

В. В. Павліков, Г. С. Черепнін

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

В. В. Павліков, Г. С. Черепнін

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ

Навчальний посібник до курсових робіт

Харків «ХАІ» 2023

УДК 621.396.96.083.01(075.8)

П12

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. М. В. Руженцев,
канд. фіз.-мат. наук О. В. Махней

Павліков, В. В.

П12 Інформаційно-вимірювальні радіотехнічні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. до курсових робіт / В. В. Павліков, Г. С. Черепнін. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2023. – 44 с.

Розглянуто й розкрито поняття радіолокації, ефективної площі розсіювання різних поверхонь, принцип роботи РЛС бічного огляду, а також наведено приклади розрахунку ЕПР простих цілей. Виконано моделювання ЕПР підстильної поверхні в середовищі MATLAB, виходячи з математичних моделей ПЕПР з вихідними даними за варіантами.

Для студентів вищих навчальних закладів, що вивчають курси «Інформаційно-вимірювальні радіотехнічні системи» та «Прикладна математика». Може бути корисним для спеціалістів галузі телекомунікації.

Іл. 22. Табл. 2. Бібліогр.: 7 назв

УДК 621.396.96.083.01(075.8)

© Павліков В. В., Черепнін Г. С., 2023

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2023

ВСТУП

Розвиток радіолокації став важливою частиною технічної революції ХХ століття. Військову техніку із використанням принципів радіолокації вперше було створено перед Другою світовою війною. З цього часу спостерігається швидкий і безперервний прогрес у цій галузі.

Радіолокація розширює можливості людини визначати положення об'єктів у просторі з використанням відбиття радіохвиль від них. Перевагою радіолокаційних засобів є всепогодність застосування, незалежність від часу доби й пори року, велика дальність дії.

Основна ідея радіолокації полягає в такому: електромагнітні хвилі поширюються через атмосферу за певними законами з відомою швидкістю, що приблизно дорівнює швидкості світла у вакуумі. Будь-які перешкоди або зміни характеристик середовища на шляху поширення радіохвиль приводять до відбиття, що стає джерелом інформації про властивості таких перешкод або змін. Вимірювання часу запізнення відбитого сигналу відносно випроміненого дає змогу отримати дані про положення перешкоди.

Сукупність відомостей, що реєструються засобами радіолокації, називають радіолокаційною інформацією. Інформація передається на командні пункти, лічильно-розв'язувальні прилади та виконавчі пристрої. Основною функцією радіолокації є спостереження (виявлення цілей, вимірювання координат і параметрів руху), а розрізнення об'єктів, класифікація та передавання отриманої радіолокаційної інформації за призначенням належать до додаткових функцій радіолокаційних систем (РЛС).

Інформацію про швидкість цілей закладено в доплерівському зсуві частоти між випромінюваними й прийнятими коливаннями, а кутові координати віддалених цілей – у порівнянні характеристик відбитих сигналів з діаграмами спрямованості (ДС) передавальної та приймальної антен. Нарешті, відомості про розміри, форму й відбивну здатність цілі можна отримати шляхом порівняння форми обвідної відбитих і випромінених коливань.

Практичне застосування радіолокації пов'язано з військовою сферою. Сюди можна віднести огляд простору й виявлення літальних апаратів (ЛА) противника та наземних рухомих об'єктів, забезпечення даних для керування гарматним вогнем, а також польотом ракет. Крім того, радіолокаційні засоби широко використовуються в навігації літаків і кораблів, особливо в нічний час та в умовах туману [1].

1 ЕФЕКТИВНА ПОВЕРХНЯ РОЗСІЮВАННЯ

Вирішення більшості завдань радіолокації та дистанційного зондування є можливим завдяки властивості відбиття радіохвиль цілями – об'єктами дослідження. При такому відбитті інформація про ціль «накладається» на електромагнітні коливання і, отже, на параметри (наприклад, амплітуду, частоту, фазу) прийнятих сигналів. Є завдання, коли ціль майже не відбиває сигнал, а пропускає його крізь себе. До таких об'єктів дослідження належить, наприклад, атмосфера. Незважаючи на різноманіття завдань, характерним для радіотехнічних систем вимірального типу є те, що в процесі оброблення сигналів, які «взаємодіяли» з цілями, можна виміряти їх змінені параметри та характеристики й отримати інформацію про ціль. Це можуть бути, наприклад, енергетичні параметри, що містять інформацію про відбивну здатність цілі, а у випадку, коли ціль є «прозорою», – про її пропускну здатність [2].

Далі розглянемо саме параметр, який характеризує відбивну здатність об'єктів дослідження, адже він є важливим як для вирішення завдань радіолокації (виявлення цілей та оцінювання їх координат і параметрів руху), так і для дистанційного зондування, зокрема для формування радіозображень підстильних поверхонь. Таким параметром є ефективна поверхня розсіювання (ЕПР) [1] радіохвиль, яка дає змогу кількісно оцінити потужність (енергію) відбитого сигналу.

Спочатку розглянемо деякі класи цілей. Довільна класифікація передбачає формулювання ознак, за якими виконується класифікація. Таких ознак можна ввести велику кількість, але зазвичай застосовуються відносний розмір та особливість структури цілі.

За відносним розміром цілі поділяються на точкові й розподілені. Точкові цілі – це цілі, лінійні розміри яких є набагато меншими від інтервалів розрізнення за координатами, що вимірюються радіотехнічними системами. Такі цілі повністю розміщуються в межах імпульсного (розрізнувального) об'єму радіотехнічної системи, тобто об'єму, обмеженого фігурою, яка характеризується розрізненням за дальністю ΔD , азимутом $\Delta\theta$ і кутом місця $\Delta\varphi$. Розподілені цілі – це цілі, розміри яких перевищують розміри імпульсного об'єму.

Розрізнувальною здатністю за дальністю ΔD називають таку мінімальну відстань між цілями, які характеризуються однаковими значеннями азимуту й кута місця, при якій ці цілі ще спостерігаються на виході радіотехнічної системи окремо.

Розрізнявальна здатність за кутом $\Delta\theta$ або $\Delta\varphi$ – це таке мінімальне значення кута, при якому цілі, розміщені на однаковій дальності, окремо спостерігаються на виході радіотехнічної системи [2].

Попередні означення можна узагальнити так: розрізнявальна здатність – це мінімально можливе зміщення цілі відносно іншої цілі за відповідною координатою при однакових (не розрізнявальних) значеннях усіх інших координат, при якому ще можливе окреме їх спостереження.

За особливістю структури цілі поділяють на прості і складні. Прості цілі мають форму простих геометричних фігур, виготовлених з однорідних матеріалів. Це шар, циліндр, кутниковий відбивач, еліпсоїд, вібратор та ін. Складні цілі – цілі, що складаються з окремих частин, які формують відбиті сигнали незалежно від інших елементів цілі. У цьому випадку прийнятий сигнал являє собою суперпозицію сигналів, відбитих окремими елементами цілі. Форма сигналу значною мірою залежатиме від відносного положення цілі й радіотехнічної системи. Реальні цілі (літаки, кораблі, автотранспорт) є складними. Тепер, коли деякі класифікації цілей визначено, можна переходити до розгляду ЕПР, яку часто позначають символом σ .

Ефективна площа розсіювання уводиться для спрощення розрахунку сподіваної потужності сигналу, відбитого ціллю. ЕПР – це площа деякої фіктивної плоскої поверхні, яка є ідеальним ізотропним перевідбивачем, розташовується нормально до напрямку падаючої плоскої хвилі від РЛС і за умови розміщення в точці розташування цілі створює в місці розташування антени РЛС таку саму густину потоку потужності, що й реальна ціль [3].

Розберемо більш детально це означення. По-перше, ідеться про *фіктивну плоску поверхню*, тобто замість реальної цілі розглядається деяка неіснуюча в природі поверхня. По-друге, *розташування нормально до напрямку падаючої плоскої хвилі* виключає зменшення геометричної площі цієї фіктивної поверхні внаслідок опромінення під кутом, відмінним від нормального. По-третє, коли кажуть «*плоска хвиля*», то йдеться про розміщення цілі в дальній зоні (зоні Фраунгофера), де сферичністю фазового фронту хвилі в межах цієї фіктивної поверхні можна знехтувати. По-четверте, слова про те, що поверхня «*є ідеальним ізотропним відбивачем*», означають, що енергія падаючої хвилі не поглинається цією поверхнею, а повністю перевідбивається у всіх напрямках (ізотропно) у межах сфери з однаковою інтенсивністю. При цьому ця фіктивна поверхня забезпечує таку ж густину потоку потужності в межах апертури приймальної антени, як і реальна ціль. Звідси випливає, що ЕПР є ідеалізацією, яка дає змогу суттєво спростити розрахунки сподіваної потужності сигналів шляхом заміни реальних складних цілей їх простими моделями, які описуються всього одним числом – значенням

ЕПР. Геометрію спостереження РЛС для пояснення поняття «ЕПР» показано на рисунку 1.1.

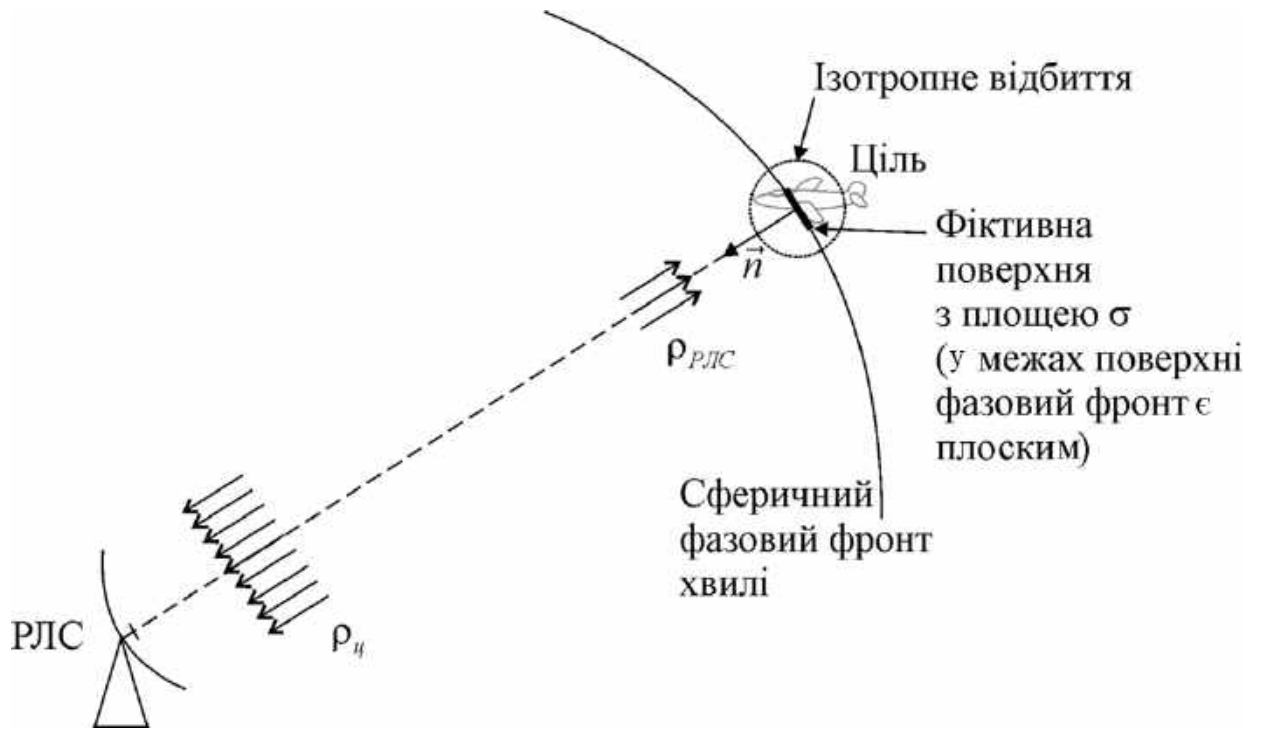


Рисунок 1.1 – Умови формування поняття «ЕПР»: $\rho_{ц}$ – густина потоку потужності, яку створює ціль біля РЛС (у межах апертури приймальної антени); \vec{n} – вектор нормалі до фазового фронту падаючої хвилі

Використання ЕПР дає змогу порівнювати властивості перевідбиття сигналів різними цілями. При цьому можна не розглядати конкретні форми діаграм перевідбиття, матеріал, геометрію та розміри цілей, що порівнюються.

Діаграма перевідбиття (діаграма зворотного розсіювання) – це залежність ЕПР від кута спостереження реальних цілей. Реальні (складні) цілі, що спостерігаються з різних напрямків, будуть створювати різну густина потоку потужності, яка може значно змінюватися. Приклад такої усередненої залежності ЕПР від кута спостереження наведено на рисунку 1.2.

Реальна ціль замінюється фіктивним ізотропним відбивачем, який перевідбиває сигнал, потужність якого визначається виразом

$$P_{ц} = \rho_{РЛС} \sigma, \quad (1.1)$$

де $\rho_{РЛС}$ – густина потоку потужності, яку створює РЛС біля цілі, Вт/м².

