

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

\_\_\_\_\_ Володимир ШУТКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171  
«ЕЛЕКТРОНІКА» ОПП «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»**

Тема: «Методика визначення відстані радіоперехоплення БПЛА»

Виконавець

студент групи ЕС-407Б \_\_\_\_\_ Бакуменко Ярослав Романович

Керівник

доцент к.т.н. \_\_\_\_\_ Габрусенко Є.І.

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_ Сініцин Р.Б.

КИЇВ 2023

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут (факультет) факультет авіонавігації, електроніки та телекомунікації  
Кафедра кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей  
Напрямок (спеціальність) 171 «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи (проекту)**

Бакуменка Ярослава Романовича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

**1. Тема дипломної роботи (проекту):** Методика визначення відстані радіоперехоплення БПЛА

затверджена наказом ректора від 23.03.2023 р. № 387 / ст

**2. Термін виконання роботи (проекту):** з 24.03.2023 р. по 12.06.2023 р.

**3. Вихідні дані до роботи (проекту):**

#### 4. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Збір теоретичних відомостей та даних практичних вимірювань	25.03 – 12.05	
2.	Оформлення першого розділу	13.05 – 16.05	
3.	Формулювання математичного апарату	17.05 – 25.05	
4.	Оформлення пояснювальної записки	26.05 – 11.05	

5. Дата видачі завдання: “ 23 ” березня 2023 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) \_\_\_\_\_ Габрусенко Є.І.  
 (підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Бакуменко Я.Р.  
 (підпис здобувача) (П.І.Б.)

## Реферат

**Актуальність теми** полягає у необхідності забезпечення стабільного та надійного знешкодження БПЛА противника шляхом встановлення завад у радіодіапазоні, щоб унеможливити виконання стратегічних та оперативно-тактичних завдань.

**Метою дослідження** є виведення математичного апарату для визначення відстані радіоперехоплення БПЛА.

**Об'єкт дослідження** – можливості визначення відстані радіоперехоплення БПЛА.

**Предмет дослідження** – методика розрахунку дальності радіоперехоплення.

Для виконання поставленої задачі потрібно виконати наступні завдання:

- зібрати теоретичну інформацію щодо існуючих методів розрахунку потужності радіосигналу у точці прийому;
- провести аналіз існуючих методів розрахунку потужності радіосигналу у точці прийому;
- обрати формулу для максимально точного та простого розрахунку напруженості електромагнітного поля у точці прийому;.

**Ключові слова:** БПЛА, ЯВИЩЕ БЛОКУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОННЕ ПРИДУШЕННЯ, ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАВАД.

## Зміст

	Перелік скорочень.....	6
	Вступ.....	7
1	<b>Теоретичні основи розповсюдження радіосигналів.....</b>	10
1.1	Формула ідеальної радіопередачі.....	10
1.2	Множник тропосферного розсіювання для умов прямої видимості.....	14
1.3	Прогноз загоризонтного розповсюдження за відсутності прямої видимості.....	15
1.4	Висновки.....	19
2	<b>Наявні практичні рішення для розрахунку поширення радіохвиль за різних умов.....</b>	20
2.1	Прогноз поширення за Введенським.....	20
2.2	Прогноз поширення за Шулейкіна-ван-дер-Поля.....	22
2.3	Поширення за Уолфішем-Ікегамі.....	24
2.4	Висновки.....	27
3	<b>Виведення математичного апарату для визначення дальності радіоперехоплення БПЛА.....</b>	28
3.1	Явище блокування та його роль у боротьбі з БПЛА	28
3.2	Порівняння методів прогнозування поширення та формування методики визначення дальності радіоперехоплення.....	33
3.3	Перевірка методики визначення дальності радіоперехоплення....	36
3.4	Висновки.....	51
4	<b>Висновки.....</b>	53
	<b>Список використаної літератури.....</b>	55

## Перелік скорочень

- АІМ – амплітудно-імпульсна модуляція  
АМ – амплітудна модуляція  
АФТ – антено-фідерний тракт  
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика  
ВАХ – вольт-амперна характеристика  
БПЛА – безпілотний літальний апарат  
ЕМО – електромагнітна обстановка  
ЕМП – електромагнітне поле  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина  
ЕРС – електрорушійна сила  
ІКМ – імпульсно-кодова модуляція  
КАМ – квадратурна амплітудна модуляція  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
КОЗ – коефіцієнт ослаблення завади  
СК – система координат

## Вступ

Бакалаврська робота за темою «Методика визначення відстані радіоперехоплення БПЛА» містить в собі 4 розділи.

На сьогоднішній день актуальність оперативної протидії існуючим безпілотним літальним апаратам (БПЛА) як ніколи висока. Сучасні БПЛА різної конструкції та призначення можуть тривалий час знаходитись у повітрі, виконуючи свої завдання, починаючи від стратегічного спостереження і закінчуючи безпосередньою участю у бойових діях оперативно-тактичного рівня, на кшталт дронів-камікадзе. Час, протягом якого БПЛА може знаходитись у повітрі, виконуючи своє завдання, коливається від декількох годин і до декількох діб безперервної роботи.

Крім розвідки, для якої безпілотні літальні апарати часто і розробляються, вони можуть транспортувати та доставляти небезпечні вантажі на об'єкти, що знаходяться під охороною. У сучасних реаліях, дана проблема дуже гостро стоїть на полі бою, оскільки вантажем може слугувати, наприклад, вибухова речовина, що перетворює безпілотний літальний апарат на зброю безпосереднього ураження або дрон-камікадзе. Така зброя може виконувати диверсійні та терористичні завдання. Боротьба з порушниками в даному випадку має два шляхи розвитку:

фізичне ушкодження та приведення БПЛА противника у неробочий стан шляхом застосування вогнепальної зброї або електромагнітного імпульсу;

перехоплення управління над безпілотним літальним апаратом противника та використання його у своїх цілях, починаючи від безпечного приземлення та роззброєння апарату, закінчуючи використанням його вантажу для виконання власних оперативно-тактичних завдань, на кшталт повернення дрона у точку відправлення та детонування там, для завдання шкоди противнику, що відправив БПЛА.

Важливим аспектом сучасної боротьби з БПЛА є своєчасне виявлення та заглушення радіоканалу управління БПЛА. Системи раннього виявлення БПЛА дозволяють вчасно виявити БПЛА противника та обрати необхідний метод протидії.

Раннє виявлення дозволяє вчасно помітити БПЛА, оскільки, якщо апарат буде помічено уже над зоною з цивільним населенням або над об'єктом інфраструктури, то кількість доступних методів боротьби серйозно зменшується. Збивати БПЛА у такій місцевості дуже ризиковано, оскільки велика вірогідність того, що збитий апарат завдасть шкоди тому, що знаходиться під ним, починаючи від пошкодження будівель, інфраструктури, закінчуючи жертвами, котрих можна було би уникнути.

Враховуючи даний факт, все більшого розповсюдження набувають програмні методи боротьби зі схожого роду апаратами. Однак такі системи потребують постійного вдосконалення програмного коду, щоб залишатись актуальними.

Частиною необхідного програмного забезпечення є і алгоритми визначення дальності радіоперехоплення, які необхідно постійно перевіряти та оновлювати

У даній роботі обрано алгоритм визначення дальності радіоперехоплення БПЛА, що дозволяє перехоплювати контроль над ворожими безпілотними літальними апаратами.

**Актуальність теми** полягає у необхідності забезпечення стабільного та надійного знешкодження БПЛА противника шляхом встановлення завад у радіодіапазоні, щоб унеможливити виконання стратегічних та оперативно-тактичних завдань.

**Метою дослідження** є виведення математичного апарату для визначення відстані радіоперехоплення БПЛА.

**Об'єкт дослідження** – можливості визначення відстані радіоперехоплення БПЛА.

**Предмет дослідження** – методика розрахунку дальності радіоперехоплення.

Для виконання поставленої задачі потрібно виконати наступні завдання:

- зібрати теоретичну інформацію щодо існуючих методів розрахунку потужності радіосигналу у точці прийому;
- провести аналіз існуючих методів розрахунку потужності радіосигналу у точці прийому;
- обрати формулу для максимально точного та простого розрахунку напруженості електромагнітного поля у точці прийому;



**Методи дослідження** – практичні експерименти на базі стенду для випробовувань та теоретичні розрахунки у програмному середовищі MathCad 15.

**Практичне значення** – результати, яких було досягнуто у даній роботі, можна використовувати для боротьби з ворожими БПЛА, оскільки приведено теоретичні методи розрахунку напруженості поля у точці прийому та проведено експеримент для демонстрації явища блокування.

# 1 – Теоретичні основи розповсюдження радіосигналів

## 1.1 – Формула ідеальної радіопередачі

Рівняння ідеальної радіопередачі, воно ж рівняння радіопередачі Фрііса, використовується в радіокомунікації і дозволяє розрахувати потужність прийнятого сигналу у точці прийому за ідеальних умов однією антеною. Антена-передавач теж одна, віднесена від приймальної антени на відому відстань та випромінює сигнал заздалегідь відомої потужності. Формула була отримана в 1945 році американським радіоінженером Харальдом Фріісом<sup>[1]</sup>.

Рівняння має наступний вигляд (1.1.1):

$$\frac{P_{recv}}{P_{tran}} = G_{recv} * G_{tran} * \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1.1.1)$$

де:

$P_{recv}$  = потужність, доступна на вході приймальної антени.

$P_{tran}$  = потужність, що випромінюється передаючою антеною.

$G_{recv}$  = коефіцієнт підсилення приймальної антени. Задається не в ДБ.

$G_{tran}$  = коефіцієнт підсилення передаючої антени. Задається не в ДБ.

$\lambda$  = довжина хвилі, що використовується у радіопередачі.

$R$  = відстань між антенами.

Коефіцієнти підсилення  $G_{recv}$  &  $G_{tran}$  – коефіцієнти підсилення по відношенню до ізотропного випромінювача. Для використання рівняння.

Якщо коефіцієнти підсилення антен необхідно подати у дБ, рівняння прийме наступний вигляд (1.1.2):

$$P_{recv} = P_{tran} + G_{tran} + G_{recv} + 20 \log(10) * \frac{\lambda}{4\pi R} \quad (1.1.2)$$

де підсилення задається в дБ, а потужність має одиниці вимірювання дБм (децибел-мілівати).

Для вираження довільної потужності  $P$  в мВт через змінну  $x$  в дБм або навпаки можна використовували наступні еквівалентні рівняння (1.1.3):

$$\begin{aligned} x &= 10 \log(10) * \frac{P}{1mW} \\ P &= 1mW * 10^{\frac{x}{10}} \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

де:  $P$  – потужність у міліватах,  $x$  – змінна у децибел-міліватах.

Якщо  $P$  необхідно визначити у Вт, то рівняння змінюються до наступного вигляду (1.1.4):

$$\begin{aligned} x &= 30 + 10 \log(10) * \frac{P}{1W} \\ P &= 1W * 10^{\frac{x-30}{10}} \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

де:  $P$  – потужність у ватах,  $x$  – змінна у децибел-міліватах.

