

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра теоретичної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ підпис
ініціали, прізвище

“___” _____ 20__ року

**Кваліфікаційна робота
магістра**

на тему: **МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕПР РАДІОЛОКАЦІЙНИХ
ОБ'ЄКТІВ**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-61
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,
освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»

Максим БУГАЙ

Керівник
кандидат фіз.-мат. наук,
доцент

Максим ЛЕГЕНЬКИЙ

Зміст

1	ВСТУП	3
2	ЕПР СИСТЕМИ ЯСКРАВИХ ТОЧОК	6
2.1	ПОНЯТТЯ ЕПР	6
2.2	РІВНЯННЯ РАДІОЛОКАЦІЇ	7
2.3	ЕПР РЕАЛЬНИХ ЦІЛЕЙ	7
2.4	ЕПР СИСТЕМ ЯСКРАВИХ ТОЧКОВИХ ВІДБИВАЧІВ	8
2.5	НЕКОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК БЕЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ	9
2.6	НЕКОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК З ДИФРАКЦІЙНИМ РОЗСІЮВАННЯМ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ	10
2.7	КОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК БЕЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ	12
2.8	КОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК З ДИФРАКЦІЙНИМ РОЗСІЮВАННЯМ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ	14
2.9	КОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК БЕЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ У ДАЛЬНІЙ ЗОНІ	16
3	НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ	20
3.1	ФУНКЦІЯ АКТИВАЦІЇ	22
3.2	СИГМОЇДА	23
3.3	ТАНГЕНС ГІПЕРБОЛІЧНИЙ	23
3.4	ReLU	24
3.5	ВИКОРИСТАНІ БІБЛІОТЕКИ	25
3.6	ВИЗНАЧЕННЯ ЕПР ТОЧКОВОГО РОЗСІЮВАЧА ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖІ	25
3.7	КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ РОЗСІЮВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖІ	27
4	ВИСНОВКИ	30
5	ЛІТЕРАТУРА	32

1 ВСТУП

Основою активної радіолокації є відбиття електромагнітних хвиль від перешкод (об'єктів) або неоднорідностей. Під даними поняттями розуміються області простору, які суттєво відрізняються своїми електричними і магнітними властивостями від середовища поширення хвиль. Електромагнітна хвиля, яка падає на об'єкт, викликає вимушені коливання вільних і зв'язаних зарядів, які когерентні з коливанням падаючої хвилі. Дані коливання створюють вторинне поле всередині і ззовні об'єкту. У результаті енергія електромагнітної хвилі, що падає на об'єкт, розсіюється у всіх напрямках, у тому числі і в напрямку до радіолокаційної станції. Відбита хвиля, яка прийшла в точку прийому, це відбитий ціллю сигнал. Інтенсивність таких сигналів залежить від дальності до цілі, її геометричного розміру, а також конфігурації відбиваючої поверхні. Для кількісної оцінки інтенсивності вторинного випромінювання вводиться поняття ефективної поверхні розсіювання (ЕПР). Знання характеристик вторинного випромінювання грає важливу роль для розрахунку параметрів радіолокаційних станцій і визначення їх можливостей щодо виявлення різних цілей.

Вторинне випромінювання – випромінювання, яке відбувається через розсіювання енергії електромагнітної хвилі на неоднорідностях, перешкодах чи об'єктах. Самі об'єкти називаються пасивними вторинними випромінювачами. Якщо параметри неоднорідності, такі як діелектрична проникність ϵ та магнітна проникність μ , не співпадають з параметрами середовища, то відбувається вторинне випромінювання радіохвиль. Якщо ж вони рівні, то відбувається поглинання.

Поле вторинного випромінювання визначається параметрами падаючої хвилі і параметрами відбивача. До перших відносяться поляризація і довжина електромагнітної хвилі, а до других – ϵ , μ , розміри і форма об'єкту, його орієнтація відносно фронту падаючої хвилі.

Цілі діляться на зосереджені і розподілені. Зосереджені поділяються на одиничні та групові.

Групова ціль складається з двох або більше незалежних відбивачів. Розподілені цілі мають розміри, більші за розміри роздільного об'єкту.

Штучні нейронні мережі – корисний інструмент для науковців, інженерів, програмістів тощо. Вони дозволяють ефективно виконувати обчислення, де звичайним алгоритмам знадобилося б дуже багато часу або взагалі немає можливості реалізувати вирішення задач класичними алгоритмами. До таких задач відносяться класифікація зображень, розпізнавання друкованого чи рукописного тексту на зображеннях, розпізнавання мови, обличчя, відстаней до

об'єктів, генерація текстів, вирішення складних математичних задач, медицина, архітектура і багато інших.