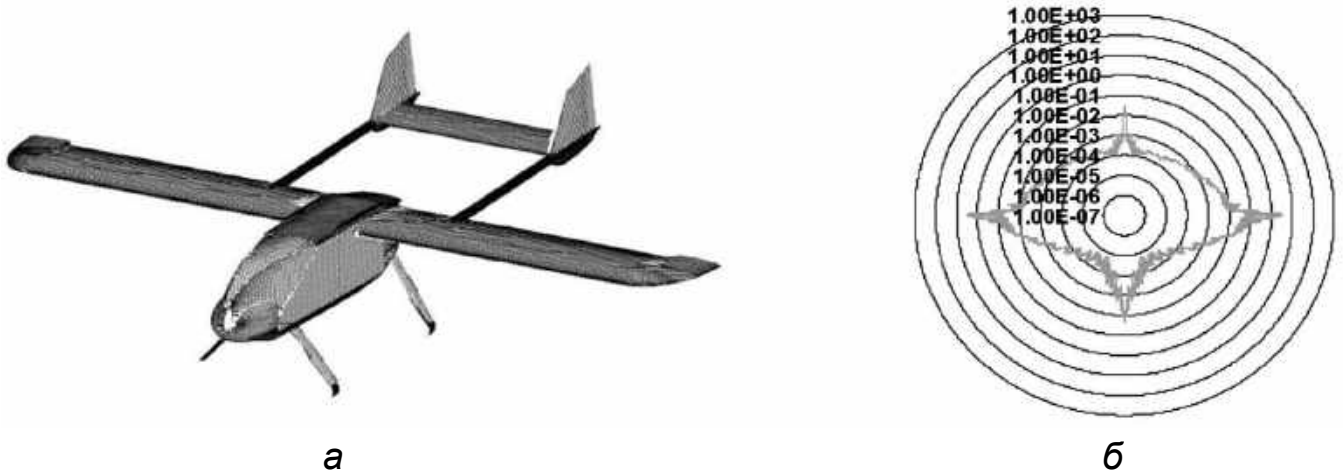


Рисунок 1.2 – Безпілотний літальний апарат (а) та його усереднена ЕПР (діаграма перевідбиття) як функція кута спостереження для частоти 10 ГГц (б) (вимірювання ЕПР проводилися в безлунній камері Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», якому належить право на їх публікацію та розповсюдження)

З формули (1.1) випливає, що ЕПР – це коефіцієнт, який зв’язує густину потоку потужності опромінення поверхні σ і потужність сигналу, який перевідбивається поверхнею (ураховується ідеалізація, яка полягає в тому, що втрат потужності сигналу при перевідбитті немає). Цей сигнал перевідбивається ізотропно, тобто його потужність рівномірно розподіляється по сфері (площа сфери $4\pi D^2$) і створює густину потоку потужності ρ_u у межах апертури антени РЛС. Математично це формалізується так:

$$\rho_u = \frac{P_u}{4\pi D^2} = \frac{\rho_{РЛС}\sigma}{4\pi D^2}. \quad (1.2)$$

Потужність прийнятого сигналу на виході антени, який надходить до РЛС і далі обробляється відповідно до заданого алгоритму, є пропорційною ефективній площі S_{ef} цієї антени:

$$P_{пр} = \rho_u S_{ef} = \frac{P_u S_{ef}}{4\pi D^2} = \frac{\rho_{РЛС} S_{ef}}{4\pi D^2} \sigma. \quad (1.3)$$

З аналізу (1.3) випливає, що потужність прийнятого сигналу є пропорційною ЕПР цілі [4].

У прийнятому сигналі інформація про ЕПР міститься в амплітуді, яка є пропорційною кореню квадратному з потужності:

$$U_{np} \sim \sqrt{P_{np}} \sim \sqrt{\sigma}, \quad (1.4)$$

а

$$U_{np}^2 \sim P_{np} \sim \sigma. \quad (1.5)$$

Іноді розрахунки виконують через напруженість електричного поля. Для такого випадку формулу (1.2) можна переписати у вигляді

$$E_y^2 = \frac{E_{PLC}^2 \sigma}{4\pi D^2}. \quad (1.6)$$

1.1 Плоска пластина

Як приклад простої цілі розглянемо плоску металеву пластину [1] з геометричною площею S . Уважаємо, що пластина розміщена нормально до напрямку на РЛС. Потрібно розрахувати ЕПР пластини за умови, що втрат потужності сигналу в пластині немає.

Потужність сигналу, який падає на пластину, знайдемо як добуток густини потоку потужності опромінення цієї пластини на її площу:

$$P_{опр} = \rho_{РЛС} S. \quad (1.7)$$

Відповідно до принципу Гюйгенса – Френеля розглянемо пластину як антену, яка перевідбиває всю потужність $P_{опр}$ (втрат немає). Тоді в напрямку на ціль потужність опромінення збільшиться на величину, яка визначається коефіцієнтом підсилення пластини $G_{пл}$ (коефіцієнтом спрямованої дії плоскої апертури):

$$G_{пл} = \frac{4\pi}{\lambda^2} S, \quad (1.8)$$

де λ – довжина хвилі сигналу, м.

Припустимо, що ефективна площа еквівалентної антени дорівнює геометричній площі металевієї пластини S . Тоді густина потоку потужності в апертурі антени РЛС (яка створюється металевією пластинією) визначається формулою [5]

$$\rho_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{опр}} G_{\text{нл}}}{4\pi D^2} = \frac{\rho_{\text{РЛС}} S G_{\text{нл}}}{4\pi D^2}, \quad (1.9)$$

де D – відстань між РЛС і металевією пластинією, м.

Фізичний сенс виразу (1.9) полягає в тому, що потужність $P_{\text{опр}}$ підсилюється у $G_{\text{нл}}$ разів і рівномірно розподіляється по поверхні сфери радіусом D .

Водночас із (1.1) також впливає, що потужність, розсіяна ціллю з ЕПР σ , визначається формулою

$$P_{\text{ц}} = \rho_{\text{РЛС}} \sigma, \quad (1.10)$$

а густина потоку потужності відбитого сигналу в межах апертури антени РЛС при рівномірному перевідбитті визначається формулою (1.2), тобто

$$\rho_{\text{ц}} = \frac{\rho_{\text{РЛС}} \sigma}{4\pi D^2}. \quad (1.11)$$

Прирівняємо праві частини (1.9) і (1.11) і отримаємо вираз

$$\frac{\rho_{\text{РЛС}} S G_{\text{нл}}}{4\pi D^2} = \frac{\rho_{\text{РЛС}} \sigma}{4\pi D^2}. \quad (1.12)$$

Звідси ЕПР металевієї пластини без втрат визначається так:

$$\sigma = S G_{\text{нл}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} S^2. \quad (1.13)$$

З формули (1.13) впливає, що ЕПР нормально розміщеної металевієї пластини без втрат потужності в $G_{\text{нл}}$ разів є більшою від її геометричній площі.

1.2 Металева куля

Зазвичай для визначення ЕПР кулі як простої цілі застосовують один із методів [2]:

- метод геометричної оптики;
- метод хвильової оптики.

Метод геометричної оптики має вагоме обмеження – довжина хвилі λ РЛС має бути набагато меншою від радіуса r кулі: $\lambda \ll r$. Цього достатньо для більшості задач радіолокації, коли об'єкти значно більші за довжину хвилі.

Метод хвильової оптики є універсальним і дає змогу визначити ЕПР при довільному співвідношенні між λ і r . Тому якісно опишемо процес відбиття хвилі кулею з використанням цього методу [5].

Згідно з постулатом Гюйгенса кожна точка, до якої доходить хвиля, розглядається як центр вторинної сферичної хвилі. Цей постулат, який доповнив О. Ж. Френель фазовими співвідношеннями, називають принципом Гюйгенса – Френеля. Застосуємо його до визначення закону відбиття радіолокаційного сигналу від кулі. Skorистаємося для цього геометричними поясненнями, показаними на рисунку 1.3.

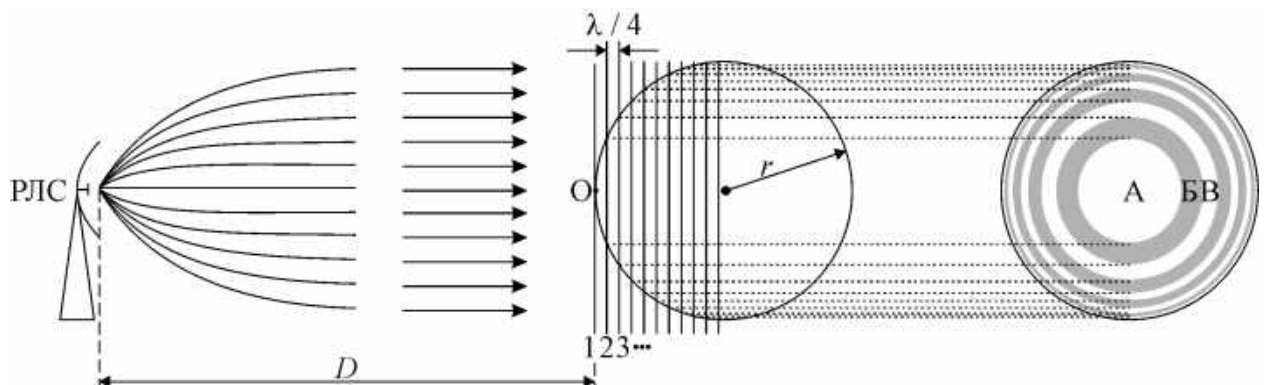


Рисунок 1.3 – До визначення ЕПР кулі радіусом r

Нехай металева куля знаходиться в дальній зоні (зоні Фраунгофера) відносно РЛС (це умова формування плоского фронту хвилі в межах кулі). Плоска хвиля завдовжки λ опромінює кулю. Побудуємо дотичну площину 1 у точці О, першій, до якої дотикається плоский фронт хвилі. Ця площина є перпендикулярною до напрямку поширення хвилі. Потім з кроком $\lambda/4$ побудуємо площини 2, 3, ..., паралельні до площини 1. Ці площини поділяють кулю на пояси з однаковою висотою $\lambda/4$, унаслідок чого утворюються кільцеві

поверхні А, Б, В тощо. Площі цих кільцевих поверхонь є однаковими й визначаються формулою $S_{к.н} = \frac{\pi r \lambda}{2}$ [6].

Відповідно до принципу Гюйгенса – Френеля усі ці зони відбивають сигнал у напрямку РЛС. Але сигнали, відбиті двома сусідніми зонами, надходять до РЛС у протифазі. Покажемо це. Позначимо відстань, яку проходять сигнали від РЛС до точки О, через D . Відстань до межі січної 2 відповідно буде $D + \lambda / 4$. Повна відстань, яку пройдуть хвилі від РЛС до кулі і в зворотному напрямку, відповідно будуть $2D$ і $2D + \lambda / 2$, а різниця між ними становитиме $\lambda / 2$, тобто хвилі, відбиті сусідніми зонами кулі, надходять до РЛС у протифазі. Зони вторинного випромінювання, які випромінюють протифазні сигнали, називають **зонами Френеля**. На рисунку 1.3 ці зони зображено на правій кулі поясами білого й сірого кольорів з позначками А, Б, В тощо.

Незважаючи на те, що хвилі надходять від сусідніх зон у протифазі, їх повна взаємна компенсація не відбувається, оскільки густина потоку потужності в межах апертури антени РЛС є пропорційною не площам $S_{к.н,i}$ ($i = A, B, B\dots$) поясів кулі, а їх проєкціям на площину, паралельну до апертури антени в місці розміщення РЛС. Площі цих проєкцій (ефективні площі) зменшуються при зміщенні зон до краю сфери [6].

Проведений аналіз дає змогу стверджувати, що відбитий сигнал формується тільки першою зоною Френеля. Цю поверхню називають **блискучою точкою цілі**. Фазовий фронт відбитого сигналу є таким самим, як і фронт сигналу точкового джерела (сферичний).

Складні цілі характеризуються кількома блискучими точками.

Наведені пояснення дають уявлення про процес відбиття хвилі кулею. Точний аналітичний вираз для визначення ЕПР при довільних довжині хвилі й радіусі кулі отримати досить складно. Тому скористаємося відомими результатами [2]. На рисунку 1.4 показано залежність ЕПР, нормованої на величину πr^2 і яка дорівнює ЕПР кулі, від відношення $\frac{r}{\lambda}$ при виконанні умови $\lambda \gg r$. На рисунку 1.4 виокремлено три характерні зони: Релея, резонансного розсіювання й оптичну.

Для металевої кулі радіусом r ($r \gg \lambda$) ЕПР визначається методами геометричної оптики й дорівнює площі центрального перерізу:

$$\sigma = \pi r^2. \quad (1.14)$$

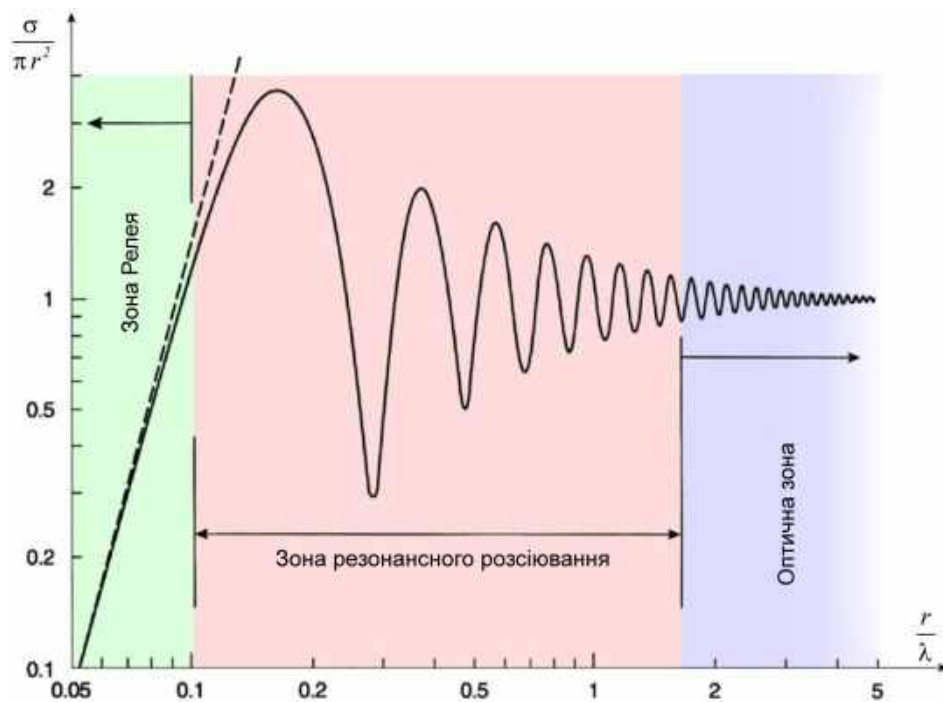


Рисунок 1.4 – Залежність нормованої ЕПР металевої кулі $\frac{\sigma}{\pi r^2}$ від $\frac{r}{\lambda}$ (логарифмічний масштаб по обох осях)

З аналізу (1.14) випливає, що в оптичній зоні ЕПР кулі не залежить від довжини хвилі й визначається тільки її радіусом [1].

Металеву кулю часто використовують як еталон при визначенні ЕПР реальних цілей. Тому часто ЕПР цілі під час розрахунків замінюють площею поперечного перерізу металевої кулі, еквівалентною цілі з перевідбиття хвиль.

1.3 Кутникові відбивачі

Іноді необхідно мати велике значення ЕПР у широкому діапазоні кутів опромінення, наприклад, для високої радіолокаційної контрастності. Для цього використовують кутникові відбивачі (рисунок 1.5).

Зазвичай кутникові відбивачі виконують з трикутних або чотирикутних пластин. ЕПР кутникового відбивача з трикутними пластинами визначається формулою

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{\lambda^2 3}, \quad (1.15)$$

а з чотирикутними – формулою

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} 3a^4, \quad (1.16)$$

де a – довжина грані ребра, м.