Проста форма рівняння застосовується лише за наступних ідеальних умов:

$R \gg \lambda$  – Відстань між антенами набагато більша за довжину хвилі, що використовується в радіопередачі. Якщо  $R < \lambda$  – результатом рівняння буде фізично неможлива відповідь, оскільки розрахована потужність була би набагато більшою за випромінювану, що є прямим порушенням закону збереження енергії.

Антени знаходяться у вільному просторі без перешкод та багатопроменевого поширення.

$P_{recv}$  розуміється як потужність на клеммах антени, що приймає сигнал. Існують втрати при передачі через кабель від антени до з'єднання. Крім того, потужність на виході антени буде повністю передана лише тоді, коли антена і лінія передачі повністю узгоджені між собою.

$P_{tran}$  розуміється як потужність доставлена до передаючої антени. Існують втрати в кабелі передачі, що проходить від роз'ємів до антени. Потужність на вході антени буде повністю передаватись тоді і лише тоді, коли буде досягнута умова узгодженості антени та фідерного тракту.

Антени правильно розміщені та мають однакову поляризацію.

Смуга пропускання є достатньо вузькою, щоб це можна було вважати одним значенням довжини хвилі.

Ідеальні умови, на практиці, майже ніколи не є досяжними при звичайній комунікації на земній поверхні через перешкоди, відбиття сигналу від будівель та рельєфу, інтерференція відбитого сигналу з основним. Один із небагатьох випадків, де можна використовувати рівняння ідеальної радіопередачі з задовільною точністю – супутниковий зв'язок, якщо вважати ігнорування атмосферного впливу на сигнал несуттєвим.

Для урахування додаткових явищ, як то напрямок, поляризація антени, невідповідність імпедансу і т.п. до рівняння ідеальної радіопередачі можна додавати додаткові змінні, залежні від того чи іншого фактору. Формула, з урахуванням узгодженості імпедансу, напрямку та поляризації антени приймає наступний вигляд (1.1.5):

$$\frac{P_{recv}}{P_{tran}} = G_{tran}(\theta_{tran}, \varphi_{tran}) * G_{recv}(\theta_{recv}, \varphi_{recv}) * \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 * (1 - |\Gamma_{recv}|^2) * (1 - |\Gamma_{tran}|^2) * (|a_{tran} * a_{recv}|)^2 * e^{-\alpha R} \quad (1.1.5)$$

де:

$G_{tran}(\theta_{tran}, \varphi_{tran})$  – коефіцієнт підсилення антени, що передає у напрямку, в якому вона «бачить» приймаючу антену.

$G_{recv}(\theta_{recv}, \varphi_{recv})$  – коефіцієнт підсилення приймаючої антени в напрямку, в якому вона «бачить» передаючу антену.

$\Gamma_{tran}$  і  $\Gamma_{recv}$  – коефіцієнти відбиття передаючої та приймаючої антен відповідно.

$a_{tran}$  і  $a_{recv}$  – вектори поляризації передаючої та приймаючої антен відповідно, прийняті у відповідних напрямках.

$\alpha$  – коефіцієнт поглинання проміжного середовища.

Також можна вивести формулу для обчислення напруженості електромагнітного поля у точці прийому в мкВ. Формула приймає наступний вигляд (1.1.6), де  $f$  – частота у МГц:

$$U_{recv} = 10^7 * \frac{\sqrt{G_{recv} * G_{tran} * P_{tran}}}{R * f} \quad (1.1.6)$$

На основі базового рівняння ідеальної радіопередачі іноді робляться емпіричні розрахунки. Наприклад, в умовах міста існують сильні ефекти багатопроменевого поширення, а в таких умовах надзвичайно важко з'ясувати, чи

існує пряма зона видимості. Формула у загальній формі може використовуватись для визначення усередненого відношення потужності вхідного та вихідного сигналів та має наступний вигляд (1.1.7):

$$\frac{P_{recv}}{P_{tran}} = G_{tran} * G_{recv} * \left(\frac{\lambda}{R}\right)^\eta \quad (1.1.7)$$

де:

$\eta$  – визначається експериментально та, зазвичай, знаходиться в діапазоні від 3 до 5.

$G_{tran}$  &  $G_{recv}$  – беруться як середні ефективні посилення передаючої та приймаючої антен відповідно.

Для отримання точнішого та корисного результату для подальшого узгодження, зазвичай необхідно використовувати більш складні рівняння, як наприклад *модель Хата для міської місцевості*.

## **1.2 – Множник тропосферного розсіювання для умов прямої видимості**

Процес поширення радіохвиль як над поверхнею Землі, так і у навколоземному просторі супроводжується наступними явищами: відбивання, заломлення, інтерференція, рефракція, розсіювання, дифракція, поглинання. В Земних умовах, через наявність атмосфери, це призводить до втрат енергії радіохвилі. Поширення земних радіохвиль також супроводжується втратами енергії внаслідок заглиблення радіохвилі у товщу землі, що підпадає під явище поглинання. На шляху радіосигналу можуть зустрічатись перешкоди, як то будівлі, пагорби, гори, тощо. Радіохвилі зазнають втрат ще через вплив тропосферної рефракції та внаслідок проходження через іонізовані шари атмосфери.

Додаткові втрати, які обумовлюються вищезгаданими явищами, враховують множником послаблення  $v$  у формулах ідеального радіозв'язку. Формула потужності радіохвилі у точці прийому, що виводиться з формули ідеальної радіопередачі та до якої застосовується коефіцієнт послаблення приймає наступний вигляд (1.2.1):

$$P_{recv} = V^2 * \frac{P_{tran} * G_{tran} * G_{recv} * \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1.2.1)$$

У формулі коефіцієнт послаблення поставлений у квадраті, оскільки потужність радіохвилі прямо пропорційна квадрату напруженості електромагнітного поля.

Сам множник послаблення можна вивести за наступною формулою (1.2.2), яка слідує з формули ідеальної радіопередачі з урахуванням послаблення радіовипромінювання (1.2.1):

$$V = \frac{4\pi R * \sqrt{P_{recv}}}{\lambda * \sqrt{(P_{tran} * G_{tran} * G_{recv})}} \quad (1.2.2)$$

### **1.3 – Прогноз загоризонтного розповсюдження за відсутності прямої видимості**

Поширення електромагнітної хвилі земного типу супроводжується наступними фізичними явищами:

1. Поширюючись вздовж межі повітря-грунт, електромагнітні хвилі збуджують у повітряному та земному середовищах струми, що виступають вторинними джерелами поля.

2. За принципом Гюйгенса-Френеля, поле земної хвилі можна вважати результатом суперпозиції первинного поля і полів, що є наведеними уявними вторинними джерелами в повітрі і ґрунті, що збуджуються первинним полем.

3. Інтенсивність вторинних джерел в ґрунті, відповідно до формули (1.2.2), ослаблена в  $V$  разів у порівнянні з вільним простором внаслідок теплових втрат.

4. Сферична поверхня Землі є перешкодою, яку електромагнітна земна хвиля огинає при поширенні за межі горизонту. Під час такого огинання спостерігаються великі втрати потужності хвилі через неідеальність сферичного екрану з радіусом  $R_e = a_{мз} = 6370 \text{ км}$ .

5. Скін ефект блокує проникнення потужності електромагнітної хвилі вглиб земної поверхні, посилюючи тим самим поле над поверхнею землі.

Математичне визначення напруженості поля  $E$  у точці прийому з урахуванням усіх п'яти процесів, що представлені вище – складна дифракційна задача. Її рішення було сформульоване Володимиром Олександровичем Фоком<sup>[2]</sup> у 1945р. для Землі. У вирішенні було використано наступні спрощення:

1. Земля є однорідним діелектриком. Це означає, що склад земної поверхні, який змінюється як зі збільшенням глибини, так і з переміщенням по поверхні, ігнорується та замінюється коефіцієнтом, що виражає середнє значення діелектричної проникності.

2. Земна атмосфера вважається однорідною. Насправді, Земна атмосфера не є такою, оскільки в ній зустрічаються області підвищеного та пониженого тиску, що впливає на щільність атмосфери та її діелектричну проникність. Також може змінюватись склад атмосфери, в залежності від висоти та регіону.

Рішення Фока є нескінченним рядом, що для практичних розрахунків поділяється на декілька часткових.



Критерієм застосування слугує висота підйому антен ( $h_1, h_2$ ) над земною поверхнею та протяжність радіотраси ( $r$ ). За висотами розташування антен виділяють 2 класи задач:

Перший клас – висота підйому антен набагато більша за довжину хвилі ( $h \gg \lambda$ ). Такі антени називають високо піднятими. Зазвичай у цю категорію підпадають антени частотних діапазонів НВЧ (Над Високі Частоти), УВЧ (Ультра Високі Частоти), ДВЧ (Дуже Високі Частоти). Часткове рішення визначається згідно з співвідношенням між довжиною радіолінії  $r$  та граничною відстанню прямої видимості  $r_{np}$ .

Другий клас – низько розташовані антени, коли висота підйому антени набагато менша за довжину хвилі ( $h \ll \lambda$ ). При вирішенні завдань цього класу необхідно знати область відстаней або зону, де земні хвилі будуть безперешкодно поширюватись, відстань прямої видимості без урахування сферичності Землі.

Дистанцією прямої видимості називають шлях по прямій лінії між передавальною та приймальною антенами, при якому пряма лінія сполучає обидві антени та дотикається до земної поверхні в одній точці  $C$  (довжина дотичної до земної поверхні  $AB$ ) (рис 1.3.1).

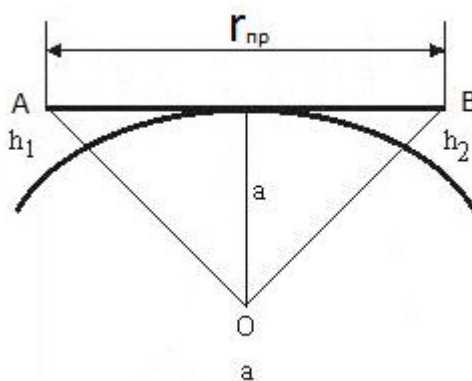


Рис. 1.3.1 – До визначення відстані прямої видимості при задачі першого класу

Величина  $r_{np}$  відрховується по дузі великого кола і лише приблизно дорівнює прямій  $AB$  (рис.1.3.1).

У випадку однорідної атмосфери пункти  $A$  і  $B$  віддалені на відстань прямої видимості. Оскільки антени вважаються високо піднятими, то на підставі простих геометричних міркувань маємо:

$$r_{pp} = AC + CB \quad (1.3.1)$$

З трикутника  $OAC$  (рис.1.3.1) випливає наступне, при  $h_1 \ll a_{3M}$ :

$$AC = \sqrt{(a_{3M} + h_1)^2 - a_{3M}^2} = \sqrt{(2 * a_{3M}) * h_1} \quad (1.3.2)$$

А з трикутника  $OCB$  (рис 1.3.1) випливає наступне, при  $h_2 \ll a_{3M}$ :

$$BC = \sqrt{(a_{3M} + h_2)^2 - a_{3M}^2} = \sqrt{(2 * a_{3M}) * h_2} \quad (1.3.3)$$

З трикутників  $OCB$  та  $OAC$  (рис 1.3.1) маємо наступне:

$$r_{pp} = \sqrt{2a_{3M} * (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})} \quad (1.3.4)$$

Якщо виразити  $r_{pp}$  в км, а  $h_1$  і  $h_2$  в метрах, то прийдемо до простої інженерної формули:

$$r_{pp}[km] = 3.57(\sqrt{h_{1[m]}} + \sqrt{h_{2[m]}}) \quad (1.3.5)$$

Для прогнозування поширення радіохвиль, прийнято розділяти трасу лінії зв'язку на 4 різні ділянки, а саме: пласка земля, зона освітленості, зона півтіні та зона тіні.

