 278.7 277.5 276.3 275.2 274.2 273.4];
% яскравісні температури

% БпЛА під різними кутами

% та для різних погодних умов для

% довжини хвилі 3 мм

T_BpLA = T_BpLA_all(atmosfera_id, angle_id, radiometer_id); % значення
яскравісної температури % БпЛА

для обраних параметрів

Sigma_0 = (T_atmosfera+Tn)/sqrt(0.5*M); % дисперсія вихідного процесу
% при відсутності БпЛА

disp('---> Оберіть критерій вибору порогу виявлення, з наведених у таблиці: ');
disp(' _____');
disp(' | Назва критерію | критерій Неймана-Пірсона | критерій логічного вибору
порогу |');
disp(' | _____ | з аналізу чутливості приймачів |');
disp(' | _____ |');
disp(' | criterion_id | 1 | 2 |');
disp(' _____');
disp(' ');
disp('---> Введіть ціле число від 1 до 2:');
criterion_id=input(' criterion_id = ');

if criterion_id == 1
disp('---> Введіть ймовірність хибної тривоги від 0 до 1 (типові значення 10^-2,
10^-3 ...');
disp(' Для декількох параметрів введіть данні у форматі вектора-строки "
[10^-2, 10^-3, 10^-4] " ');
L=input(' L = ');

for i = 1:length(L)
Y0(i) = (sqrt(2))*erfcinv(2*L(i))*Sigma_0; % значення порогу виявлення за
данними % Ймовірності хибної тривоги
end

else
disp('---> Введіть порог виявлення (один або декілька у форматі вектора-
строки " [0.1, 0.01, 0.005] "));
disp(' у одиницях яскравісної температури (K)');
disp([' з теоретичного аналізу чутливості обраного приймача, що
розрахована для експериментального']);
disp([' значення постійної часу спостереження та дорівнює '
num2str(round(DT,3)) ' K:']);
Y0=input(' Y0 = ');
end

```

```

K = S_BpLA./S_DN; % коефіцієнт заповнення діаграми
спрямованості

% розрахунок співвідношення сигнал/завада та дисперсії вихідного
% процесу при наявності БпЛА
for i = 1:length(K)
    if K(i)<=1
        mu(i) = sqrt(0.5*M)*(T_atmosfera*(1-K(i))+T_BpLA*K(i)-
T_atmosfera)/(T_atmosfera*(1-K(i))+T_BpLA*K(i)+Tn);
        Sigma_1(i) = (T_atmosfera*(1-K(i))+T_BpLA*K(i)+Tn)/sqrt(0.5*M);
    else
        mu(i) = sqrt(0.5*M)*(T_BpLA)/(T_BpLA+Tn);
        Sigma_1(i) = (T_BpLA+Tn)/sqrt(0.5*M);
    end
end

for i = 1:length(Y0)
    for j = 1:length(mu)
        x0(i,j) = Y0(i)/Sigma_1(j)-mu(j);
    end
end

D = (1/2)*erfc(x0/sqrt(2)); % розрахунок ймовірності правильного
виявлення

figure('Units', 'normalized', 'Position', [0.25 0.1 0.5 0.75])
axes('Position', [0.15 0.15 0.75 0.5]);
for i = 1:size(D,1)

x_pp = min_S_BpLA_0:0.01:max_S_BpLA_0;
D1(i,:) = interp1(S_BpLA_0,D(i,:),x_pp,'pchip');
p(i) = plot(x_pp,D1(i,:), 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('$S_{UAV}, m$', 'Interpreter', 'latex');
ylabel('$D(S_{UAV})$', 'Interpreter', 'latex');
set(gcf, 'color', 'w');
ax = gca;
ax.FontSize = 16;

if max(D1(i,:)) >= 0.89
    yy = get(p(i), 'YData');
    [xx,ii]=find(round(yy,2) == 0.9 );
    hold on
    plot(x_pp(ii(1)),D1(i,ii(1)),'r.', 'MarkerSize', 30)
    if criterion_id == 1
        str_S(i) = {'$For\ L = \ $' num2str(L(i)) '$, D = \ $'
num2str(round(D1(i,ii(1)),2)) '$, S_{UAV} = \ $ ' num2str( x_pp(ii(1)) ) '\ m^{2}. $'};
    else
        str_S(i) = {'$For\ Y_{0} = \ $' num2str(Y0(i)) '$K, \ D = \ $'
num2str(round(D1(i,ii(1)),2)) '$, S_{UAV} = \ $ ' num2str( x_pp(ii(1)) ) '\ m^{2}. $'};
    end
end

```

```

else      str_S(i) ={'';
end

a = annotation('textbox',[0.14 0.78 .5 .2],...
    'interpreter','latex','String',['$ Simulation\ options:$' newline...
        '$\lambda = \ $' num2str(Lamda) '$\ m, $'...
        '\\ \ '...
        '$\Delta F = \ $' num2str(DF/1e9) '$\ GHz, $'...
        '\\ \ '...
        '$T= \ $' num2str(T) '$\ s, $' newline...
        '$T_{n} = \ $' num2str(Tn) '$\ K, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$T_{UAV} = \ $' num2str(T_BpLA) '$\ K, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$\Delta \theta = \ $' num2str(rad2deg(D_Teta)) '$\
^{\circ}, $' newline...
        '$R= \ $' num2str(R) '$\ m, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$\theta_{atm} = \ $' num2str(rad2deg(Teta)) '$\ ^{\circ},
$'...
        '\\ \ \ '...
        '$T_{atm} = \ $' num2str(T_atmosfera) '$\ K, $'...
        '\\ \ \ '...
        '$\Delta T_{fluct} = \ $' num2str(
round(sqrt(2)*(300+Tn)/sqrt(T.*DF), 3) ) '$\ K. $'],'FitBoxToText','on');
a.FontSize = 14;

if criterion_id == 1
    str_Ind(i) = {'$L= \ $' num2str(L(i)) newline...
        '$Y_{0}= \ $' num2str( round(Y0(i),3) ) '$\ K $'};
else
    str_Ind(i) = {'$Y_{0}= \ $' num2str(Y0(i)) '$\ K $'};
end

end

end

Ind = legend(p,str_Ind,...
'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');

b = annotation('textbox',[0.14 0.62 .5 .2],...
    'interpreter','latex','String',str_S,'FitBoxToText','on');
b.FontSize = 14;
title('$Detection \ probability$', 'Interpreter', 'latex')

else

disp(' "parameter_id" має бути цілим числом від 1 до 4. Почніть все з початку!');

end

```