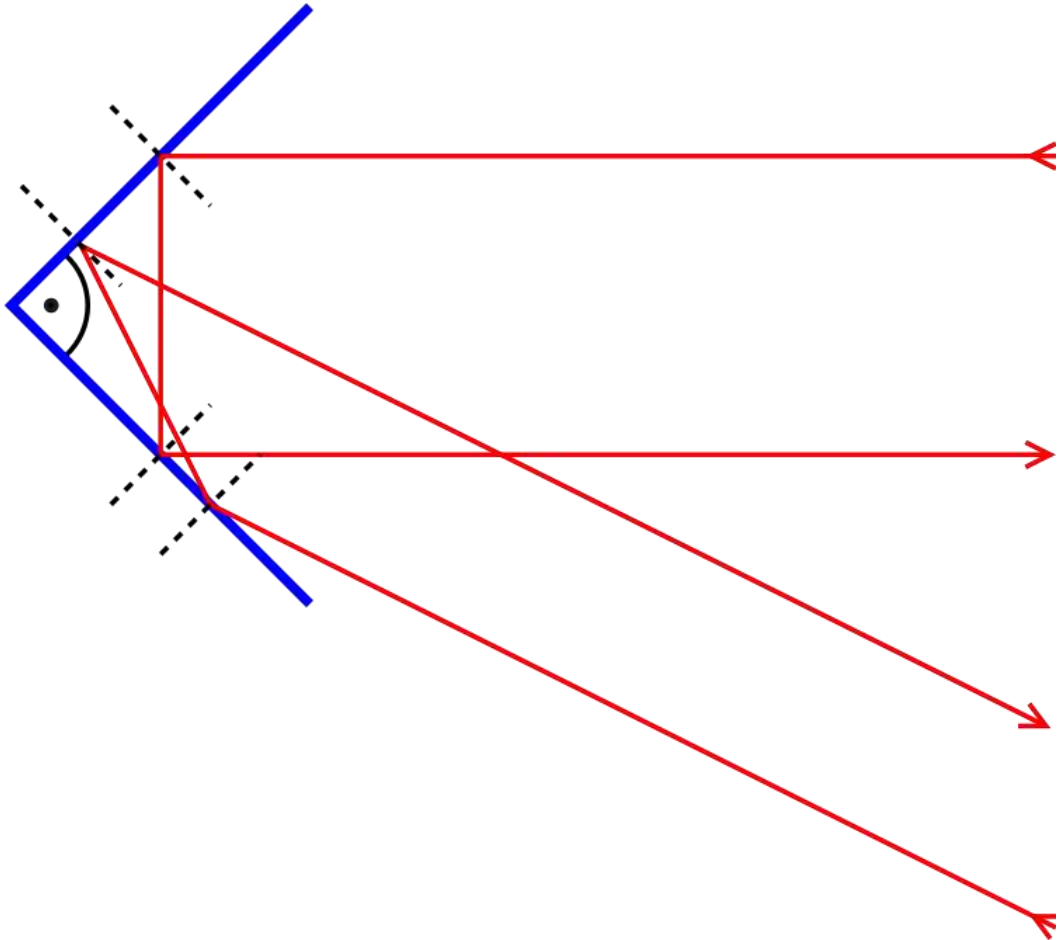


Рисунок 1.5 – Принцип дії кутникового відбивача

Як випливає з аналізу рисунка 1.5, напрямок відбиття радіохвиль збігається з напрямком падіння радіохвиль, в широкому діапазоні кутів (до 45° відносно осі кутникового відбивача) [3].

У деяких випадках використовують кутникові відбивачі, об'єднані по 4, 8 штук з метою збільшення сектора «дзеркального» зворотного відбиття хвиль.

Часто ЕПР указують у відносних одиницях, наприклад, у децибелах до метрів квадратних. Наприклад, $\sigma = 200 \text{ м}^2$ відповідає 23 дБ :

$$10 \log_{10} \left(\frac{200}{1} \right) = 10 (\log_{10} 2 + \log_{10} 100) = 10 (0,3 + 2) = 23 \text{ дБ}.$$

2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

Метою роботи є набуття практичних навичок розрахунку ЕПР за допомогою РЛС бічного огляду. Відомо таке:

- на авіаційному носії розміщено РЛС бокового огляду, носій рухається по прямолінійній траєкторії;
- повністю задану геометрію задачі зображено на рисунку 2.1. Усі параметри, що визначають геометрію задачі, наведено в таблиці 2.1;
- розмір L уздовж фюзеляжної антени й довжину хвилі наведено в таблиці 2.1.

На рисунку 2.1 показано геометрію задачі (геометрію руху ЛА та її проекції) і виділено i -ту смугу дальності. Під час розрахунку розрізнявальної площі достатньо обмежитися її прямокутною апроксимацією (див. рисунок 2.1, е) [7].

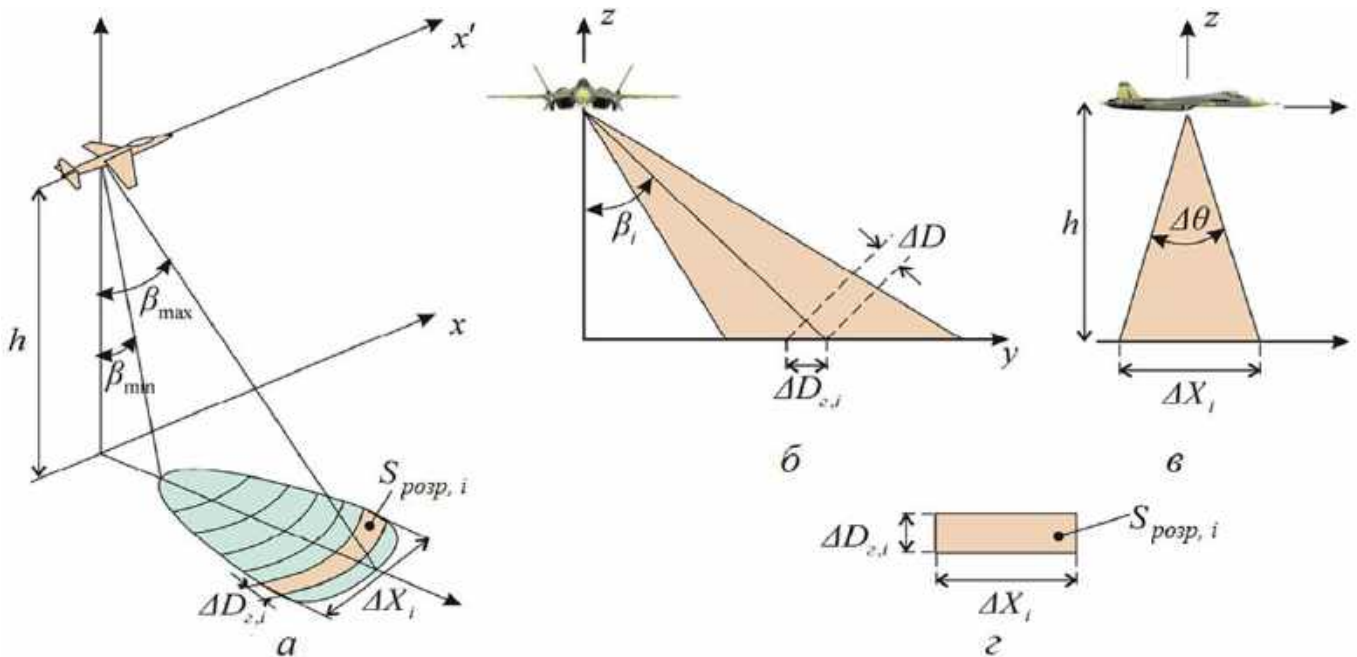


Рисунок 2.1 – Геометрія задачі

Задано три моделі ЕПР для однієї і тієї ж довжини хвилі. Положення різних ділянок підстильних поверхонь студенти вибирають самостійно.

Необхідно змоделювати значення сумарної ЕПР підстильної поверхні, для чого слід виконати таке:

1. Знайти роздільні здатності за горизонтальною дальністю для заданого сектора огляду за кутом місця.

Довжина імпульсу зв'язана з роздільною здатністю за дальністю формулою

$$\Delta D = \frac{c\tau_i}{2}$$

У цій роботі необхідно підібрати значення довжини імпульсу τ_i залежно від вибраних розмірів маски підстильної поверхні. Початковим значенням можна вибрати $\tau_i = 20$ нс, а потім підібрати значення τ_i залежно від обчислювальної потужності комп'ютера. Оптимальним розміром маски підстильної поверхні є зображення 700x700. Кількість значень кутів від β_{\min} до β_{\max} має дорівнювати кількості рядків (m) зображення-маски (рисунок 2.2).

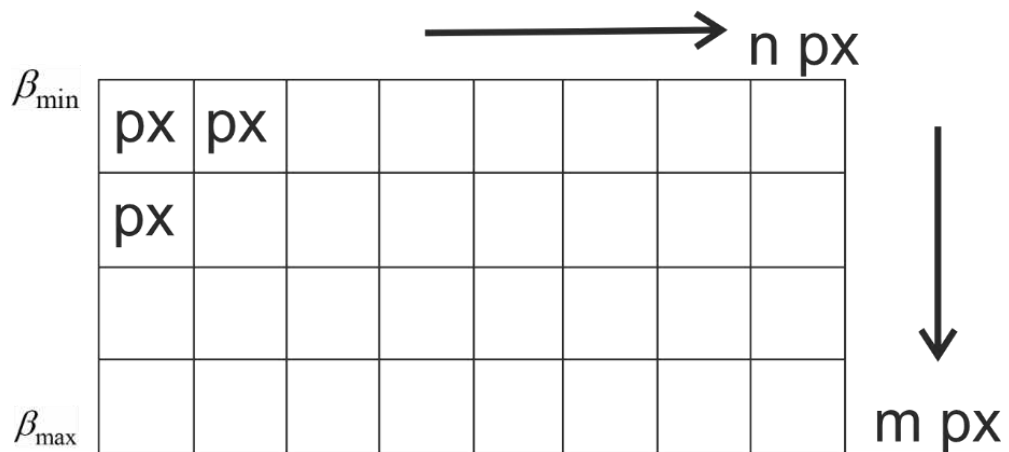


Рисунок 2.2 – Визначення розмірів маски підстильної поверхні

2. Знайти розрізнявальні здатності за азимутом і перерахувати їх до поверхні.

3. Знайти розрізнявальні площі $S_{розр}$ (див. рисунок 2.1, а) як функції кутів місця або горизонтальних дальностей.

4. За відомими графіками створити наближені математичні моделі питомих ЕПР як функцій кута спостереження.

5. Створити матрицю питомих ЕПР для трьох різних типів підстильної поверхні (рядки матриці відповідають зміні питомої ЕПР залежно від кута місця, а стовпці – зміні ЕПР унаслідок руху ЛА).

6. Розрахувати ЕПР як функцію кутів місця або горизонтальних дальностей.

7. Урахувати випадковий характер питомої ЕПР, за середніми значеннями, отриманими у п. 4, сформувати випадкові числа, розподілені за експоненціальним законом.

8. Урахувати ослаблення сигналу у вільному просторі.

9. Урахувати спрямовувальні властивості антени в кутомісній площині (необхідно скористатися реальною ДС бортової РЛС «Северянин-М», рисунок 2.3).

На рисунку 2.3 зображено ДС у кутомісній площині бортової РЛС «Северянин-М».

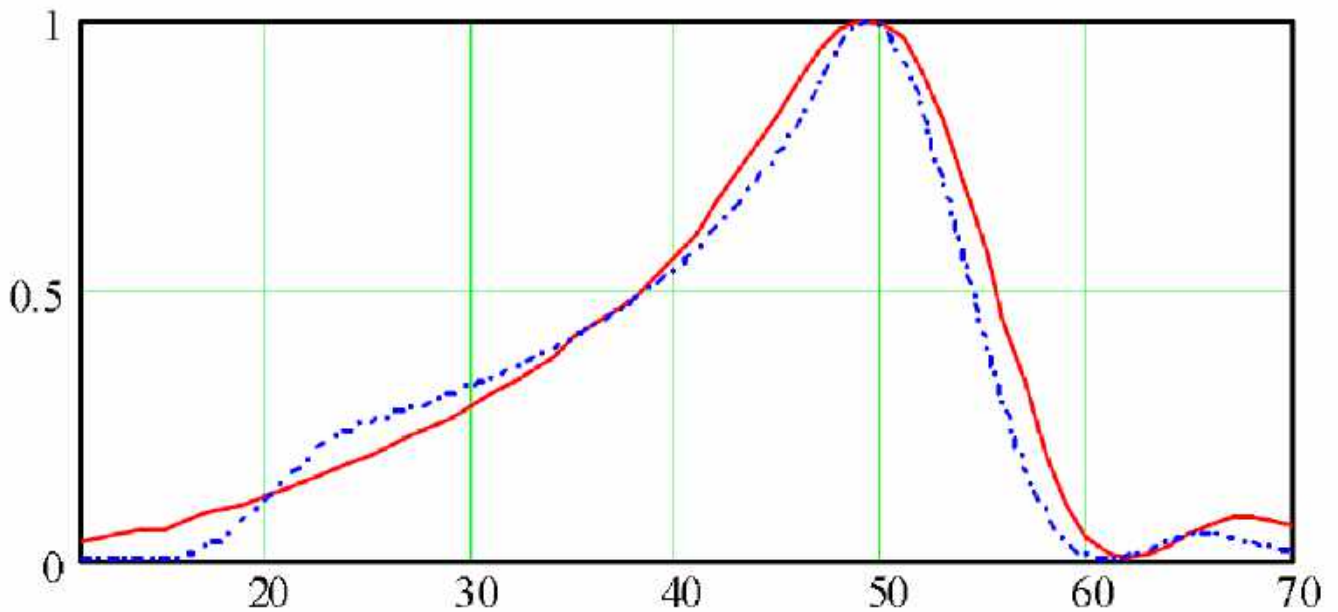


Рисунок 2.3 – Нормована ДС антени за потужністю (потрібна – штрихпунктирна лінія, практично реалізована – суцільна)

Для виконання роботи можна застосувати апроксимацію питомих ЕПР таких поверхонь:

- модель питомої ЕПР вологого снігу

$$\sigma_{\text{вол. сн}} \approx -0,12\beta - 14 \text{ дБ}; \quad (2.1)$$

- модель питомої ЕПР зрілої пшениці

$$\sigma_{\text{зр. пш}} \approx -0,12\beta - 17 \text{ дБ}; \quad (2.2)$$

- модель питомої ЕПР моря при швидкості вітру 2,5 м/с

$$\sigma_{\text{м. 2,5 м/с}} \approx -0,32\beta - 7 \text{ дБ}, \quad (2.3)$$

де β – кут падіння (візування).

У таблиці 2.1 наведено основні величини для геометрії задачі за варіантами.