Перша модель радіотраси (пласка земля) – дана модель використовується, коли дальність прямої видимості не перевищує 20% дистанції прямої видимості.  $r < 0.2r_{np}$ .

Друга модель радіотраси (освітлена область) – застосовується у випадку, коли протяжність лінії знаходиться у межах від 20% до 80% дистанції прямої видимості.  $0.2r_{np} < r < 0.8r_{np}$ .

Третя модель радіотраси (область півтіні) – у цьому випадку пряма лінія, що сполучає передавач та приймач перетинає опуклість Землі та лежить в межах 80-120% дистанції прямої видимості.  $0.8r_{np} < r < 1.2r_{np}$ .

Четверта модель (область тіні) – застосовується, якщо довжина радіотраси перевищує 120% дистанції прямої видимості.  $1.2r_{np} < r$ .

У зоні півтіні та тіні хвилі поширюються шляхом дифракції.

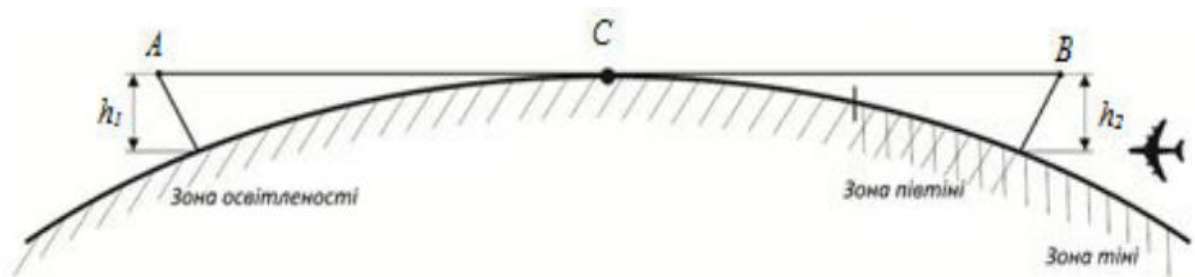


Рис. 1.3.2 – Зони освітленості, тіні та півтіні при дифракції радіохвиль навколо земної кулі

## 1.4 – Висновки

У розділі 1 розглянуто теоретичну інформацію, що була зібрана з різних джерел для виконання даної бакалаврської роботи. Серед обробленої інформації було виділено та занесено до роботи наступне: формула ідеальної радіопередачі, адаптація формули ідеальної радіопередачі для урахування взаємного розташування антен, доповнення адаптованої формули радіопередачі для урахування умов навколишнього середовища та коефіцієнту відбиття антен. Також у наявності методика врахування явища тропосферного розсіювання за допомогою формули

ідеальної радіопередачі. Формулу ідеальної радіопередачі також можна модифікувати для прогнозування загоризонтного розповсюдження радіохвиль, що описано у розділі 1.3.

У результаті, для обрахунку напруженості електромагнітного поля у точці прийому було обрано модифіковану формулу ідеальної радіопередачі (1.1.6).

## 2 – Найявні практичні рішення для розрахунку поширення радіохвиль за різних умов

Серед існуючих методик розрахунку поширення радіохвиль можна виділити 3 основні методи розрахунку, а саме: прогноз поширення за Введенським, який надає можливість відносно простого та достатньо точного розрахунку, за умов використання високо піднятих антен та простої інтерференційної картини; прогноз поширення радіохвиль за формулою Шулейкіна-ван-дер-Поля, який здатен описати лише ковзні хвилі та не придатний до використання за інших умов поширення; модель поширення за методикою Уолфіша-Ікегамі, що дозволяє з високим ступенем точності розраховувати поширення радіохвиль за умов складної міської забудови.

### 2.1 – Прогноз поширення за Введенським

За цією формулою можна обраховувати зміну множника послаблення на відстані  $r$  при заданих висотах антен. Щоб вивести залежність, необхідно сформулювати вираз різниці ходу прямого та відбитого променів.

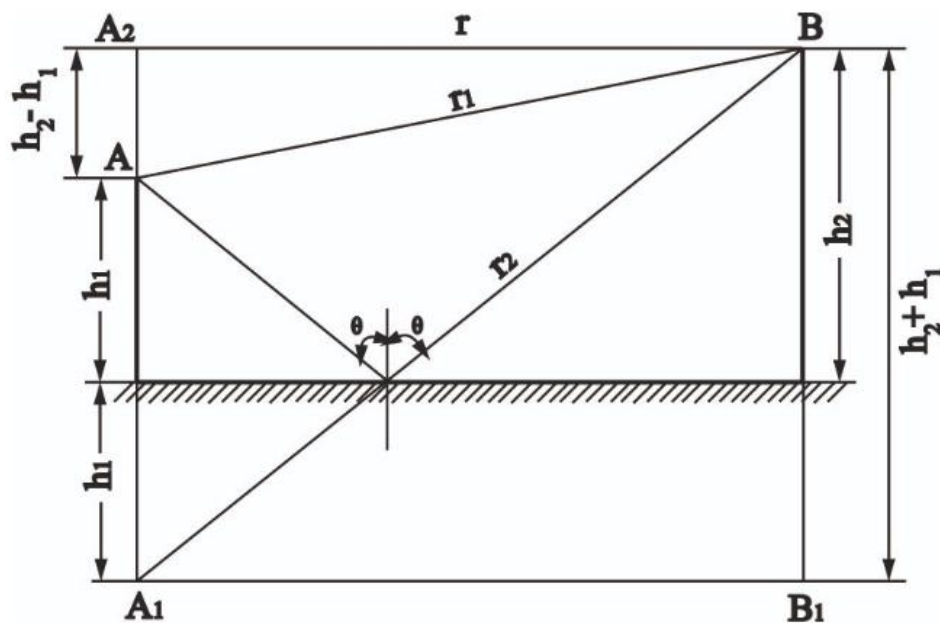


Рис.2.1.1 – Малюнок до квадратичної формули Введенського

Рис. 2.1.1 актуальний за наступних умов:  $r \gg h_1$ ;  $r \gg h_2$ .

Для визначення множника послаблення за квадратичною формулою Введенського необхідно визначити шляхи прямої та зворотної хвиль.

З трикутника  $\Delta AA_2B$  (рис. 2.1.1) можемо визначити  $r_1$  за наступною формулою (2.1.1):

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{r^2 + (h_2 - h_1)^2} \\ r_1 &= r \sqrt{1 + \frac{(h_2 - h_1)^2}{r^2}} \\ r_1 &= r \left| 1 + \frac{(h_2 - h_1)^2}{2r^2} \right| \end{aligned} \tag{2.1.1}$$

З трикутника  $\Delta A_1BB_1$  (рис. 2.1.1) можемо визначити  $r_2$  за наступною формулою (2.1.2):

$$\begin{aligned} r_2 &= \sqrt{r^2 + (h_2 + h_1)^2} \\ r_2 &= r \sqrt{1 + \frac{(h_2 + h_1)^2}{r^2}} \\ r_2 &= r \left| 1 + \frac{(h_2 + h_1)^2}{2r^2} \right| \end{aligned} \tag{2.1.2}$$

З цього слідує наступне різниця ходу променів прямої та відбитої хвиль  $\Delta r$  визначається формулою (2.1.3):

$$r_2 - r_1 = \Delta r \tag{2.1.3}$$

Виконавши перетворення, ми отримуємо формулу для знаходження різниці ходу прямої та відбитої хвиль (2.1.4):

$$\Delta r = r \left| 1 + \frac{(h_2 + h_1)^2}{2r^2} \right| - r \left| 1 + \frac{(h_2 - h_1)^2}{2r^2} \right| \quad (2.1.4)$$

З усього вище описаного слідує наступне: коефіцієнт послаблення обчислюється за наступною формулою (2.1.5):

$$V = \sqrt{1 + (|R|)^2 + 2|R| * \cos\left(\frac{2h_1 * h_2}{r} * \frac{2\pi}{r} + \phi R\right)} \quad (2.1.5)$$

А повна формула радіопередачі за Введенським матиме наступний вигляд (2.1.6)<sup>[2]</sup>:

$$E_m = \frac{\sqrt{60PD}}{r^2} * \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda} \quad (2.1.6)$$

## 2.2 – Прогноз поширення за формулою Шулейкина-ван-дер-Поля

Дана формула, Шулейкина-ван-дер-Поля<sup>[3]</sup>, використовується для обчислення потужності електромагнітного поля ковзної хвилі. Рішення представляється наступною простою рівністю (2.2.1):

$$E_{\text{дійсне}} = E_{\text{ідеальне}} * V(\rho) \quad (2.2.1)$$

Де:

$E_{ідеальне}$  – дійсне значення напруженості поля над ідеальною провідною площиною.

$V(\rho)$  – модуль множника послаблення, який оцінює, у скільки разів поле над реальною земною поверхнею буде слабше за поле над ідеальною провідною площиною.

Ідеальна формула напруженості поля у точці прийому, вона же формула ідеальної радіопередачі, приймається у наступному вигляді (2.2.2):

$$E_{ідеальне} = \sqrt{\frac{60P_1 * G_1}{r}} \quad (2.2.2)$$

А коефіцієнт послаблення визначається за наступною формулою (2.2.3):

$$V_{зМ}(\rho) = \left| 1 - i\sqrt{\pi\rho}e^{-\rho} - 2e^{-\rho}\sqrt{\rho} \int_0^{\sqrt{\rho}} e^{x^2} dx \right| \quad (2.2.3)$$

Параметр  $\rho$  – числова відстань, що є безрозмірною величиною та визначається наступним чином (2.2.4):

$$\rho = \pi r / \left[ \lambda \sqrt{\varepsilon_{rзМ}^2 + (60\lambda\sigma_{зМ})^2} \right] \quad (2.2.4)$$



## 2.3 – Поширення за Уолфішем-Ікегамі

Модель Уолфіша-Ікегамі<sup>[4]</sup> не є детерміністичною, вона статистична. Це означає, що вона дозволяє отримати лише наближені, усередковані значення.

Модель Уолфіша-Ікегамі признана найкращою для розрахунку сигналу в малих стільниках. Дана модель ґрунтується на фізичному представленні поля у точці прийому з двох складових, а саме: когерентної та розсіяної. Когерентна складова визначається хвилею, що дифрагує навколо будівель вздовж дороги з боку базової станції. Розсіяна складова утворюється шляхом перевипромінювання будівлями основної хвилі базової станції. Розсіяна складова надходить з напрямків, не співпадаючих з напрямком на базову станцію і, навіть, протилежних йому. Виходячи з моделі, якщо в місті невисока та щільна забудівля, основним шляхом розповсюдження сигналу (у випадку відсутності прямої видимості), буде шлях, що проходить понад дахами будівель. Це призводить до великих послідовних втрат, оскільки кожен дах представляє собою окремий екран.