Таблиця 2.1 – Дані за варіантами

Номер варіанта	h, км	β_{\min} , град	β_{\max} , град	L, м
1	10	25	48	3
2	14	28	44	2
3	11,5	27	45	2,5
4	9	28	46	3,1
5	15	25	48	2
6	13	24	46	2,5
7	12	24	47	1,8
8	12,5	25	47	1,9
9	14,3	30	48	2,4
10	13,7	28	44	2,3
11	8,5	25	42	2,9
12	7,8	30	43	3,5
13	14	27	47	1,9
14	13	23	45	2,8
15	13,3	25	48	2,9
16	14,5	28	47	3

У Додатку А далі показано приклад виконання курсової роботи, яка складається зі вступу, теоретичного розділу, моделювання в середовищі Matlab, а також лістингу коду.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Белоцерковский, Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства / Г. Б. Белоцерковский. – М. : Сов. радио, 1975. – 336 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория : справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
3. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы : учеб. для ВУЗов / П. А. Бакулев. – М. : Радиотехника, 2004. – 440 с.
4. Дудник, П. И. Авиационные радиолокационные устройства / П. И. Дудник. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1976. – 514 с.
5. Бажанов, С. А. Что такое радиолокация? / С. А. Бажанов. – М. : Воениздат, 1948. – 188 с.
6. Маковецкий, П. В. Отражение радиолокационных сигналов / П. В. Маковецкий, В. Г. Васильев. – Ленинград : ЛИАП, 1975. – 50 с.
7. Цифровые методы обработки информационных процессов : учеб. пособие. Ч. 1 / В. К. Волосюк, Р. П. Волощук, К. Н. Нежальская, В. В. Павликов, М. Л. Усс. – Харьков : ХАИ, 2011. – 182 с.

ДОДАТОК А

Приклад виконання курсової роботи

ВСТУП

Радіолокація – це область радіотехніки, у якій використовуються явища відбиття або випромінювання електромагнітних хвиль різними об'єктами для виявлення й вимірювання координат цих об'єктів. Радіотехнічні пристрої, призначені для вирішення зазначених завдань, називають радіолокаційними станціями (РЛС).

З допомогою радіолокаційних засобів вирішуються найрізноманітніші завдання: навігація, керування польотом і посадкою ЛА, спостереження за погодними умовами, виявлення й розпізнавання об'єктів, визначення координат, параметрів руху, виявлення й передбачення траєкторії.

Об'єктом радіолокаційного спостереження може бути будь-яке тіло або група тіл з електричними або магнітними властивостями, які відрізняються від властивостей середовища, у якому поширюються радіохвилі. Об'єктом може бути також тіло, що характеризується власним випромінюванням радіохвиль.

Під час радіолокаційного спостереження інформацію про ціль містять параметри радіолокаційних сигналів. Найбільш поширеним є метод активної радіолокації, що базується на опроміненні цілі електромагнітною енергією й прийманні відбитих ціллю радіохвиль приймальним пристроєм РЛС [1].

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Радіолокаційні цілі

Електромагнітна хвиля, потрапляючи на об'єкт, приводить до вимушених коливань вільних і зв'язаних зарядів, синхронних з коливаннями падаючого поля. Вимушені коливання зарядів створюють вторинне поле всередині тіла або поза ним. Унаслідок цього енергія електромагнітної хвилі розсіюється у всіх напрямках, у тому числі й у напрямку до станції радіолокації.

Характер вторинного випромінювання (відбиття) електромагнітних хвиль залежить від форми об'єкта, його розмірів та електричних властивостей, а також від довжини падаючої хвилі та її поляризації.

Розрізняють дзеркальне, дифузне й резонансне відбиття. Якщо лінійні розміри відбивальної поверхні є набагато більшою від довжини хвилі, а сама поверхня гладка, то виникає дзеркальне відбиття. При цьому кут падіння радіопроменя дорівнює куту відбиття і хвиля вторинного випромінювання не повертається до РЛС (за винятком випадку нормального падіння).

Якщо лінійні розміри поверхні об'єкта є великими порівняно з довжиною хвилі, а сама поверхня шорстка, то має місце дифузне відбиття. Електромагнітні хвилі розсіюються в різних напрямках, зокрема й у напрямку РЛС.

Резонансне відбиття відбувається в тому випадку, коли лінійні розміри відбивальних об'єктів або їх елементів дорівнюють непарній кількості півхвиль. На відміну від дифузного відбиття, вторинне резонансне випромінювання зазвичай має велику інтенсивність і різко виражену спрямованість, що залежить від конструкції й орієнтації відбивального елемента. У тих випадках, коли довжина хвилі є більшою за лінійні розміри об'єкта, падаюча хвиля огинає ціль, а інтенсивність відбитої хвилі стає мізерно малою.

Об'єкти радіолокаційного спостереження поділяються на малорозмірні та розподілені в просторі чи по поверхні [1].

До малорозмірних належать об'єкти, розміри яких є значно меншими за розрізнявальну здатність РЛС за дальністю й кутовими координатами. У багатьох випадках малорозмірні об'єкти мають найпростішу геометричну конфігурацію. Їх відбивні властивості легко визначаються теоретично і можуть бути передбачені в кожному конкретному розташуванні цілі та РЛС. У реальних умовах цілі найпростішого типу трапляються досить рідко. Найчастіше доводиться мати справу з об'єктами складної конфігурації, які складаються з багатьох жорстко зв'язаних між собою найпростіших

відбивальних елементів. Прикладами цілей складної конфігурації можуть бути літаки, кораблі, різні споруди тощо.

Інший тип цілей – це сукупність окремих об'єктів, розподілених у просторі, що значно перевищують за розмірами розрізнявальну здатність РЛС. Залежно від характеру цього розподілу розрізняють об'ємно-розподілені (наприклад, дощова хмара) і поверхнево-розподілені (поверхня суші тощо). Відбитий від такого об'єкта сигнал – результат інтерференції сигналів відбивачів, розподілених у межах розрізнявальної здатності.

Для фіксованого взаємного розташування РЛС і відбивальних об'єктів амплітуда і фаза відбитої хвилі мають певну величину. Однак у процесі радіолокаційного спостереження відносно положення цілей і РЛС зазвичай змінюється, що призводить до випадкових флуктуацій інтенсивності та фази відбитих сигналів.

1.2 Ефективна площа розсіювання

Розрахунок дальності радіолокаційного спостереження потребує кількісної характеристики інтенсивності відбитої хвилі. Потужність відбитого сигналу на вході приймача станції залежить від багатьох факторів, насамперед від властивостей цілі. Ефективна площа розсіювання об'єкта спостереження – площа фіктивної плоскої поверхні, розташованої нормально до напрямку падаючої плоскої хвилі, яка, будучи поміщена в точку розташування цілі, створює в місці розташування антени РЛС ту ж густину потоку потужності, що й реальна ціль.

Розглянемо відбиття хвилі, що падає на ізотропно відбивальну поверхню, площа якої дорівнює ЕПР. Відбита потужність – це добуток ЕПР на густину падаючого потоку потужності:

$$P_y = \sigma \rho_{РЛС}, \quad (1.1)$$

де σ – ЕПР, м²;

$\rho_{РЛС}$ – густина потоку потужності, що створюється РЛС у цілі, Вт/м²;

P_y – потужність, відбита ціллю, Вт.

З іншого боку, ізотропна випромінювана потужність (ураховано, що площа півсфери дорівнює $4\pi D^2$) визначається формулою

$$\rho_u = \frac{P_u}{4\pi D^2} = \frac{\sigma \rho_{PLC}}{4\pi D^2}, \quad (1.2)$$

де D – відстань від РЛС до об'єкта, м;

ρ_2 – густина потоку потужності в точці розташування РЛС, Вт/м².

Виражаючи σ з (1.2), отримуємо формулу для ЕПР цілі:

$$\sigma = 4\pi D^2 \frac{\rho_u}{\rho_{PLC}}. \quad (1.3)$$

Використовуючи напруженість поля падаючої E_u і відбитої E_{PLC} хвиль, формулу (1.3) можна записати в такому вигляді:

$$\sigma = 4\pi D^2 \frac{E_u^2}{E_{PLC}^2}. \quad (1.4)$$

Ефективна площа розсіювання σ не залежить ні від інтенсивності хвилі, що випромінюється, ні від відстані між станцією і ціллю. Справді, будь-яке збільшення ρ_{PLC} веде до пропорційного збільшення ρ_u , і їх відношення у формулі не змінюється. При змінній відстані між РЛС і ціллю відношення $\frac{\rho_u}{\rho_{PLC}}$ змінюється обернено пропорційно D^2 , а величина σ при цьому не змінюється.

1.3 Складні та групові цілі

Розрахунок найпростіших відбивачів є нескладним. Проте більшість реальних цілей радіолокації – це комбінація відбивачів різного типу. Під час радіолокаційного спостереження таких цілей сигнал, що надходить до антени, є інтерференцією декількох сигналів від окремих елементів об'єкта [2].

При опроміненні складного об'єкта (наприклад, літака, корабля, танка тощо) характер відбиття від окремих елементів сильно залежить від їх орієнтації. У деяких положеннях певні частини літака або корабля можуть давати інтенсивні сигнали, а в інших положеннях їх інтенсивність падає до нуля (рисунок 1.1). Крім того, при змінній положення об'єкта відносно РЛС

змінюються фазові співвідношення між сигналами, відбитими від різних елементів. Унаслідок цього виникають флуктуації прийнятого сигналу.

Через роботу двигуна виникають вібрації, що приводять до змінення провідності між окремими елементами цілі. При цьому змінюються розподіли струмів, наведених на поверхні об'єкта, та інтенсивність відбитих сигналів.

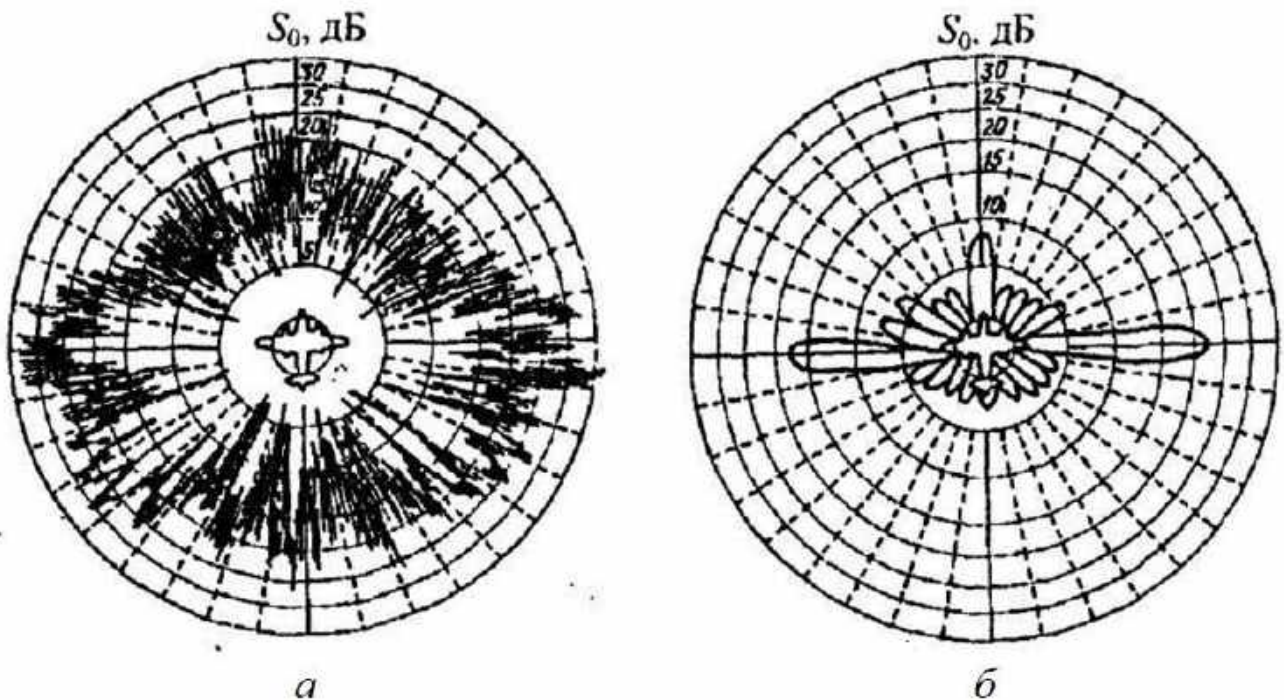


Рисунок 1.1 – Діаграма зворотного розсіювання реального літака:
a – $\lambda = 3$ см; *б* – $\lambda = 10$ см

Закони розподілу ймовірностей ЕПР цілі та змінення цієї величини в часі зазвичай визначають експериментально. За результатами багатьох досліджень флуктуації ЕПР літаків з достатньою точністю описує експоненціальний закон розподілу

$$W(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{сеп}} \exp\left\{-\frac{\sigma}{\sigma_{сеп}}\right\}. \quad (1.5)$$

Діаграми зворотного випромінювання кораблів мають більш тонку пелюсткову структуру, ніж діаграми літаків, що зумовлено більшими розмірами і складністю конструкцій. Елементи корабля, що відбивають, численні і різноманітні, тому корабель також можна розглядати як групу елементів, відбиття від яких мають випадкові фази. Експерименти свідчать про те, що

флуктуації ЕПР корабля приблизно описуються експоненційним законом розподілу [3].

Дані про закони розподілу амплітуд сигналів або ЕПР необхідні для розрахунку дальності дії РЛЗ та обґрунтування методики оброблення сигналів. Відомості про функцію кореляції та спектра флуктуації є важливими під час визначення точності вимірювання координат.

Під час практичного оцінювання дальності дії РЛС насамперед користуються середнім значенням ЕПР – $\sigma_{сер}$. Цю величину можна отримати усередненням значень ЕПР для різних напрямків падіння опромінювальних хвиль. У таблиці 1.1 наведено середні значення ЕПР різних реальних цілей. Дані отримано шляхом узагальнення великої кількості вимірів на хвилях сантиметрового діапазону [3].

Таблиця 1.1 – Середні значення ЕПР

Тип радіолокаційної цілі	σ , м ²
Винищувач	3...5
Середній бомбардувальник	5...20
Далекий бомбардувальник	10...50
Транспортний літак	До 50
Крилата ракета	0,3...0,8
Головна частина балістичної ракети	10 ⁻³ ...1,0
Крейсер	14000
Транспорт малого тоннажу	150
Транспорт середнього тоннажу	7500
Транспорт великого тоннажу	15000
Траулер	750
Малий підводний човен у надводному стані	140
Рубка підводного човна	1
Катер	100
Людина	0,8

1.4 Об'ємно-розподілені цілі

У радіолокаційній практиці поширеним є відбиття від об'ємно-розподілених цілей, що складаються з великої кількості елементів, близько

розташованих один до одного в значній області простору. Елементи відбиття, що беруть участь у формуванні сумарного сигналу, розподіляються в межах деякого об'єму V (відбивального об'єму), що визначається роздільною здатністю РЛС за кутовими координатами і дальністю. Визначити ЕПР об'ємно-розподіленої цілі в припущенні, що елементарні відбивачі мають різні значення σ_i , досить важко. Тому вважатимемо, що елементарні відбивачі, що заповнюють об'єм V , мають однакові ЕПР, які дорівнюють σ_i [4].

Припустимо, що елементарні відбивачі розподілені в просторі рівномірно зі щільністю n_0 , тоді в об'ємі міститься $N_1 = n_0 V$ відбивачів, а їх середня ЕПР

$$\sigma_{сеп V} = N_1 \sigma_0. \quad (1.6)$$

Підставляючи в цей вираз значення об'єму циліндра з основою $\Omega_A R^2$ і висотою $\frac{c\tau_i}{2}$, отримуємо формулу для обчислення середньої ЕПР об'ємно-розподіленої цілі:

$$\sigma_{сеп V} = \frac{N_1 \sigma_0 \Omega_A R^2 c\tau}{2}. \quad (1.7)$$

З урахуванням того, що тілесний кут антенного променя Ω_A виражається через ефективну площу $A_{эф}$ або коефіцієнт спрямованої дії антени G_0 , отримуємо

$$\sigma_{сеп V} = \frac{2\pi N_1 \sigma_0 R^2 c\tau}{G_0}. \quad (1.8)$$

З формули випливає характерна особливість об'ємно-розподілених цілей: залежність ЕПР від параметрів РЛС, а також відстані між станцією і ціллю [2].

Слід мати на увазі, що тривалість сигналу, відбитого від такої цілі, може значно перевищувати тривалість імпульсу, що випромінюється, і визначається радіальною протяжністю об'ємної цілі. У міру поширення випромінюваного імпульсу сигнал відбивається від нових ділянок об'єкта.

Якщо всередині об'єму, заповненого розподіленими відбивачами, знаходиться якийсь об'єкт (наприклад, літак), то радіолокаційне

спостереження за ним ускладнюється. Відбиття від об'ємно-розподіленої цілі в цьому випадку є перешкодою, яка буде маскувати корисний сигнал. Умови спостереження корисного сигналу можна характеризувати відношенням потужностей сигналу та перешкоди. Відношення потужності сигналу, відбитого від цілі, до середньої потужності сигналу дорівнює відношенню їх ефективних площ:

$$\frac{P_{nn}}{P_{np_ном}} = \frac{1}{1200\pi} \frac{\frac{\sigma}{\sigma_0}}{N_1 R^2 c \tau_u} = \frac{1}{1200\pi} \frac{2\sigma}{N_1 \sigma_0 R^2 c \tau_u}. \quad (1.9)$$

Щоб підвищити ефективність виокремлення корисних сигналів і зменшити вплив відбиття від об'ємно-розподіленої цілі, треба зменшувати тривалість імпульсу і звужувати діаграму спрямованості антени.

Насправді найчастіше трапляються відбиття від гідрометеорів. Для дощу, середній діаметр крапель якого d_0 , величина $\sigma = 300d_0^6 / \lambda^4$ і відношення сигнал/перешкода визначається як

$$\frac{P_{nn}}{P_{np_ном}} = \frac{1}{1200\pi} \frac{2\sigma G_0 \lambda^4}{N_1 d_0^6 R^2 c \tau_u}. \quad (1.10)$$

Відбиття електромагнітних хвиль від гідрометеорів використовується в метеорології як корисний сигнал. З його допомогою можна визначити місце розташування атмосферних утворень, їх інтенсивність, а іноді й напрямок переміщення.

1.5 Поверхнево-розподілені цілі

Прикладами поверхнево-розподілених цілей є трав'яний покрив, ліс, чагарник, хвилі на водній поверхні. На відміну від об'ємно-розподілених цілей у цьому випадку виокремити окремі елементи відбиття. Розташовуючись випадковим чином, вони утворюють суцільний поверхневий шар, від якого відбивається розсіяний потік електромагнітних хвиль (рисунки 1.2) [4].

Припустимо, що в точці O на висоті H над поверхнею землі знаходиться літак. Антенний промінь з шириною θ у горизонтальній площині опромінює на поверхні землі сектор AD_1D_2 .

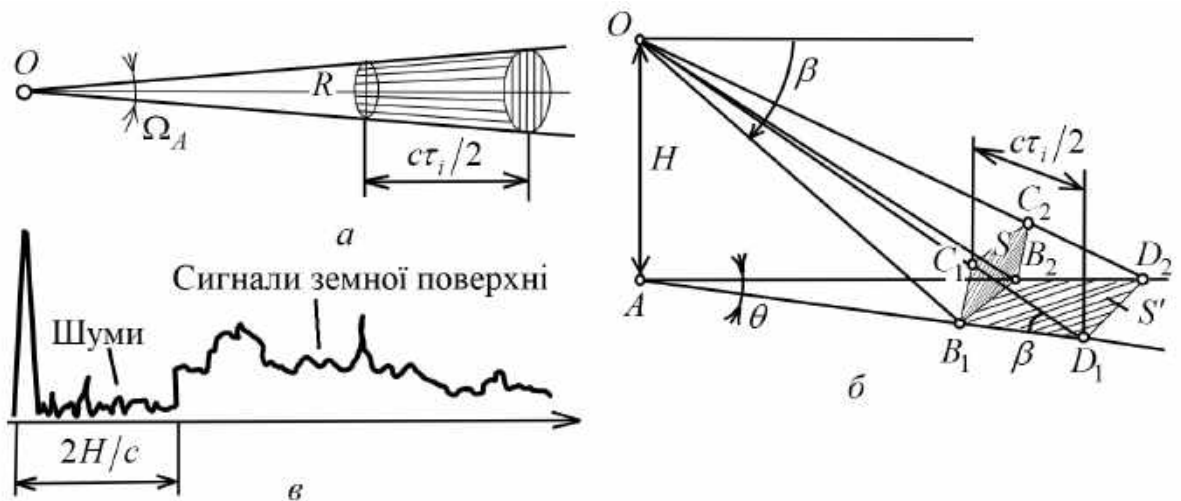


Рисунок 1.2 – Визначення характеристик об'ємних (а) і поверхневих (б) цілей та приклад запису сигналу (в)

Уважатимемо, що РЛС випромінює імпульси тривалістю τ_i . Навіть при нерухомій антені опромінення поверхні в секторі AD_1D_2 відбувається не одночасно. Перший відбитий сигнал надходить через час $\tau = \frac{2H}{c}$ після зондувального імпульсу. Далі, незважаючи на імпульсний характер випромінювання, на вхід приймача РЛС безперервно надходять відбиті сигнали. Пояснюється це тим, що з поширенням випромінюваної хвилі відбита хвиля повертається від дедалі більше віддалених ділянок поверхні. Оскільки поверхня є безперервною, на вході приймача буде безперервний сигнал. У кожен момент часу сигнал, що діє на вхід приймача, – це результат складання сигналів, відбитих від елементарних відбивачів, розташованих випадково в межах площадки поверхні розділення. За азимутом ця площадка обмежується шириною ДС. Межі площадки розділення за дальністю залежать від тривалості імпульсу τ_i та кута візування β . Так, у цьому випадку

$$B_1D_1 = \frac{c\tau_i}{2\cos \beta}. \quad (1.11)$$

Величина ЕПР у разі однорідної поверхні з випадковим розташуванням нерівностей є пропорційною площі S' і формує в певний момент часу відбитий сигнал. Для визначення величини σ розглянемо площадку S , перпендикулярну до напрямку падіння хвилі. Через її поверхню проходить уся

енергія, що відбилася від площадки $B_1B_2D_1D_2$. На поверхні землі площадка розділення визначається формулою

$$S' = \frac{R\theta\tau_i c}{2\cos \beta}. \quad (1.12)$$

Відповідно площу поверхні, перпендикулярної до лінії візування, можна розрахувати так:

$$S = S' \sin \beta = \frac{R\theta\tau_i c}{2} \operatorname{tg} \beta. \quad (1.13)$$

Знаючи S , можна визначити величину σ , якщо ввести коефіцієнт розсіювання γ , що враховує вплив відбивальних властивостей земної поверхні:

$$\sigma = \frac{\gamma R\theta\tau_i c}{2} \operatorname{tg} \beta. \quad (1.14)$$

Для поверхнево-розподіленої цілі характерними є залежності ЕПР від параметрів РЛС τ_i і θ , а також від відстані до розглянутої площадки та від кута візування. Як впливає з останньої формули, властивості поверхнево-розподіленої цілі залежать від величини γ . Знаючи γ та інші параметри спостереження, можна визначити ЕПР і перейти до розрахунку інтенсивності відбитого сигналу.

На властивості відбивальних поверхонь і на величину ЕПР впливають нерівності поверхні, довжина хвилі та її поляризація, діелектрична проникність ґрунту [5].

Усі земні покриття можна поділити на гладкі і шорсткі. До гладких поверхонь належать дороги з асфальтовим і бетонним покриттям тощо. Інтенсивність сигналу, відбитого від таких поверхонь, швидко зменшується зі зменшенням кута візування і залежить від поляризації падаючої хвилі. Розміри нерівностей шорстких поверхонь значно перевищують довжину хвилі. Такий характер мають ділянки місцевості, порослі травою, посіви, чагарники, ліс тощо. Дослідження показують, для реальних шорстких поверхонь величина γ мало залежить від кута візування β і поляризації. При цьому величини γ і σ_0 кожного типу земної поверхні зазвичай знаходяться у певних межах. Завдяки

цьому за величиною σ_0 можна судити про загальний характер місцевості, від якої надходять відбиті сигнали.

Радіолокаційні відбиття від поверхні, покритої рослинністю, зазнають сезонних змін, що зумовлені різним вмістом води в рослинах і на самій поверхні (зміною вологості), а також наявністю або відсутністю снігового покриву. При спостереженні поверхонь, покритих рослинністю, відбиття відбувається від безлічі випадкових відбивачів (листя, стебел, гілок). Ці відбивачі можуть рухатися під впливом вітру. Чим сильніший вітер, тим інтенсивнішим є їх рух. Крім рухомих відбивачів існують випадково розташовані нерухомі відбивачі (скелі, стовбури дерев). Сигнал на вході приймального пристрою являє собою суму сигналів відбивачів першого та другого роду [5].

2 МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Поетапно вирішимо поставлене завдання.

1. Знайдемо роздільні здатності за горизонтальними дальностями для заданого сектора огляду за кутом місця. Роздільна здатність за дальністю визначається формулою

$$\Delta D = \frac{c\tau_{\text{имп}}}{2}. \quad (2.1)$$

Далі знаходимо горизонтальні дальності. На рисунку 2.1 показано геометрію для розрахунку ΔD_{Γ} [5].

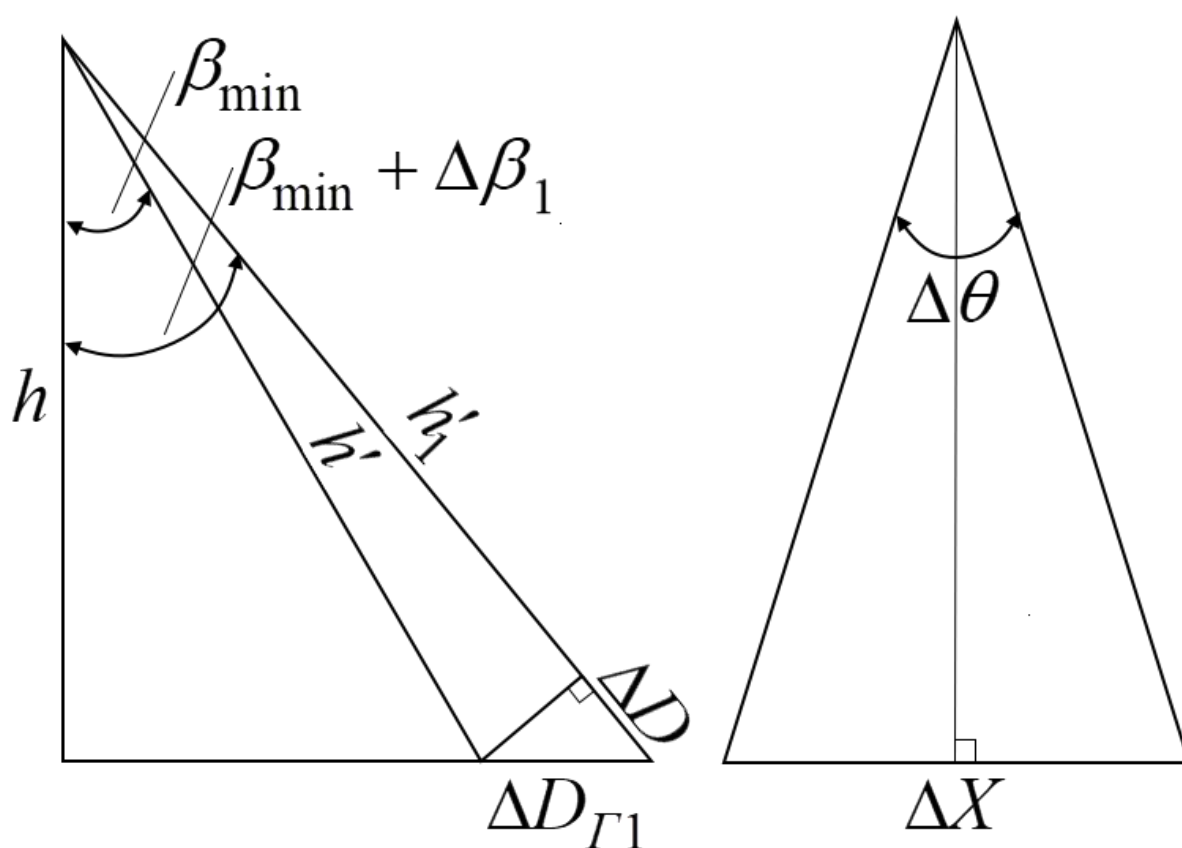


Рисунок 2.1 – Геометрія для знаходження горизонтальних дальностей

Знаючи висоту польоту h і кут β_{min} , знаходимо похилу дальність h' за формулою

$$h' = \frac{h}{\cos \beta_{\text{min}}}. \quad (2.2)$$

Далі похилі дальності збільшуються на постійну величину ΔD , і їх значення можна записати в такому вигляді:

$$h'_{i+1} = h'_i + \Delta D. \quad (2.3)$$

Перша горизонтальна дальність перерахована до поверхні

$$\Delta D_{\Gamma i} = \frac{\Delta D}{\sin \beta_{\min}}. \quad (2.4)$$

Розраховуємо приріст кута:

$$\Delta \beta_i = \arccos\left(\frac{h}{h'_i}\right) - \beta_{\min}. \quad (2.5)$$

Новий кут візування визначаємо за формулою

$$\beta_{\min} = \beta_{\min} + \Delta \beta_i. \quad (2.6)$$

Знаходимо наступну горизонтальну дальність $\Delta D_{\Gamma i}$ і повторюємо всі операції доти, доки кут β_{\min} стане більшим за β_{\max} . Значення кутів необхідно зберігати в масиві. На рисунку 2.2 показано залежності похилих і горизонтальних дальностей від кутів візування.