Параметри, що використовує модель для обрахунків:

- частота передачі
- висота передаючої антени та приймальної антен
- відстань між передавачем та приймачем
- середня висота будівель та ширина вулиць
- відстань між будівлями

Енергія прийнятого сигналу залежить від взаємного розташування приймача та передавача.

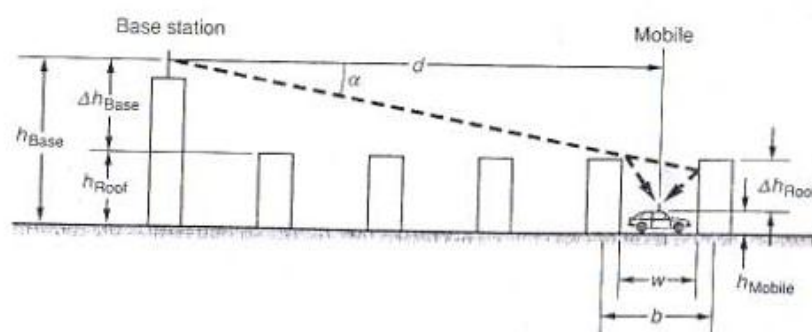


Рис.2.3.1 – геометрія при обрахунку ПРХ за моделлю Уолфіша-Ікегамі

Якщо приймач та передавач знаходяться у стані прямої видимості, а відстань між ними перевищує 20 метрів, тоді коефіцієнт втрат визначається за наступною формулою (2.3.1):

$$L_{los} = 42.6 + 26\log R + 20\log f \text{ for } R \geq 20m \quad (2.3.1)$$

Де  $L_{los}$  – втрати при прямій видимості (англ. Loss line of sight)

Якщо же умови прямої видимості не виконуються, то формула обчислення втрат (2.3.1) змінюється на наступну (2.3.2):

$$L_b = \begin{cases} L_{FS} + L_{rts} + L_{msd} \\ L_{FS} \quad \text{if } L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (2.3.2)$$

$L_{fs}$  – втрати потужності хвилі при переміщенні у вільному просторі

$L_{rts}$  – втрати на відбивання хвилі від даху, вулиць та втрати при розсіюванні.

Визначаються наступними чином (2.3.3):

$$L_{rts} = \begin{cases} -16.9 - 10\log w + 10\log f + 20\log \Delta h_{mobile} + L_{ori} & h_{roof} > h_{mobile} \\ 0 & \text{if } L_{rts} < 0 \end{cases} \quad (2.3.3)$$

Втрати потужності через взаємну орієнтацію хвилі та приймача  $L_{ori}$  визначається наступним чином (2.3.4), де  $\phi$  – кут між напрямком поширення хвилі та віссю, що проходить вздовж дороги між будівлями в умовах міської забудови:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \frac{\phi}{deg} & \text{for } 0 \leq \phi < 35 \\ 2.5 + 0.075 \left( \frac{\phi}{deg} - 35 \right) & \text{for } 35 \leq \phi < 55 \\ 4 - 0.114 \left( \frac{\phi}{deg} - 55 \right) & \text{for } 55 \leq \phi \leq 90 \end{cases} \quad (2.3.4)$$

$L_{msd}$  – втрати через екрани, які формуються дахами будівель та визначається наступною формулою (2.3.5):

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log \frac{R}{km} + k_f \log \frac{f}{MHz} - 9 \log \frac{b}{m} \quad (2.3.5)$$

Де  $L_{bsh}$  визначається формулою (2.3.6),  $k_d$  визначається за формулою (2.3.7), а  $k_a$  визначається за формулою (2.3.8):

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log (1 + \Delta h_{base}) & \text{for } h_{base} > h_{roof} \\ 0 & \text{for } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (2.3.6)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{for } h_{base} > h_{roof} \\ 18 - \frac{15 \Delta h_{base}}{h_{roof}} & \text{for } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (2.3.7)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{for } h_{base} > h_{roof} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{base} & \text{for } R \geq 5km \text{ and } h_{base} \leq h_{roof} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{base} \frac{R}{0.5} & \text{for } R < 5km \text{ and } h_{base} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (2.3.8)$$

Як видно, модуль Уолфіша-Ікегамі є комплексним статистичним рішенням, що дозволяє отримати статистично наближені результати потужності радіохвилі у точці прийому з урахуванням складної урбаністичної забудовлі.

## 2.4 – Висновки

У ході розділу 2 було розглянуто три основних існуючих методики прогнозування поширення радіохвиль. Прогноз поширення за Введенським є простим рішенням для високо піднятих антен, але не відрізняється особливою точністю. Прогноз поширення за формулою Шулейкіна-ван-дер-Поля придатний до використання лише для ковзних хвиль, що, в умовах даної роботи, вважається неактуальним. Прогноз поширення за моделлю Уолфіша-Ікегамі можна використовувати лише за наступних умов: висота базової станції 50-200м, висота приймальної антени до 2.5м. Не зважаючи на те, що дана модель добре описує поширення радіохвиль в умовах міської забудови, вона у даній роботі не використовується.

## **3 – Виведення математичного апарату для визначення дальності радіоперехоплення БПЛА**

### **3.1 – Явище блокування та його роль у боротьбі з БПЛА**

Сучасні визначення терміну БПЛА не в повній мірі відображають стан речей на ринку БПЛА, а низка країн впроваджує власну термінологію у цій галузі. Тому найбільш прийнятним вважаємо наступне визначення: «Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – це літальний апарат, який багаторазово реалізовує своє функціональне призначення без безпосереднього розміщення людини на борту з метою управління»<sup>[7]</sup>.

У наказі Міністерства Оборони України<sup>[8]</sup> приведено наступне визначення терміну БПЛА: «безпілотне повітряне судно - безпілотний літальний апарат (далі - БпЛА) - ПС, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються дистанційно за допомогою ПДП, розташованого поза ПС, або ПС, що здійснює політ автономно за відповідною програмою»<sup>[8]</sup>.

БПЛА, що не програмуються на землі заздалегідь для виконання завдання, зобов'язані мати радіоканал(и) для прийому та передачі даних, наприклад: канал передачі відеоінформації; канал управління БПЛА; канал для ретрансляції інформації між пристроєм управління та іншим безпілотним пристроєм. Саме тому існує два типи БПЛА, а саме – програмовані БПЛА, що програмуються на землі та оперовані БПЛА, які керуються оператором у режимі реального часу<sup>[9]</sup>.

Для віддаленого управління БПЛА за допомогою радіоканалу необхідно включити до конструкції апарату радіопередавальний та радіоприймальний пристрої.

Через особливості розповсюдження радіохвиль, напруженість поля у точці прийому може бути занадто низькою, саме тому у радіопередавальних та радіоприймальних пристроях використовуються підсилювачі потужності.

Підсилювачі потужності у радіоприймальних та радіопередавальних пристроях виконуються на транзисторах, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику (далі ВАХ). Для прийнятної роботи підсилювача обирають найбільш лінійну ділянку ВАХ, де коефіцієнт підсилення змінюється лінійно або майже лінійно. Типова ВАХ підсилювального каскаду представлена на рис. 3.1.1.

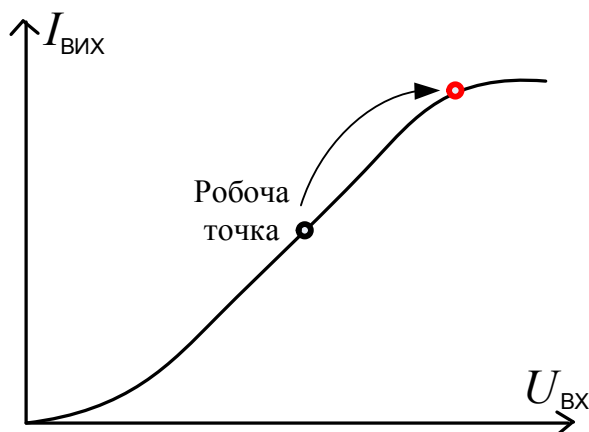


Рис.3.1.1 – ВАХ типового підсилювального каскаду радіоприймального пристрою

За допомогою експериментальних досліджень<sup>[6]</sup> було виявлено, що «якість функціонування радіоприймального пристрою стає неприйнятною, коли вплив завади зміщує робочу точку ВАХ підсилювального каскаду настільки, що амплітуда корисного сигналу на виході каскаду падає до 30% від норми»<sup>[6]</sup>.

Для знешкодження БПЛА, щоб унеможливити його керування та передачу телеметрії радіоканалами, необхідно використовувати явище блокування, як один із найефективніших способів боротьби з БПЛА. «Для цього необхідно створити в межах радіоканалу, на частоті обміну інформацією між БПЛА та пристроєм управління або у сусідніх каналах, заваду достатньо високої амплітуди, щоб вона «вибила» підсилювальний каскад зі стабільного стану»<sup>[10]</sup>.

Для демонстрації явища блокування проведено експеримент на прикладі радіостанції «Р-802М2» (4), двох генераторів – сигналу (1) та завади (2), еквівалентної схеми узгоджуючого пристрою (3) та осцилографа (5) для зняття показників. Стенд представлений на рис.3.1.2.



Рис.3.1.2 – стенд для демонстрації явища блокування на базі радіостанції «P-802M2»

Генератор сигналу та генератор завади імітують корисний сигнал та заваду, що приймаються радіостанцією. Модуляція сигналу амплітудна з частотою модулятора 1кГц. Завада не має модуляції. Еквівалент реальної антени виконано у вигляді еквівалентної схеми узгоджуючого пристрою. Через компонування еквіваленту антени генератори сигналу та завади не впливають одне на одного, що дозволяє отримувати більш точні результати. Суміш двох сигналів, що отримується внаслідок роботи антенного еквіваленту, подається на антенний вхід радіостанції (4), імітуючи приймання корисного сигналу та завади за допомогою штатної антени. Осцилограф під'єднано до низькочастотного виходу радіостанції, що дозволяє зафіксувати явище блокування та зареєструвати його ефективність.

Частота роботи радіостанції під час проведення експерименту – 125.00МГц. Частота роботи завади під час проведення експерименту – 125.02МГц, що є «завадою за сусіднім каналом». Коефіцієнт блокування визначається наступним чином (3.1.1):

$$K_{bl} = \frac{U_{out} - U_{sum}}{U_{out}} \quad (3.1.1)$$

де:

$U_{out}$  – рівень корисного сигналу на виході радіопередавального пристрою за відсутності радіозавади;

$U_{sum}$  – загальний рівень напруженості поля, коли на радіоприймальний пристрій, окрім корисного сигналу, впливає сигнал завади;

Під час експерименту було проведено 7 замірів за різних співвідношень рівнів корисного сигналу та сигналу завади. Результати замірів сигналів та коефіцієнту блокування представлені у таблиці (3.1.2).