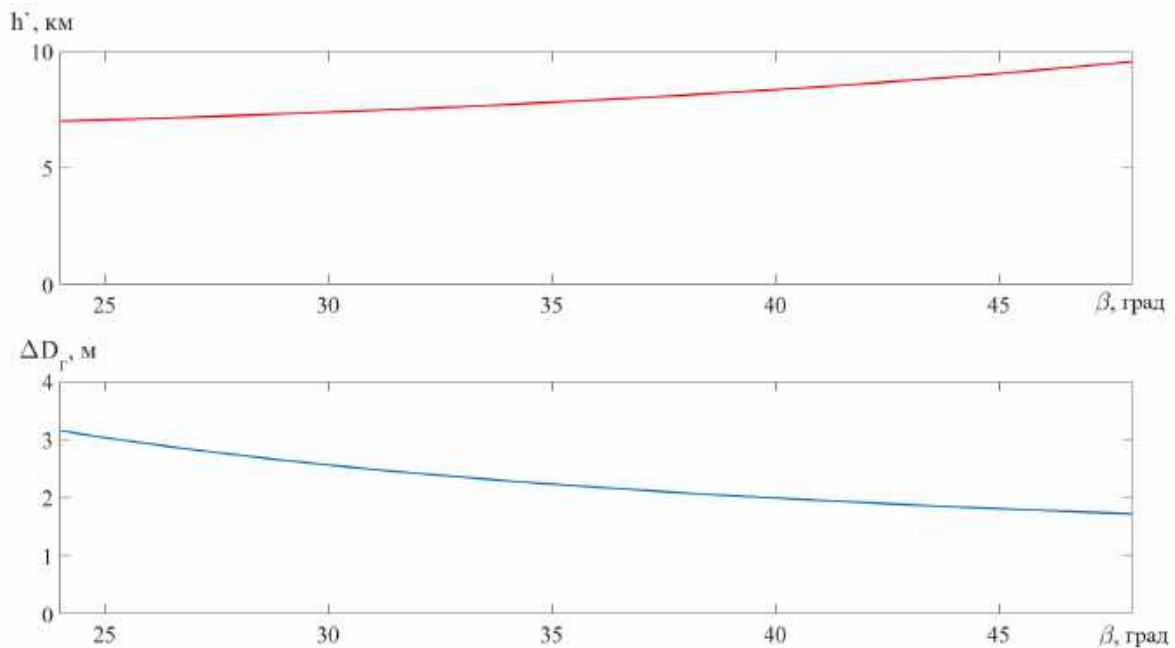


Рисунок 2.2 – Залежність дальностей від кутів

2. Кут $\Delta\theta$ називають роздільною здатністю за азимутом:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{L}. \quad (2.7)$$

Перерахуємо роздільну здатність за азимутом до поверхні:

$$\Delta x = \frac{h}{\cos\beta} \Delta\theta, \quad (2.8)$$

де β – масив усіх кутів від β_{\min} з кроком $\Delta\beta$ до β_{\max} (рисунок 2.3).

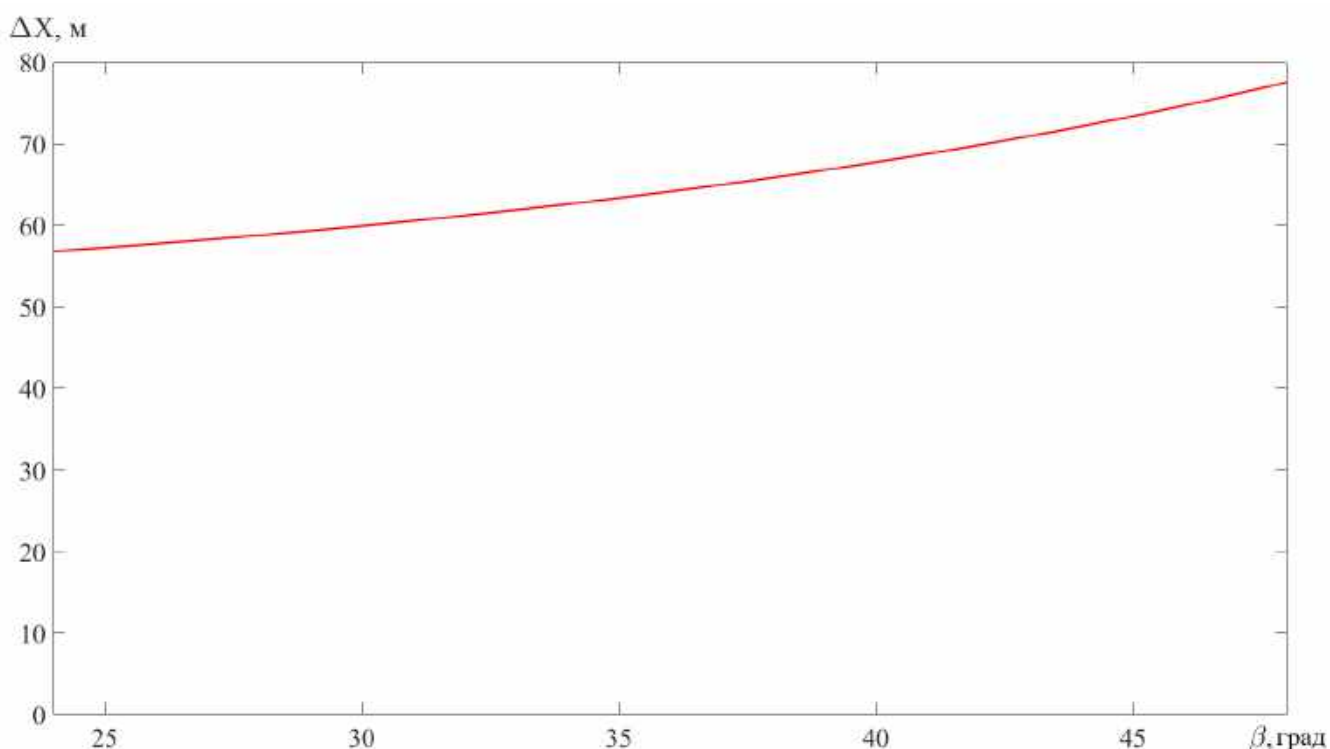


Рисунок 2.3 – Залежність роздільної здатності за азимутом (перерахованої до поверхні) від кутів візування

3. Знайдемо площадки розділення:

$$S_{\text{розд}} = \Delta D_{\Gamma_i} \Delta x_i. \quad (2.9)$$

На рисунку 2.4 показано залежність величин площадок розділення залежно від кута спостереження

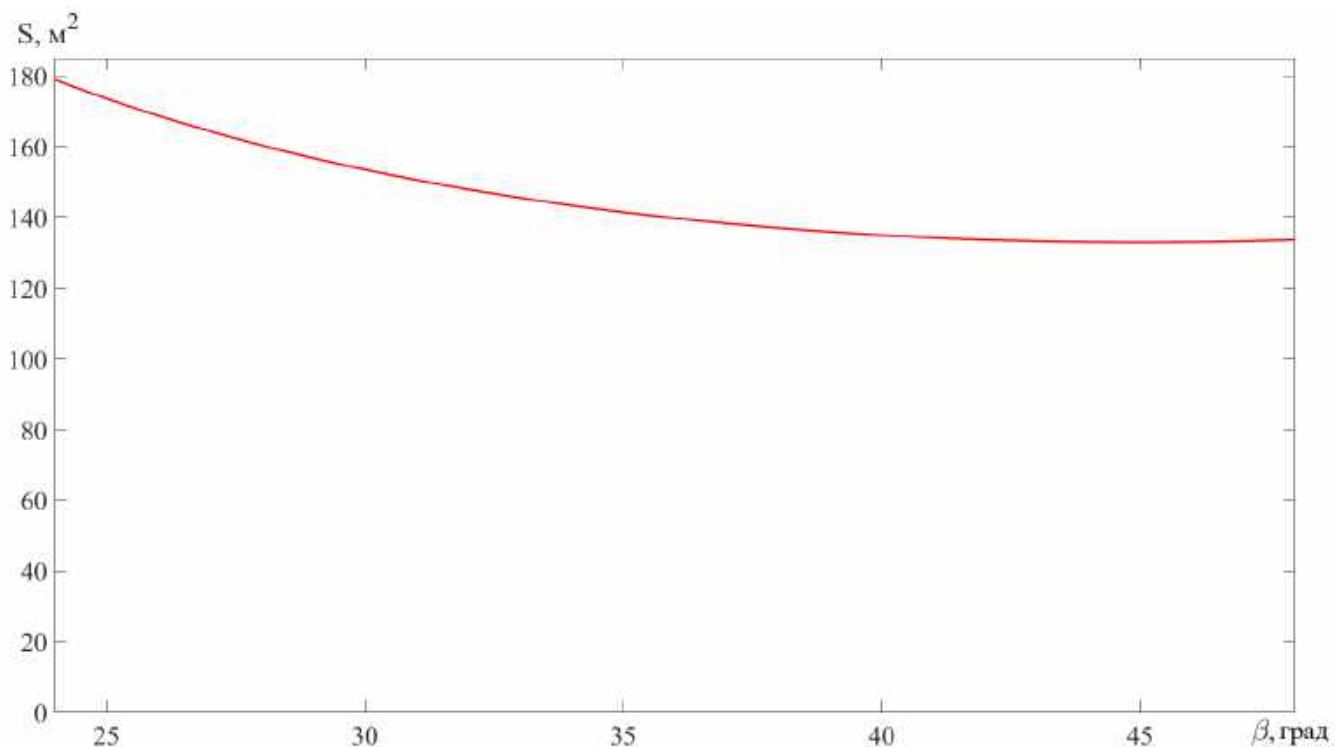


Рисунок 2.4 – Залежність величин площадок розділення від кутів візування

4. Створимо наближені математичні моделі питомих ЕПР як функції кута спостереження за відомими формулами із завдання до курсової роботи. У роботі буде використано модель для пшеничного поля, моря та снігу.

5. Створимо матрицю питомих ЕПР для трьох різних типів підстильної поверхні (рядки матриці відповідають зміненню питомої ЕПР залежно від кута місця, а стовпці – унаслідок руху літального апарата) (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Зображення поверхні, що створено за допомогою графічного редактора

6. Визначимо ПЕПР як функцію кутів місця або горизонтальних дальностей. На рисунку 2.6 показано маску підстильної поверхні снігу (білим кольором), причому ділянки чорного кольору – це ділянки, де снігу немає, тобто всі інші поверхні. За цими даними проводиться класифікація поверхонь. На рисунку 2.7 показано маску підстильної поверхні пшеничного поля (білим кольором), а чорним – відсутність пшениці. На рисунках 2.6–2.8 по осі ординат указано величину X – умовний шлях літального апарата.

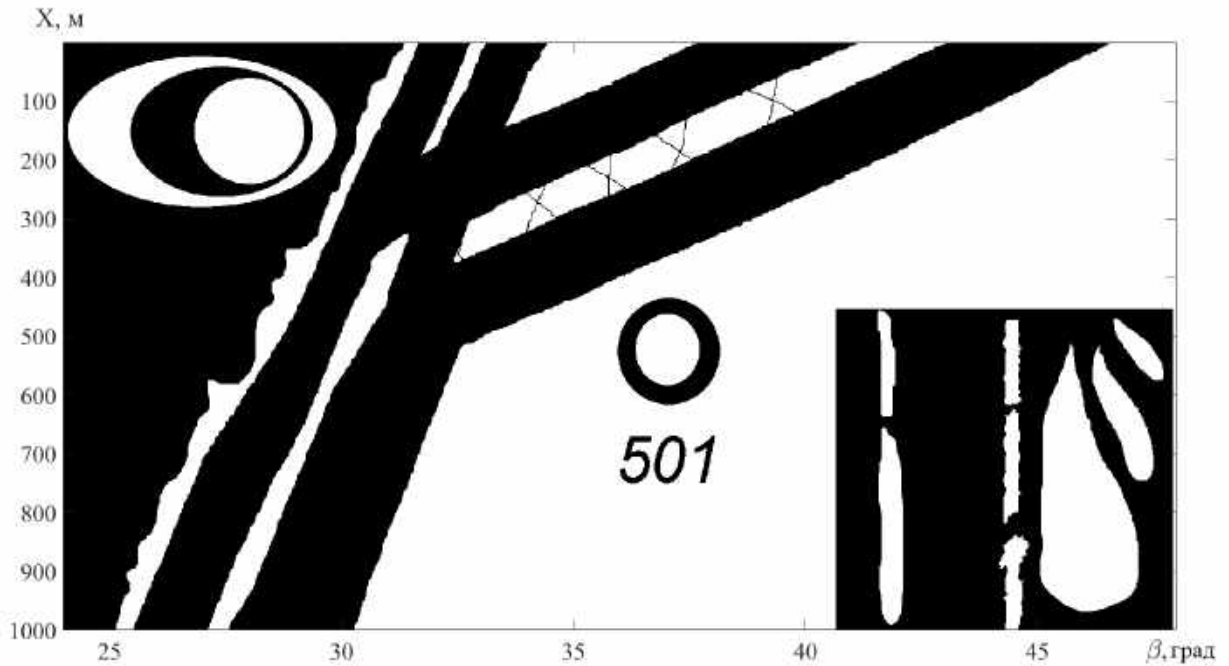


Рисунок 2.6 – Маска підстильної поверхні снігу

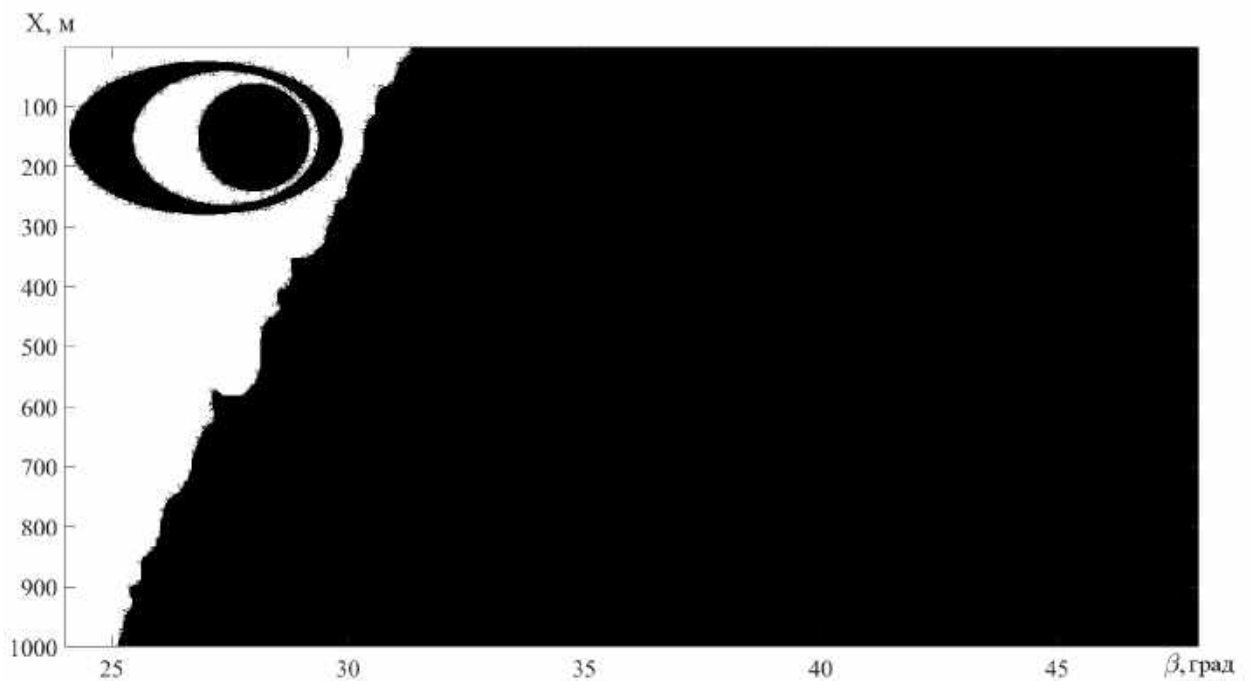


Рисунок 2.7 – Маска підстильної поверхні пшеничного поля

На рисунку 2.8 показано маску підстильної поверхні води (білим кольором), а чорним – відсутність водної поверхні.

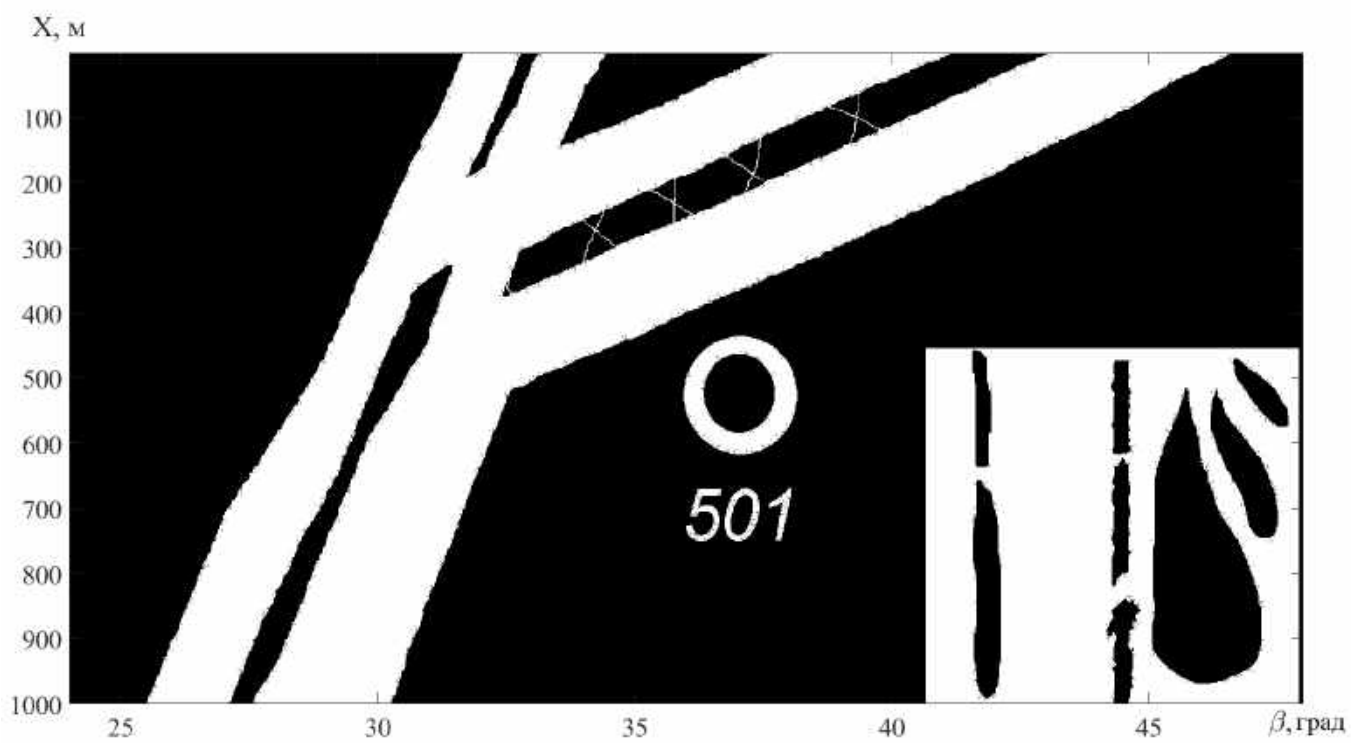


Рисунок 2.8 – Маска підстильної поверхні води

7. Визначимо сумарну ЕПР як функцію кутів місця або горизонтальних дальностей з усіма масками підстильних поверхонь. Результат показано на рисунку 2.9.

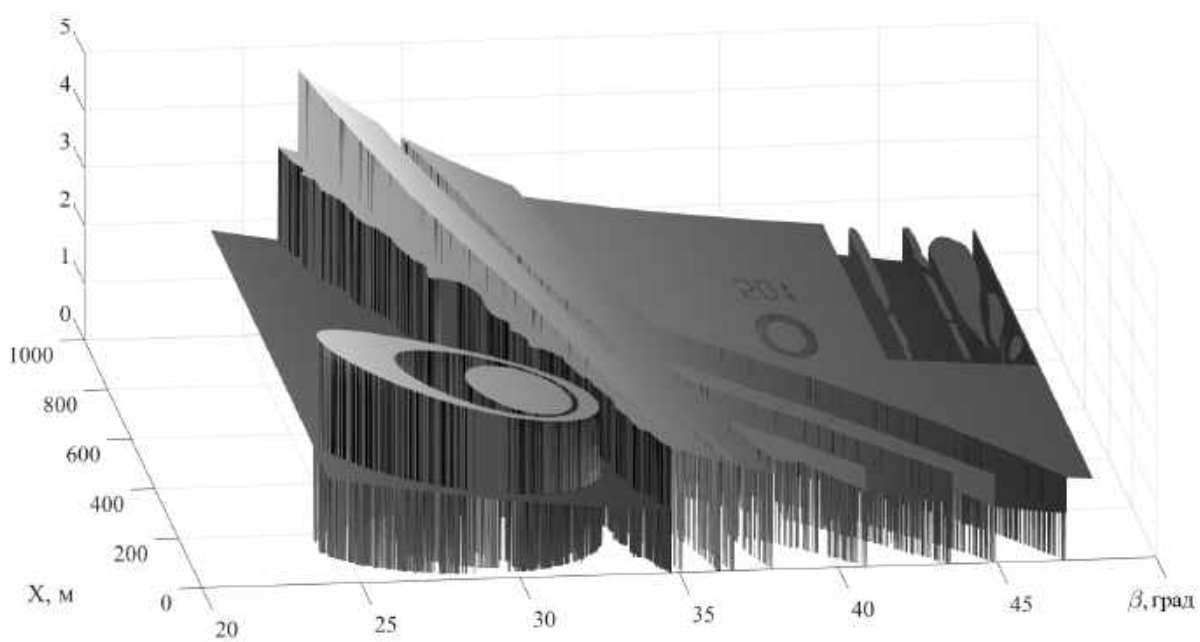


Рисунок 2.9 – Маски підстильних поверхонь

8. Урахуємо випадковий характер питомої ЕПР. За середніми значеннями, отриманими у п. 4, сформуємо випадкову ЕПР, розподілену за експоненційним законом (рисунок 2.10).

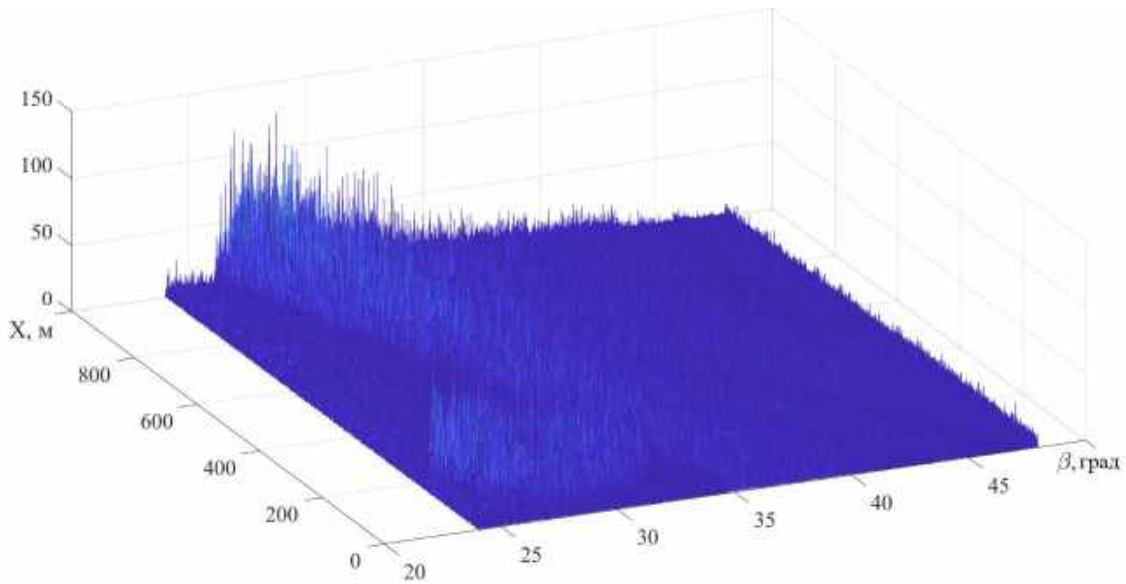


Рисунок 2.10 – ПЕПР з урахуванням експоненційного розподілу

На рисунку 2.10 видно специфічний ефект, який називають спекл-шумом. Спекл-шум може містити інформацію про мікрорельєф, форму об'єкта, а також приповерхневий шар і розподіл розсіювачів у ньому. Статистичне оброблення спеклів дає змогу отримати інформацію про швидкість руху в приповерхневому шарі, амплітуду та частоту вібрацій.

9. Урахуємо ослаблення сигналу у вільному просторі (рисунок 2.11). Коефіцієнт ослаблення розрахуємо за такою формулою:

$$K_{\text{відс}} = e^{-0,115\alpha h'_i}, \quad (2.10)$$

де $\alpha = 0,0072$ – показник ослаблення, дБ/км.

10. Урахуємо спрямовувальні властивості антени в кутомісній площині. ДС розрахуємо за формулою

$$G(\beta) = \frac{1}{K_{\text{norm}}} \sqrt{\frac{\sin \beta \left(K_s \cos \beta - \sqrt{1 - (K_s \sin \beta)^2} \right)^3}{\cos^2(\arcsin(K_s \sin \beta))}}, \quad (2.11)$$

де $K_{\text{norm}} = 0,1569$;
 $K_s = 1,1303$.

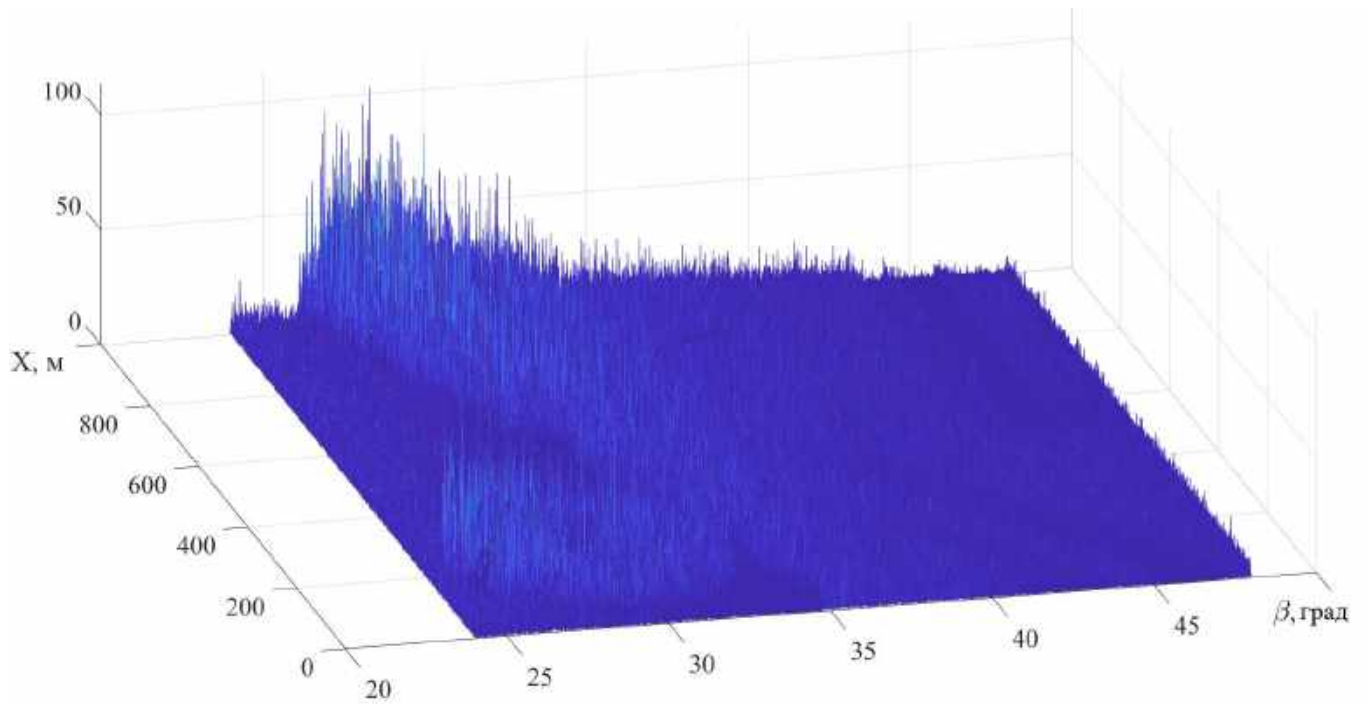


Рисунок 2.11 – ПЕПР з урахуванням просторового ослаблення сигналу
 На рисунку 2.12 показано сумарну ПЕПР.