Номер вимірювання	$U_{out}$ , mV	$U_{sum}$ , V	$K_{bl}$
1	50	12	0
2	100	12	0
3	200	11	0,08
4	300	9	0,25
5	400	6	0,5
6	500	3	0,75
7	600	1	0,92

Таблиця 3.1.2 – Результати замірів рівня вхідного сигналу при встановленій заваді

Як видно з таблиці 3.1.2, повне блокування радіостанції «P-802M2» відбувається, коли завада за сусіднім каналом перевищує показник у 500мВ. Ці дані актуальні саме для цієї апаратури та отримані при блокуванні радіостанції «завадою за сусіднім каналом». Виходячи з даних таблиці 3.1.2 можна побудувати графік залежності коефіцієнту блокування від амплітуди завади (рис.3.1.2).

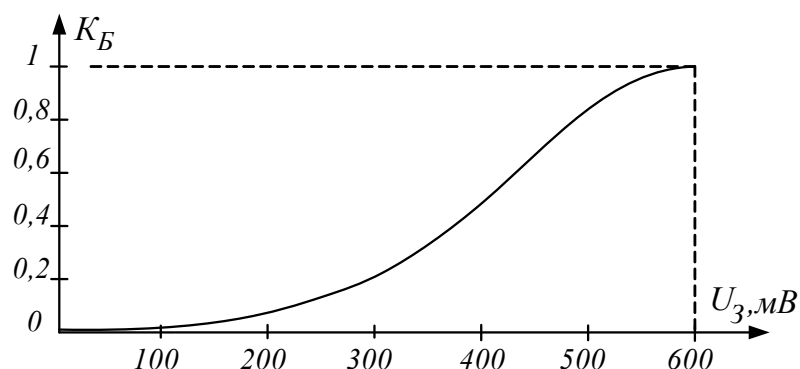


Рис 3.1.2 – залежність коефіцієнту блокування від рівня завади



Слід уточнити, що результати проведеного експерименту лише показують суть явища блокування, принцип його роботи, а отримані значення коефіцієнту блокування при заданих у ході експерименту амплітудах корисного сигналу та завади актуальні лише для радіостанції «Р-802м2» та за умови, що завада розташована у сусідньому каналі.

### **3.2 – Порівняння методів прогнозування поширення та формування методики визначення дальності радіоперехоплення**

Для початку необхідно порівняти обрахункові можливості кожного з методів розрахунку потужності радіосигналу у точці прийому, враховуючи простоту математичних операцій. Це пов'язано з тим, що нам не потрібно отримувати точне значення потужності радіосигналу при певних умовах, достатньо наближеного значення, що дозволить спростити математичний апарат та дозволити обраховувати необхідні показники, за необхідності, швидко та без зайвих факторів.

Модель Введенського не підходить, оскільки, не зважаючи на малу кількість параметрів, що необхідно знати для обрахунку, модель справедлива лише для високо піднятих антен. Дане обмеження робить модель поширення Введенського справедливою лише за умов боротьби з БПЛА шляхом використання власних БПЛА з апаратурою для радіоелектронної боротьби. Пізніше приведено приклад, чому цю формулу не можна використовувати (рис. 3.2.35).

Модель Шулейкіна-ван-дер-Поля не підходить для обрахунку потужності сигналу у точці прийому через специфіку використання, а саме – формулу можна використовувати лише для ковзних хвиль.

Модель Уолфіша-Ікегамі не підходить, оскільки модель занадто комплексна для швидких та зручних розрахунків. Ще одним фактором є те, що її необхідно застосовувати лише в урбаністичній інфраструктурі, оскільки в таких умовах не справляються полегшені моделі, при заперешкодному поширенні радіохвиль. Модель є статистичною, що також робить її придатною лише для міської забудови.

Для обрахунку напруженості поля у точці прийому найкраще підходить модифікована формула ідеальної радіопередачі з урахуванням коефіцієнтів підсилення антен, відстані та частоти роботи (1.1.6). Формулу було допрацьовано для сумісності з коефіцієнтами підсилення поданими у децибелах (3.1.7).

$$U_{recv} = 10^7 * \sqrt{\frac{10^{\frac{G_{recv}}{10}} * 10^{\frac{G_{tran}}{10}} * P_{tran}}{R * f}}$$

(3.2.7)

На сьогоднішній день, тема боротьби з БПЛА противника стоїть особливо гостро, через повномасштабне вторгнення РФ в Україну. БПЛА є невід'ємною частиною сучасних бойових дій. Серед використовуваних РФ апаратів, найчастіше зустрічаються наступні вироби: «Ланцет-1», «Ланцет-3», «Зала-421» та «Орлан-10». Саме на їхньому прикладі буде розглянуто обраний математичний апарат для визначення відстані радіоперехоплення.

У відкритих джерелах<sup>[5]</sup> було знайдено інформацію про БПЛА типу «Ланцет». З усіх даних нам необхідно знати лише наступне: висота польоту, частотний діапазон(и), що використовуються для керування та передачі телеметрії, а також чутливість приймаючого пристрою та потужність передаючого, дальність застосування БПЛА.

Спочатку буде розглянуто БПЛА «Ланцет-1».

Частотний діапазон, що використовується для каналу управління, має наступні значення: 868-870МГц або 902-928МГц. Діаграма спрямованості антени, що використовується для каналу управління невідома, як і її тип, залишаються невідомими, оскільки ця інформація залишається закритою.

Частоти, що використовуються для передачі відеоінформації: 2200-2400МГц. Діаграма спрямованості антени, що використовується у даному БПЛА для передачі відеоінформації представлена на рис.3.2.1. Діаграма спрямованості була отримана шляхом математичного моделювання, на основі структури антени, яку вдалось вивчити. Є інформація, що дана антена розташована внизу фюзеляжу та освітлює нижню півсферу апарату. «Втім, варто зауважити, що апаратура, що використовується на БПЛА «Ланцет-1» для передачі відеоінформації, здатна працювати в діапазоні частот 1900-2700МГц, але на практиці сигналу за межами діапазону 2200-2400МГц виявлено не було.»<sup>[TRO]</sup>

Система навігації БПЛА «Ланцет-1» працює на наступних частотах: 1561МГц, 1575МГц, 1597-1616МГц.

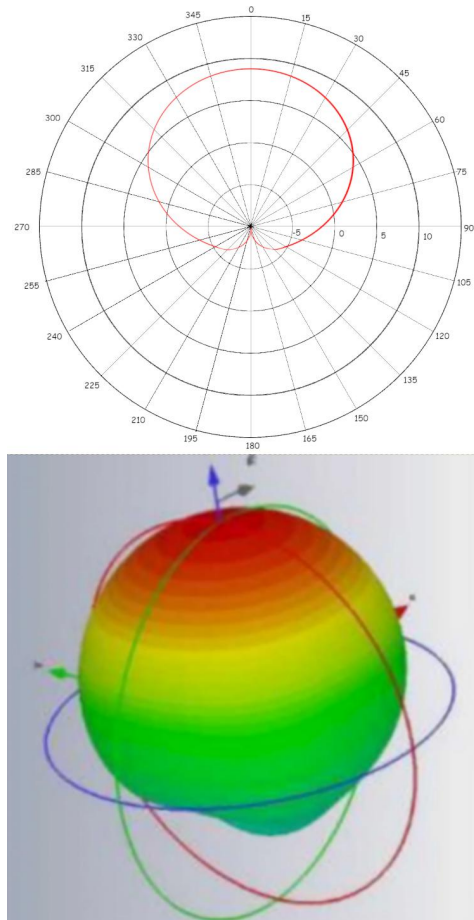


Рис.3.2.1 – Діаграма спрямованості антени відео-каналу БПЛА «Ланцет-1»

Оскільки немає точних даних стосовно чутливості приймача БПЛА «Ланцет-1», а також невідомою залишається діаграма спрямованості антени каналу управління, буде використано декілька допущень, а також метод непрямого визначення чутливості приймача БПЛА «Ланцет-1» за допомогою відкритої інформації щодо того, що «Будь-який інший передавач перешкод, розміщений безпосередньо на позиції артилерійського підрозділу, для створення “куполу” з радіусом 3 км повинен мати потужність передавача на канал управління 100 — 150 Вт.»<sup>[5]</sup>. Виходячи з цієї інформації та обраної формули розрахунку напруженості

електромагнітного поля у точці прийому, можна розрахувати, яка напруженість поля позбавляє БПЛА «Ланцет-1» можливості застосування каналу управління.

Допущення, що зроблені, полягають у наступному: знайдена у відкритих джерелах інформація достовірна; методика розрахунку напруженості поля у точці прийому обрана правильна; коефіцієнт підсилення антени приймача (БПЛА «Ланцет-1») береться рівним 2дБ, оскільки є інформація щодо того, що антена спрямована на освітлення нижньої півсфери БПЛА, як і антена передавача каналу відеоінформації. Даний коефіцієнт підсилення прийнято як найгірший випадок взаємної орієнтації БПЛА та антени радіоелектронної боротьби (далі РЕБ).

За умови використання антенної решітки з коефіцієнтом підсилення 20дБ, випромінюваної потужності 150Вт, частоти 902МГц та «куполу» РЕБ радіусом у 3км, напруженість поля на поверхні «куполу» буде 5.698мкВ. За інформацією відкритих джерел<sup>[TRO]</sup>, цього достатньо для знешкодження БПЛА типу «Ланцет-1». Тому умовою теоретичного знешкодження БПЛА цього типу вважатиметься перевищення еталонного показника напруженості поля у точці прийому, а саме 5.698мкВ.

### **3.3 – Перевірка методики визначення дальності радіоперехоплення**

Розрахунки проведені за п'яти можливих частот радіоканалу управління, а саме: 868МГц, 870МГц, 902МГц, 915МГц, 928МГц.

Також використовуються наступні потужності передавача пристрою РЕБ: 100Вт, 150Вт, 300Вт.

Коефіцієнт підсилення передаючої антени, залежно від типу антени. Тому в розрахунках використано наступні значення підсилення, що дозволяють охопити широкий спектр антен: 0дБ, 5дБ, 10дБ, 20дБ, 40дБ.

Розрахунки проводяться за наступних відстаней між антеною пристрою РЕБ та БПЛА: 1000м, 3000м, 5000м, 10000м.

Для розрахунку використовується програмне забезпечення «Mathcad 15».

### Розрахунок №01:

частота передачі  $f = 868$  МГц

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 100$  Вт

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0$  Дб

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2$  Дб

Відстань між об'єктами  $R = 1000$  м

$$\begin{aligned}
 f &:= 868 & G_{\text{recv}} &:= 2 & G_{\text{tran}} &:= 0 \\
 P_{\text{tran}} &:= 100 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{\text{recv}} &:= 10^7 \cdot \sqrt{\frac{10^{\left(\frac{G_{\text{recv}}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{\text{tran}}}{10}\right)} \cdot P_{\text{tran}}}{R \cdot f}} = 4.586 \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис.3.3.1 – дані та результати розрахунку №01

Результат  $U_{\text{recv}}$  (напруженість поля у точці прийому) = 4.586 мкВ

### Розрахунок №02:

частота передачі  $f = 870$  МГц

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 100$  Вт

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0$  Дб

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2$  Дб

Відстань між об'єктами  $R = 1000$  м

$$\begin{aligned}
 f &:= 870 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 0 \\
 P_{tran} &:= 100 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \sqrt{\frac{10 \left( \frac{G_{recv}}{10} \right) \cdot 10 \left( \frac{G_{tran}}{10} \right) \cdot P_{tran}}{R \cdot f}} = 4.576 \mu V
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.2 – дані та результати розрахунку №02

Результат  $U_{recv} = 4.576 \mu V$

### Розрахунок №03:

частота передачі  $f = 902 \text{ МГц}$

потужність передавача  $P_{tran} = 100 \text{ Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{tran} = 0 \text{ Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{recv} = 2 \text{ Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000 \text{ м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 902 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 0 \\
 P_{tran} &:= 100 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \sqrt{\frac{10 \left( \frac{G_{recv}}{10} \right) \cdot 10 \left( \frac{G_{tran}}{10} \right) \cdot P_{tran}}{R \cdot f}} = 4.414 \mu V
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.3 – дані та результати розрахунку №03

Результат  $U_{recv} = 4.414 \mu V$

**Розрахунок №04:**

частота передачі  $f = 915 \text{ МГц}$

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 100 \text{ Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0 \text{ Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2 \text{ Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000 \text{ м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 915 & G_{\text{recv}} &:= 2 & G_{\text{tran}} &:= 0 \\
 P_{\text{tran}} &:= 100 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{\text{recv}} &:= 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10^{\left(\frac{G_{\text{recv}}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{\text{tran}}}{10}\right)} \cdot P_{\text{tran}}}}{R \cdot f} = 4.351 \text{ } \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.4 – дані та результати розрахунку №04

Результат  $U_{\text{recv}} = 4.351 \text{ мкВ}$

**Розрахунок №05:**

частота передачі  $f = 928 \text{ МГц}$

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 100 \text{ Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0 \text{ Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2 \text{ Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000 \text{ м}$



$$\begin{aligned}
 f &:= 928 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 0 \\
 P_{tran} &:= 100 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10 \left(\frac{G_{recv}}{10}\right) \cdot 10 \left(\frac{G_{tran}}{10}\right) \cdot P_{tran}}}{R \cdot f} = 4.29 \text{ } \mu V
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.5 – дані та результати розрахунку №05

Результат  $U_{recv} = 4.290 \mu V$

Перші п'ять розрахунків демонструють зміну показника напруженості електромагнітного поля у точці прийому зі зміною частоти. Як видно, напруженість зворотно пропорційна частоті та має майже лінійну залежність за дистанції між об'єктами у 1000м. Це видно, якщо ми знаходимо співвідношення мінімальної та максимальної частоти ( $928 \setminus 868 = 1.0691244$ ), а також мінімальної та максимальної напруженості поля ( $4.586 \setminus 4.290 = 1.0689977$ ).

Наступні розрахунки будуть здійснені шляхом зміни потужності, а частота береться мінімальна та максимальна. Це дозволить отримати граничні значення діапазону напруженості поля у точці прийому.

### Розрахунок №11:

частота передачі  $f = 868 \text{ МГц}$

потужність передавача  $P_{tran} = 150 \text{ Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{tran} = 0 \text{ Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{recv} = 2 \text{ Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000\text{м}$

$$f := 868 \quad G_{\text{recv}} := 2 \quad G_{\text{tran}} := 0$$

$$P_{\text{tran}} := 150 \cdot 10^{-3} \quad R := 1000$$

$$U_{\text{recv}} := 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10 \left( \frac{G_{\text{recv}}}{10} \right) \cdot 10 \left( \frac{G_{\text{tran}}}{10} \right) \cdot P_{\text{tran}}}}{R \cdot f} = 5.617 \quad \mu\text{V}$$

Рис. 3.3.11 – дані та результати розрахунку №11

Результат  $U_{\text{recv}} = 5.617\text{мкВ}$

### Розрахунок №12:

частота передачі  $f = 928\text{МГц}$

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 150\text{Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0\text{Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2\text{Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000\text{м}$

$$f := 928 \quad G_{\text{recv}} := 2 \quad G_{\text{tran}} := 0$$

$$P_{\text{tran}} := 150 \cdot 10^{-3} \quad R := 1000$$

$$U_{\text{recv}} := 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10 \left( \frac{G_{\text{recv}}}{10} \right) \cdot 10 \left( \frac{G_{\text{tran}}}{10} \right) \cdot P_{\text{tran}}}}{R \cdot f} = 5.254 \quad \mu\text{V}$$

Рис. 3.3.12 – дані та результати розрахунку №12

Результат  $U_{\text{recv}} = 5.254\text{мкВ}$

Отже, напруженість у точці прийому змінюється у діапазоні { 5.254 : 5.617 } мкВ, в залежності від частоти, що змінюється у діапазоні { 928 : 868 } МГц відповідно при потужності передавача у 150Вт.

### Розрахунок №13:

частота передачі  $f = 868$  МГц

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 300$  Вт

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0$  Дб

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2$  Дб

Відстань між об'єктами  $R = 1000$  м

$$\begin{aligned}
 f &:= 868 & G_{\text{recv}} &:= 2 & G_{\text{tran}} &:= 0 \\
 P_{\text{tran}} &:= 300 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{\text{recv}} &:= 10^7 \cdot \sqrt{\frac{10^{\left(\frac{G_{\text{recv}}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{\text{tran}}}{10}\right)} \cdot P_{\text{tran}}}{R \cdot f}} = 7.944 \quad \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.13 – дані та результати розрахунку №13

Результат  $U_{\text{recv}} = 7.944$  мкВ

Це перший розрахунок, в якому напруженість поля перевищила еталонне значення та вважається, що БПЛА було успішно заглушено.

### Розрахунок №14:

частота передачі  $f = 928$  МГц;

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 300$  Вт

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 0\text{Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{\text{recv}} = 2\text{Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000\text{м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 928 & G_{\text{recv}} &:= 2 & G_{\text{tran}} &:= 0 \\
 P_{\text{tran}} &:= 300 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{\text{recv}} &:= 10^7 \cdot \sqrt{\frac{10^{\left(\frac{G_{\text{recv}}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{\text{tran}}}{10}\right)} \cdot P_{\text{tran}}}{R \cdot f}} = 7.43 \quad \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.14 – дані та результати розрахунку №14

Результат  $U_{\text{recv}} = 7.430\text{мкВ}$

Як і в розрахунку 13, БПЛА було теоретично заглушено через перевищення еталонного значення напруженості поля у точці прийому.

Як видно з розрахунків 11, 12, 13 та 14, збільшення потужності передавача у 2 рази збільшує напруженість поля у точці прийому лише у 1.414 разів, оскільки потужність у рівнянні стоїть під знаком кореня.

Наступні розрахунки будуть проведені із застосуванням частот 868МГц та 928МГц, потужністю 150Вт та зі змінним показником підсилення антени. Дистанція залишається незмінною – 1000м.

### Розрахунок №21:

частота передачі  $f = 868\text{МГц}$

потужність передавача  $P_{\text{tran}} = 150\text{Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{\text{tran}} = 5\text{Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{recv} = 2\text{Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000\text{м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 868 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 5 \\
 P_{tran} &:= 150 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10^{\left(\frac{G_{recv}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{tran}}{10}\right)} \cdot P_{tran}}}{R \cdot f} = 9.989 \quad \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.21 – дані та результати розрахунку №21

Результат  $U_{recv} = 9.989\text{мкВ}$

### Розрахунок №22:

частота передачі  $f = 928\text{МГц}$

потужність передавача  $P_{tran} = 150\text{Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{tran} = 5\text{Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{recv} = 2\text{Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000\text{м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 928 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 5 \\
 P_{tran} &:= 150 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10^{\left(\frac{G_{recv}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{tran}}{10}\right)} \cdot P_{tran}}}{R \cdot f} = 9.343 \quad \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.22 – дані та результати розрахунку №22

Результат  $U_{recv} = 9.343 \text{ мкВ}$

### Розрахунок №23:

частота передачі  $f = 868 \text{ МГц}$

потужність передавача  $P_{tran} = 150 \text{ Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{tran} = 10 \text{ Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{recv} = 2 \text{ Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000 \text{ м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 868 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 10 \\
 P_{tran} &:= 150 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \sqrt{\frac{10 \left( \frac{G_{recv}}{10} \right) \cdot 10 \left( \frac{G_{tran}}{10} \right) \cdot P_{tran}}{R \cdot f}} = 17.763 \text{ } \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.23 – дані та результати розрахунку №23

Результат  $U_{recv} = 17.763 \text{ мкВ}$

### Розрахунок №24:

частота передачі  $f = 928 \text{ МГц}$

потужність передавача  $P_{tran} = 150 \text{ Вт}$

Коефіцієнт підсилення передаючої антени  $G_{tran} = 10 \text{ Дб}$

Коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{recv} = 2 \text{ Дб}$

Відстань між об'єктами  $R = 1000 \text{ м}$

$$\begin{aligned}
 f &:= 928 & G_{recv} &:= 2 & G_{tran} &:= 10 \\
 P_{tran} &:= 150 \cdot 10^{-3} & R &:= 1000 \\
 U_{recv} &:= 10^7 \cdot \frac{\sqrt{10^{\left(\frac{G_{recv}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(\frac{G_{tran}}{10}\right)} \cdot P_{tran}}}{R \cdot f} = 16.615 \text{ } \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.3.24 – дані та результати розрахунку №24

Результат  $U_{recv} = 16.615 \mu\text{В}$

К видно з розрахунків 21, 22, 23 та 24, збільшення коефіцієнту підсилення антени на 5Дб збільшує напруженість поля у точці прийому у 1.778 разів.

У розрахунках 01, 02, 03, 04 та 05 продемонстровано вплив частоти роботи апаратури на напруженість поля у точці прийому.

Розрахунки 11, 12, 13 та 14 демонструють вплив зміни потужності передавача на напруженість поля у точці прийому.

Розрахунки 21, 22, 23 та 24 демонструють вплив коефіцієнту підсилення антени на напруженість поля у точці прийому. Найефективніший приріст напруженості поля спостерігається саме при підвищенні коефіцієнту підсилення антени. На напруженість поля впливають однаково як коефіцієнт передаючої антени, так і приймаючої.

Усі інші значення були розраховані та було побудовано графік залежності напруженості поля від відстані між БПЛА та апаратурою РЕБ.

На рис. 3.3.30 – рис. 3.3.34 представлено графіки залежності напруженості поля у точці прийому з урахуванням різних коефіцієнтів підсилення антени, а саме: 0Дб, 5Дб, 10Дб, 20Дб, 40Дб.

На графіках блакитним представлено еталоне значення напруженості поля, а саме 5.968мкВ. Червоним показано графік напруженості поля з відстанню. Частота, для якої побудовано графік  $f = 915\text{МГц}$ , потужність  $P_{\text{tran}} = 0.15\text{кВт}$ .