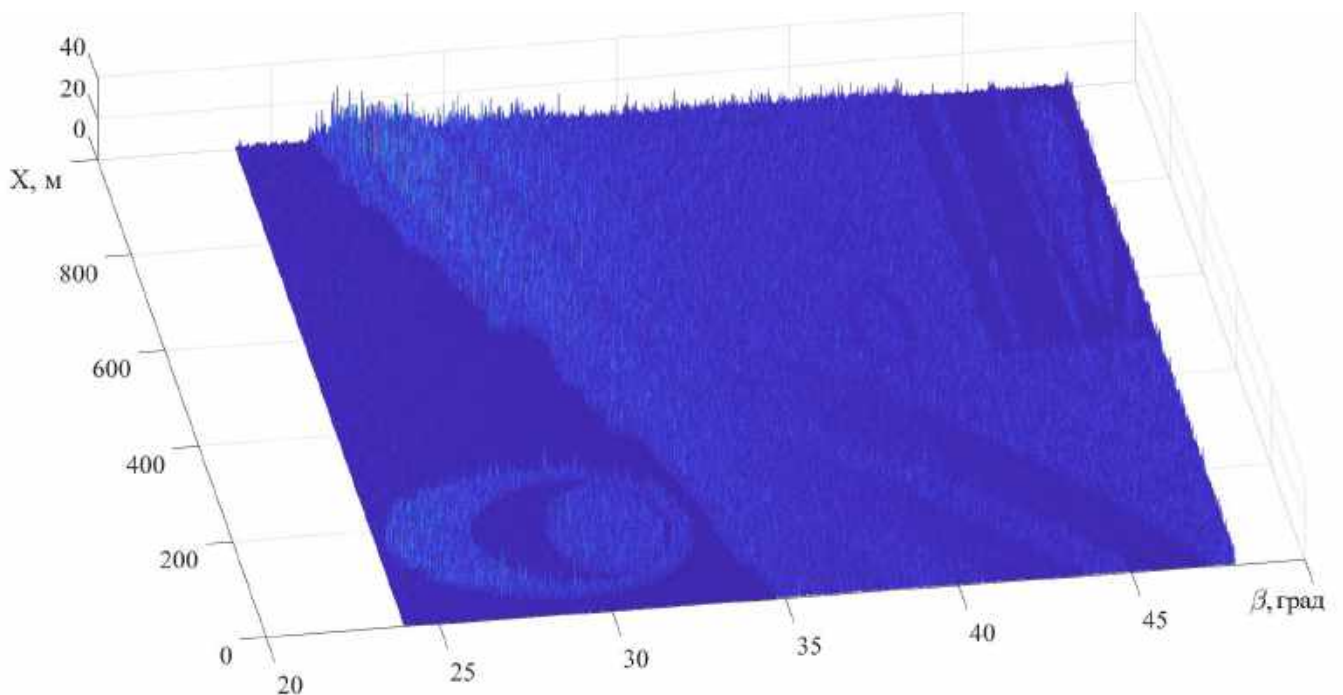


Рисунок 2.12 – Результат моделювання

Наведемо лістинг коду для розрахунків:

```
%%
clear all
h = 6.4e3; % висота польоту
```

```

c = 3e8; % швидкість світла
tau_i = 8.5341e-9; % тривалість імпульсу(визначаємо залежно від технічних
% можливостей комп'ютера)
% tau_i = 20e-9; % тривалість імпульсу
B_min = 24; % початковий кут візування
B_max = 48; % максимальний кут візування
lamda = 3e-2; % довжина хвилі
L = 3.7; % розміри апертури антени

%% 1 Роздільна здатність за дальністю
dD = (c*tau_i)/2;

%% 2 Знайти роздільні здатності за горизонтальною дальністю за кутом місця
R = h/cosd(B_min) % перший елемент похилої дальності. Чому cosd?
i=1;
% arr_of_angle(1) = B_min
while B_min<=B_max % умова: поки початковий кут менше максимального
    R(i+1)=R(i)+dD; % другий(та наступний) елемент похилої дальності
    dD_g(i) = dD/sind(B_min); % Розрахункова роздільна здатність. Заноситься до масиву
    dB(i)= acosd(h/R(i)) - B_min; % приріст кута візування
    B_min = B_min+dB(i); % новий початковий кут візування
    arr_of_angle(i) = B_min; % заносимо до масиву кутів для подальшого використання
    i = i+1;
end
% Вирівнювання розмірностей масивів
R(1)=[];
R(end)=[];
dD_g(end) =[];
arr_of_angle(end) = [];

subplot(2,1,1),plot(arr_of_angle,R*1e-3,'r','linewidth',2)
ylabel('Похила дальність h`, км')
xlabel('Кут \beta, °');

subplot(2,1,2),plot(arr_of_angle,dD_g,'linewidth',2)
ylabel('Гориз. розд. здатність, \Delta D, м')
xlabel('Кут \beta, град');

%% 3 Знайти роздільні здатності за азимутом і перерахувати їх до поверхні
dQ = lamda/L; % див. на геометрію. Формула з лекції. Величина в радіанах
dx = ( h./cosd(arr_of_angle) ) * dQ; % в ( ) - похила дальність для кожного варіанта
кута...
% синус малого кута приблизно дорівнює
% величині самого кута (у радіанах)

figure
plot(arr_of_angle,dx,'r','linewidth',2);
xlabel('Кут \beta, град');
ylabel ('Розділення за азимутом dx, м');
% clear dQ
%% 3 Знайти площадки розділення як функції кутів місця або горизонтальних
дальностей
S = dD_g.*dx; % масив значень роздільних площ
figure
plot(arr_of_angle,S,'r','linewidth',2)
xlabel('Кут \beta, град');
ylabel ('S, м^2');
% clear dD_g dx
%% 4 Створити наближені математичні моделі питомих ЕПР як функцій кута спостереження
RCS_snow_dB = -0.12*arr_of_angle - 14; % В дБ, сніг
RCS_wheat_dB = -0.12*arr_of_angle - 17; % В дБ, пшениця
RCS_water_dB = -0.32*arr_of_angle - 7; % В дБ, море при вітрі 2 м/с

```

```

% Перерахунок у м^2:
RCS_snow_m2 = 10.^(RCS_snow_dB/10); % м^2, сніг
RCS_wheat_m2 = 10.^(RCS_wheat_dB/10); % м^2, пшениця
RCS_water_m2 = 10.^(RCS_water_dB/10); % м^2, вода
figure
plot(arr_of_angle,RCS_snow_dB,'linewidth',2)
hold
plot(arr_of_angle,RCS_wheat_dB,'r','linewidth',2)
plot(arr_of_angle,RCS_water_dB,'linewidth',2)
ylabel('ЕПР, дБ')
xlabel('Кут \beta, град');
legend('сніг','пшениця','вода')
% clear RCS_snow_dB RCS_water_dB RCS_wheat_dB

%% 5   RCS – ЕПР. Створити матриці питомих ЕПР для трьох різних типів підстильної
поверхні
Real_image = rgb2gray(imread('ALL.jpg')); % Рисунок, створений студентом
imshow(Real_image);
Arr_snow = double(Real_image >= 225 & Real_image <= 255 ); % Одиниця показує
наявність снігу
Arr_wheat = double(Real_image >= 202 & Real_image <= 206 ); % Одиниця показує
наявність пшениці
Arr_water = double(Real_image >90 & Real_image < 120); %Одиниця показує наявність
води
figure
subplot(3,1,1), imshow(Arr_snow);
hold
ylabel('X, м')
subplot(3,1,2), imshow(Arr_wheat);
ylabel('X, м')
subplot(3,1,3), imshow(Arr_water);
ylabel('X, м')
xlabel('Кут \beta, град');

%% 6   Розрахувати сумарну ЕПР як функцію кутів місця або горизонтальних дальностей
S_round = round(S,2); % округлити до другого знака
% S_round = S;
RCS_result_snow = ones(length(Real_image(:,1)),1)*(RCS_snow_m2.*S_round).*Arr_snow;
% дужки (RCS_snow_m2.*S_round) – ЕПР з урахуванням площі розділення для
% поверхні (сніг у цьому випадку). Рядок у результаті
% Але Arr_snow – матриця з розмірами зображення, тому частина
ones(length(Real_image(:,1)),1)
% робить з (RCS_snow_m2.*S_round) матрицю і потім ці дві частини
% перемножуються поелементно за допомогою оператора .*
RCS_result_wheat =
ones(length(Real_image(:,1)),1)*(RCS_wheat_m2.*S_round).*Arr_wheat;
RCS_result_water =
ones(length(Real_image(:,1)),1)*(RCS_water_m2.*S_round).*Arr_water;

figure
mesh(arr_of_angle,1:length(Real_image(:,1)),RCS_result_snow)
title('RCS of snow')
ylabel('X, м')
xlabel('Кут \beta, град');
% figure
% mesh(arr_of_angle,1:length(Real_image(:,1)),RCS_result_wheat)
% title('RCS of wheat')
% ylabel('Route of airplane, m')
% xlabel('Angle \beta, deg')
% figure
% mesh(arr_of_angle,1:length(Real_image(:,1)),RCS_result_water)
% title('RCS of water')
% ylabel('Route of airplane, m')

```



```

% xlabel('Angle \beta, deg')

RCS = RCS_result_snow + RCS_result_wheat + RCS_result_water;% складаємо для отримання
сумарної величини ЕПР
mesh(arr_of_angle, 1:length(Real_image(:,1)),RCS)
ylabel('X, м')
xlabel('Кут \beta, град');
% clear RCS_result_snow RCS_result_water RCS_result_wheat RCS_snow_m2 RCS_water_m2
RCS_wheat_m2
% clear Arr_snow Arr_wheat Arr_water
%% 7.1 За середніми питомими ЕПР, отриманими в п. 6, сформувані випадкові числа,
розподілені за експоненціальним законом
RCS_exp = exprnd(RCS);
figure
mesh(arr_of_angle, 1:length(Real_image(:,1)), RCS_exp)

%% 7.2 Розрахувати сумарну ПЕПР, використавши питомі ЕПР, розраховані в пп. 7.1
RCS_result_exp = RCS.*RCS_exp;
figure
mesh(arr_of_angle, 1:length(Real_image(:,1)), RCS_result_exp)
ylabel('X, м')
xlabel('Кут \beta, град');
clear RCS RCS_exp

%% 8 Урахувати ослаблення сигналу під час поширення у вільному просторі
h_oblique = R*1e-3;
alfa = 0.0072; % ослаблення, дБ/км
% f = c/lamda*1e-6;
K_att = exp(-0.115*alfa.*h_oblique);
RCS_result_att = (ones(length(Real_image(:,1)),1)*10.^(-K_att/10)).*RCS_result_exp;
mesh(arr_of_angle, 1:length(Real_image(:,1)), RCS_result_att);
ylabel('X, м')
xlabel('Кут \beta, град');

% clear K_att h_oblique RCS_result_exp R

%% 9 Урахувати спрямовувальні властивості антени
K_nor = 0.1569;
K_s = 1.1303;
nom = sind(arr_of_angle).*( (K_s*cosd(arr_of_angle)- sqrt(1 -
(K_s*sind(arr_of_angle)).^2 )).^3);
denom = cosd(asind(K_s*sind(arr_of_angle))).^2;
G = (1/K_nor)*sqrt(nom./denom);
RCS_result = (ones(length(Real_image(:,1)),1)*G).*RCS_result_att;
mesh(arr_of_angle, 1:length(Real_image(:,1)), RCS_result)
ylabel('X, м')
xlabel('Кут \beta, град');
plot(G)
clear K_nor K_s nom denom G RCS_result_att

```

ВИСНОВКИ

Розвиток радіолокації та радіолокаційних пристроїв дав змогу визначати важливу інформацію про параметри об'єктів: швидкість, місцезнаходження, кутові координати тощо. Усю інформацію містять радіохвилі, що поширюються в просторі за певними законами. Характер відбиття, довжина хвилі та властивості поверхні (розмір, шорсткість) визначають особливості розсіювання й інтенсивність відбитих хвиль. Радіолокаційні цілі характеризуються ефективною площею розсіювання.

Три типи поверхонь, змодельовані в програмному середовищі Matlab, дали змогу оцінити їх відбивні властивості та вплив на величину ЕПР нерівностей поверхні, довжини хвилі та діелектричної проникності ґрунту. Якщо враховувати випадковість розподілу ПЕПР, то в зображенні відразу виникає нерівномірність амплітуд сигналу, що надійшов до РЛС. Через інтерференцію відбитих хвиль виникає спекл-структура. Її аналіз та оброблення дають змогу отримати інформацію про параметри мікрорельєфу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белоцерковский, Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства / Г. Б. Белоцерковский. – М. : Сов. радио, 1975. – 336 с.
2. Дудник, П. И. Авиационные радиолокационные устройства / П. И. Дудник. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1976. – 514 с.
3. Бажанов, С. А. Что такое радиолокация? / С. А. Бажанов. – М. : Воениздат, 1948. – 188 с.
4. Маковецкий, П. В. Отражение радиолокационных сигналов / П. В. Маковецкий, В. Г. Васильев. – Ленинград : ЛИАП, 1975. – 50 с.
5. Цифровые методы обработки информационных процессов : учеб. пособие. Ч. 1 / В. К. Волосюк, Р. П. Волощук, К. Н. Нежальская, В. В. Павликов, М. Л. Усс. – Харьков : ХАИ, 2011. – 182 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ЕФЕКТИВНА ПОВЕРХНЯ РОЗСІЮВАННЯ	4
1.1 Плоска пластина.....	8
1.2 Металева куля.....	10
1.3 Кутникові відбивачі.....	12
2 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ	14
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	18
ДОДАТОК А. Приклад виконання курсової роботи	19

Навчальне видання

**Павліков Володимир Володимирович
Черепнін Гліб Сергійович**

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2023

Підписано до видання 28.09.2023

Ум. друк. арк. 2,4. Обл.-вид. арк. 2,75. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001