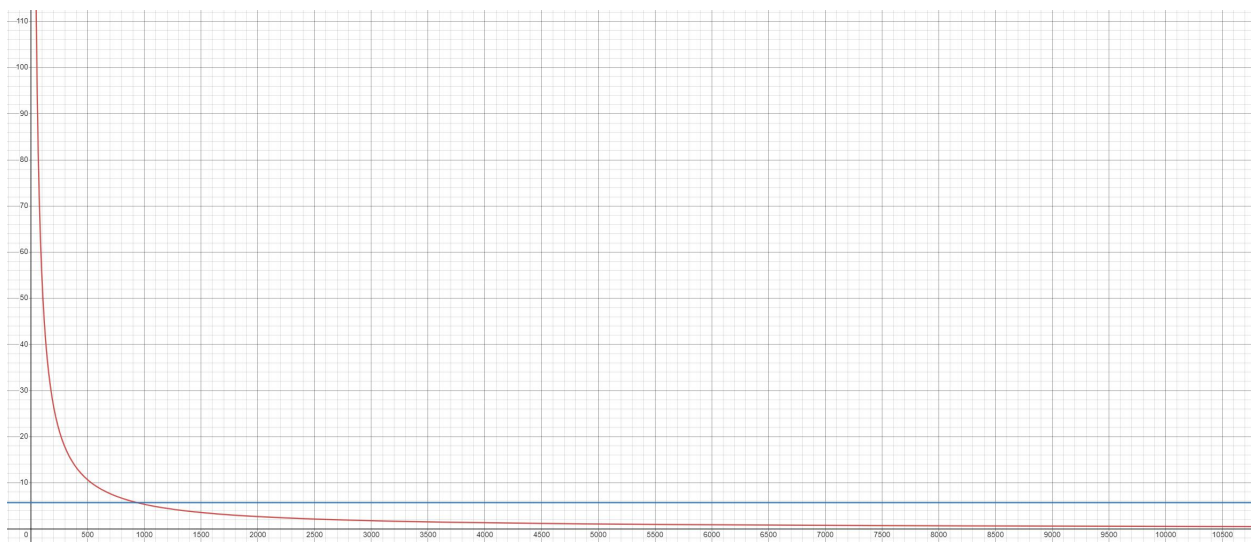


Рис.3.3.30 – Графік напруженості поля у точці прийому при коефіцієнті підсилення антени у 0дБ.

З рисунку 3.3.30 видно, що межа заглушення БПЛА лежить на відстані 950м.

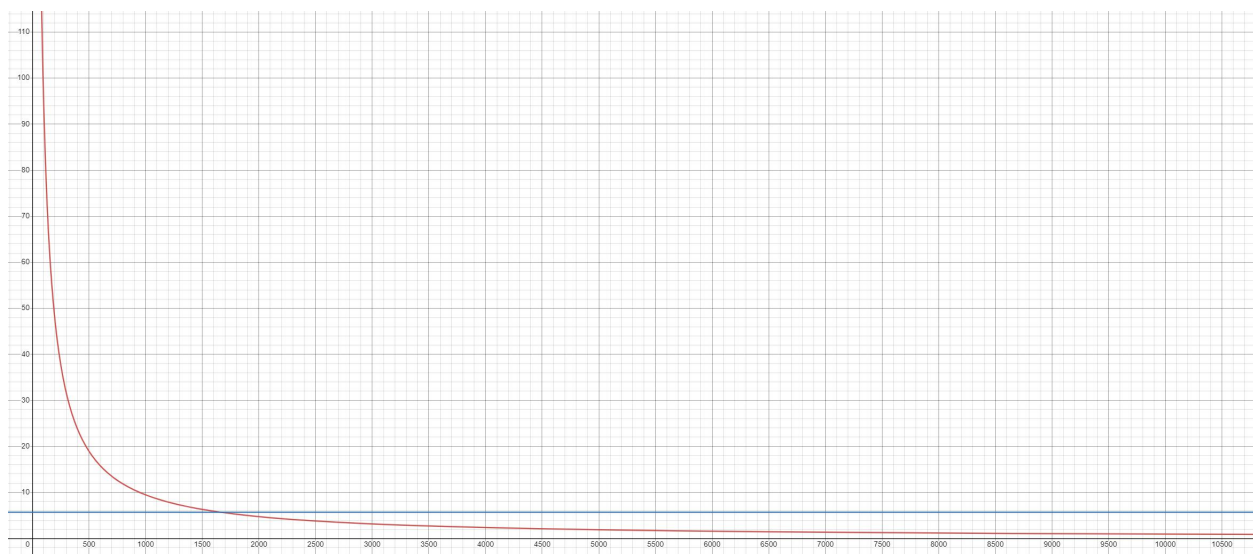


Рис.3.3.31 – Графік напруженості поля у точці прийому при коефіцієнті підсилення антени у 5дБ.

З рисунку 3.3.31 видно, що межа заглушення БПЛА лежить на відстані 1650м.

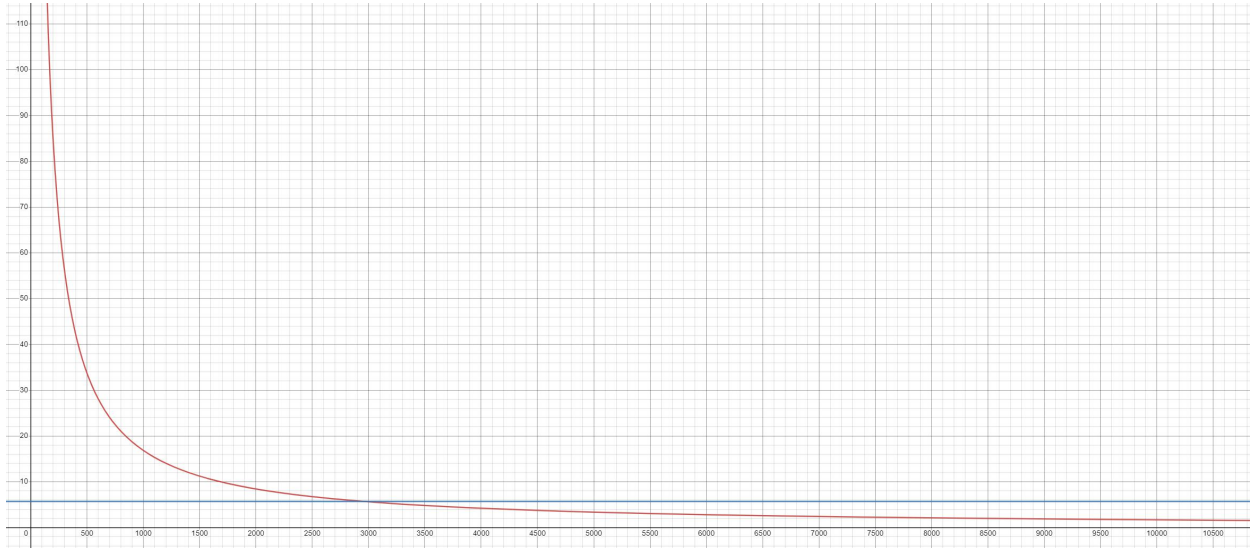


Рис.3.3.32 – Графік напруженості поля у точці прийому при коефіцієнті підсилення антени у 10Дб.

З рисунку 3.3.32 видно, що межа заглушення БПЛА лежить на відстані 3000м.

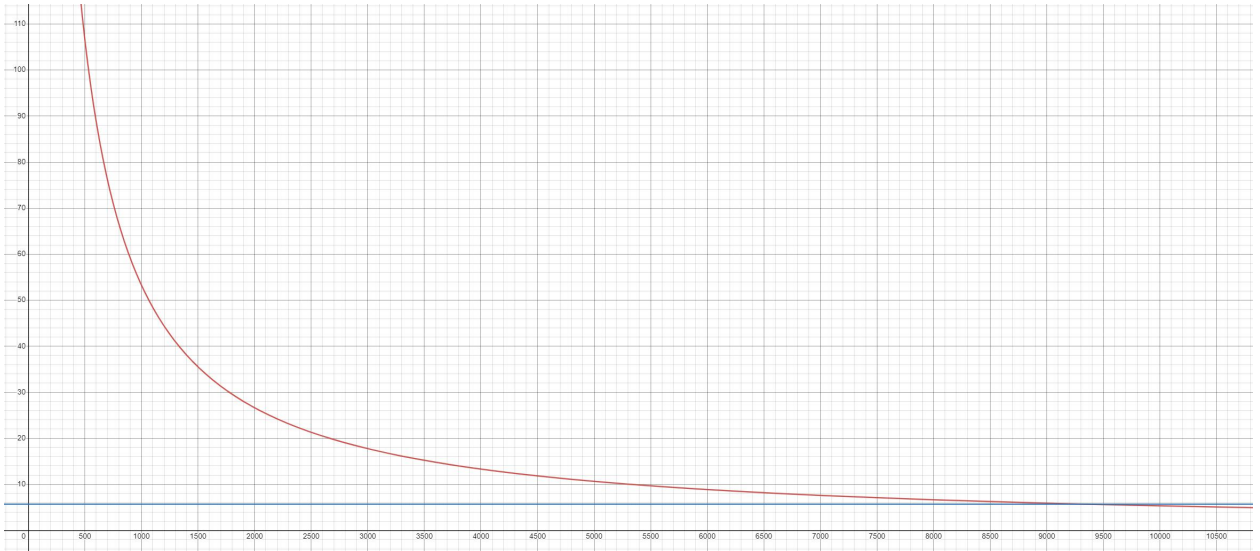


Рис.3.3.33 – Графік напруженості поля у точці прийому при коефіцієнті підсилення антени у 20Дб.

З рисунку 3.3.33 видно, що межа заглушення БПЛА лежить на відстані 9350м.

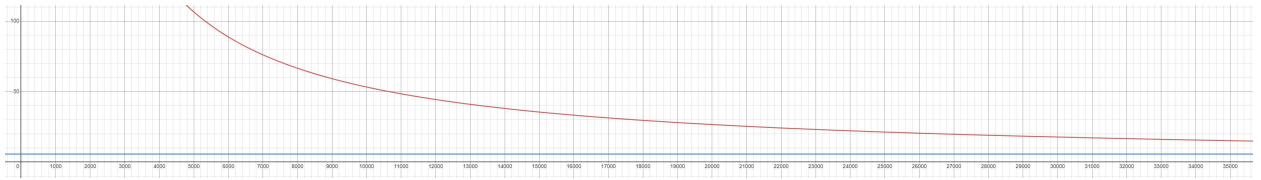


Рис.3.3.34 – Графік напруженості поля у точці прийому при коефіцієнті підсилення антени у 40Дб.

З рисунку 3.3.34 видно, що межа заглушення БПЛА лежить далеко за межами 30км, що є максимальною дальністю польоту БПЛА типу «Ланцет-1».

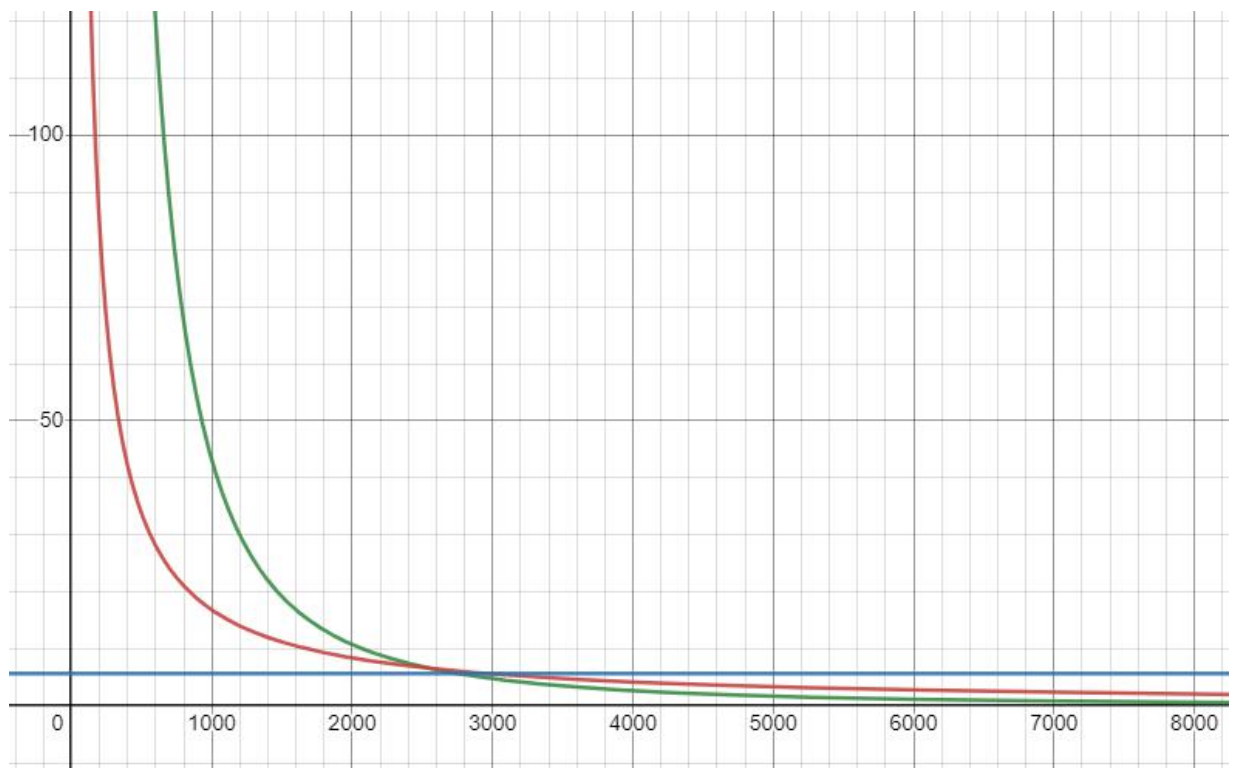


Рис.3.3.35 – Порівняння прогнозу напруженості поля у точці прийому за моделлю Введенського (зелений колір) та використаною формулою радіопередачі (червоний колір).

На рисунку 3.3.35 представлено порівняння двох графіків залежності напруженості поля у точці прийому від відстані. Потужність передавача однакова, коефіцієнти підсилення антен теж, частота 915МГц. Висота антени передавача = 10м, висота антени приймача = 250м. За даних умов спостерігається кореляція графіків на  $X = 2558$  (рис.3.1.36).

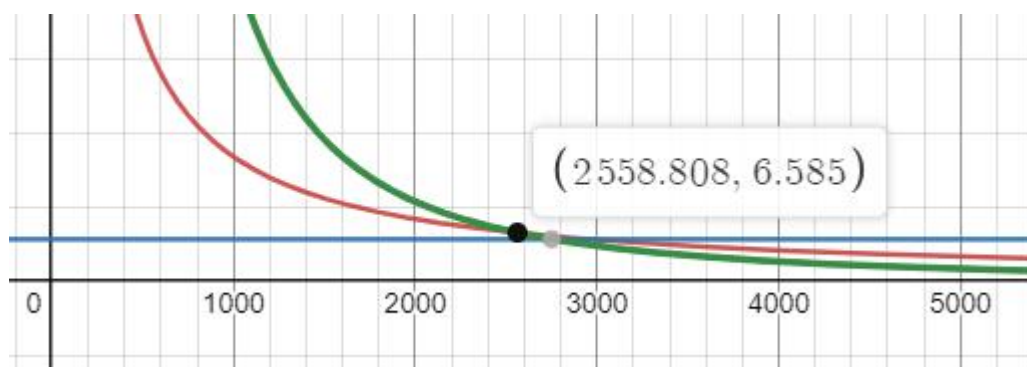


Рис.3.3.36 – точка кореляції двох методів розрахунку напруженості поля у точці прийому.

З рисунку 3.3.36 видно, що формула Введенського дає завищені результати напруженості поля на малих відстанях, до кореляції, та занижені результати після кореляції, на великих відстанях.

### 3.4 – Висновки

У розділі 3 було розглянуто характеристики радіоапаратури БПЛА противника. За приклад взято досліджений зразок ворожого БПЛА «Ланцет-1» та відкриті дані про його радіоапаратуру.

Непрямим шляхом було досліджено необхідний рівень напруженості поля у точці прийому для знешкодження БПЛА типу «Ланцет-1». Для цього літального апарату це становить, за формулою, 5.698мкВ.

Було проведено розрахунки напруженості поля за різних умов, а саме: за частот: 868МГц, 870МГц, 902МГц, 915МГц, 928МГц; за різних коефіцієнтів підсилення антени: 0Дб, 5Дб, 10Дб, 20Дб, 40Дб; за різної відстані між БПЛА та апаратурою РЕБ: 100-35000м; за різної вихідної потужності апаратури РЕБ: 100Вт, 150Вт, 300Вт.

У результаті дослідження було виявлено наступне:

1 – найефективнішим способом збільшити ефективну дальність радіоперехоплення БПЛА є покращення коефіцієнта підсилення антени.

2 – найменш ефективним способом збільшення дальності перехоплення БПЛА апаратурою РЕБ є збільшення вихідної потужності.

Продемонстрована методика визначення напруженості поля у точці прийому пропонується до використання за наступних обмежень:

1 – дистанція між апаратурою РЕБ та БПЛА не перевищує 30км, оскільки на більшій відстані значний вплив починають вносити інші явища поширення радіохвиль, які не враховані у формулі.

2 – місцевість застосування апаратури РЕБ не повинна мати серйозних перешкод на прямій видимості між антенами РЕБ та БПЛА, за умови високого коефіцієнту спрямованої дії антени. Небажаною місцевістю вважаються дуже густий ліс та щільна міська забудова.

## 4 – Висновки

У ході виконання дипломної роботи було проведено роботу по збору теоретичної інформації щодо побудови радіотрас та різних формул радіопередачі, що призначені для обчислення потужності радіосигналу у точці прийому за різних умов.

Було проведено аналіз існуючих методик розрахунку напруженості електромагнітного поля у точці прийому. Серед проаналізованих методик: квадратична формула Введенського, модель поширення Шулейкіна-ван-дер-Поля, статистична модель поширення Уолфіша-Ікегамі. Виявлено недоліки та переваги кожної з методик. Модель Введенського серед переваг має наступну характеристику: простоту розрахунку, оскільки оперує малою кількістю параметрів. Недоліком моделі є те, що її можна застосовувати лише за умов високо піднятих антен, коли висота підвісу обох антен сильно перевищує довжину хвилі. Модель Шулейкіна-ван-дер-Поля має наступну перевагу: дана модель поширення здатна описувати ковзні земні хвилі та їх поширення у просторі, на що не здатні інші моделі. Недоліком є те, що модель не можна застосовувати до будь-яких інших типів хвиль. Модель Уолфіша-Ікегамі має наступну перевагу: вона дозволяє доволі точно описувати поширення радіохвиль в умовах щільної міської забудови. Недоліками є те, що дана модель є статистичною та дозволяє отримати наближені значення напруженості поля у точці прийому, модель є комплексною та складною у розрахунках, її можна застосовувати лише для мереж стільникового зв'язку з висотою підвісу базової станції в діапазоні 50-200м та висотою підвісу приймальної станції до 2.5м.

Було обрано та удосконалено формулу ідеальної радіопередачі як просту та достатньо точну для швидкого, легкого та наближеного обчислення потужності сигналу у точці прийому на відстанях до 30км.

Сформульовано та протестовано математичний апарат для швидкого обчислення потужності радіосигналу у точці прийому.

Проведена робота дозволяє розрахувати потужність, яку необхідно випромінювати для того, щоб отримати необхідну напруженість у точці прийому та заглушити керування БПЛА, зробивши неможливим отримання команд з центру управління та обмін телеметрією.

Новизною є те, що формулу ідеальної радіопередачі з урахуванням коефіцієнтів підсилення антен було удосконалено для використання коефіцієнту підсилення у дБ. Дана формула дозволяє обчислити відстань радіоперехоплення БПЛА, що керується по радіоканалу та (або) має радіоканал для передачі телеметрії.

Для теоретичної перевірки математичного апарату було обрано БПЛА «Ланцет-1» ЗС РФ, оскільки у відкритих джерелах наявна достатньо вірогідна інформація про технічні характеристики даного апарату.

Було сформульовано обмеження для застосування сформованого математичного апарату: дальність до 30км, відсутність щільної міської забудови та інших перешкод на прямій видимості між апаратурою РЕБ та БПЛА.

## Список використаної літератури

1. Рівняння передачі Фрііса: URL: <https://www.antenna-theory.com/basics/friis.php> (дата звернення: 06.06.2023)
2. Логачова Л. М., Бугрова Т. І. Поширення Земних радіохвиль та мобільний зв'язок : навчальний посібник для студентів ВНЗ : Запоріжжя ЗНТУ, 2019, 235 с.
3. Єрохін Г.О., Чернишев О.В., Козирьов Н.Д., Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн : навчальний посібник для ВНЗ
4. Ikegami F., Takeuchi T., Yoshida S. Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio. *IEEEExplore*. 1991. DOI: 10.1109/8.76325
5. Радіоелектронна протидія безпілотним літальним апаратам «Ланцет». *Офіційний сайт сил ТрО* : URL: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/radioelektronna-protidii-bezpilotnim-litalnim-aparatam-lancet> (дата звернення 06.06.2023)
6. Іванов В.О., Габрусенко Є.І., Ільницький Л.Я., Щербина О.А. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури: Навчальний посібник. Київ НАУ, 2014, 312 с.
7. Тимочко О.І., Голубничий Д.Ю., Третяк В.Ф., Рубан І.В. Класифікація безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2007. №1(9). С. 61-67
8. Про затвердження Правил технічної експлуатації безпілотних авіаційних комплексів I класу державної авіації України: Міністерство Оборони України від 14.09.2018 р. №1062/32514. 2018 р.
9. Книш Б.П., Кулик Я. А., Барабан М. В., Рубан І.В. Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 3. С. 246-252
10. Іванов В.О., Габрусенко Є.І., Задорожний О.С. та інші. Електромагнітна сумісність електронних пристроїв та систем: Лабораторний практикум. Київ НАУ, 2019, 60 с.