В даній роботі створено модель розсіяння електромагнітних хвиль на складному радіолокаційному об'єкті. З огляду на те, що для типових радіолокаційних об'єктів суттєвий внесок у відбиття хвиль вносить порівняно невелика кількість ділянок поверхні об'єкту – так званих яскравих точок, в роботі будується модель розсіяння хвиль на низці таких яскравих точок – розсіювачів. Розсіювачі вважаються ізотропними, тобто такими, що однаково розсіюють падаючу на них електромагнітну енергію в усіх напрямках. Кожен із розсіювачів характеризується власною здатністю розсіювати електромагнітну енергію – ефективною поверхнею розсіяння (ЕПР).

В роботі отримано формули для сумарної ЕПР системи із таких розсіювачів, розташованих в різних просторових точках. При цьому може братися до уваги або не братися до уваги інтерференція хвиль, відбитих від різних розсіювачів, тож маємо когерентний та некогерентний випадки. Також відомо, що при поширенні у вільному просторі електромагнітна енергія зменшується завдяки її розсіюванню в різних напрямках – хвиля зазнає дифракційного розсіяння. При отриманні формул для сумарної ЕПР також зроблено спробу врахувати й цей фізичний процес.

У теорії випромінювання антен та у теорії розсіяння хвиль на різноманітних об'єктах вводиться поняття дальньої зони. Це відстань, на якій випромінена чи розсіяна хвилю можна вважати плоскою. Зазвичай всі вимірювання прийнято проводити саме в дальній зоні по відношенню як до випромінюючої антени, так і до розсіювача. Поняття ЕПР також визначається саме в дальній зоні, зокрема у формулі, яка є визначенням ЕПР фігурує межа, коли відстань до приймальної антени R прямує до нескінченності.

При отриманні формули для ЕПР низки розсіювачів для дальньої зони вважається, що випромінююча та приймальна антени розташовано в дальній зоні, тому промені в напрямку від випромінюючої антени до розсіювача і в напрямку від розсіювача до приймальної антени вважаються паралельними і різниця фаз хвиль, відбитих від різних розсіювачів виявляється зумовленою їх розташуванням різних просторових точках. Із простих геометричних міркувань вдається отримати цю різницю і виключити із отриманих формул відстані до передавальної та приймальної антен.

Також отримано вищевказані формули і для ближньої зони, коли не робиться припущення про паралельність променів в напрямку приймальної та передавальної антен і відстані до них фігурують в явному вигляді.

Отримані моделі можуть використовуватися для характеризування розсіяння хвиль на складному великогабаритному об'єкті, але при цьому виникає задача у побудові такої моделі для конкретного об'єкта. Дана задача може

розглядатися як складна інтерполяційна задача із великою кількістю параметрів. Останнім часом для вирішення таких задач успішно використовуються нейронні мережі. Нейронна мережа отримує на вхід низку якихось значень й на основі відповідних перетворень вхідних даних всередині мережі отримується результат. При цьому спочатку мережі надається низка вхідних параметрів та відповіді для них і на основі аналізу цих даних мережа формує процеси перетворення вхідних даних на вихідні – відбувається навчання мережі. Інколи мережі навіть не надаються вихідні відповіді і мережа інтерпретує отримані дані власноруч.

В даній роботі вирішено використати нейронну мережу для побудови вищеописаної моделі об'єкта складної форми. Побудовано декілька мереж, що на основі діаграми зворотного розсіяння роблять висновки про ЕПР розсіювачів або їх кількість. В подальшому роботу планується розвинути задля повного отримання моделі об'єкта складної форми у вигляді низки розсіювачів на основі аналізу діаграми зворотного розсіяння, що дозволить швидко отримувати таку модель для складного типового радіолокаційного об'єкта.

2 ЕПР СИСТЕМИ ЯСКРАВИХ ТОЧОК

2.1 ПОНЯТТЯ ЕПР

Поняття ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) широко використовується в у різних областях фізики: розсіювання світла, когерентна оптика, атомна фізика тощо. В радіофізиці має велике значення для радіолокації. Існує два види ЕПР: диференціальна й інтегральна. Перше найчастіше використовується на практиці, тому зазвичай називається просто ЕПР.

ЕПР – характеристика тіла, що розсіює. За допомогою неї визначають здатність тіла розсіювати падаючу хвилю. Розсіяна хвиля має певну поляризацію та поширюється у напрямі до приймача. В такому випадку ЕПР пропорційна відношенню інтенсивності розсіяного поля біля приймача до інтенсивності падаючого поля на об'єкт (рис. 2.1).

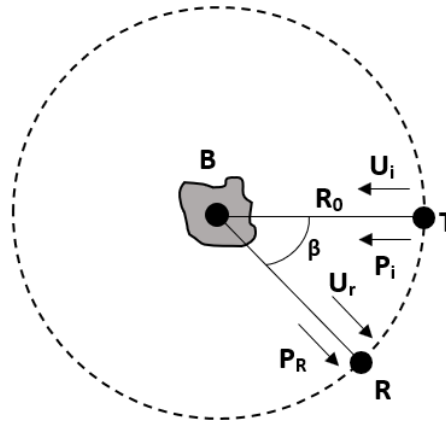


Рис. 2.1. Довільне тіло, що розсіює.

Нехай у якості тіла, що розсіює виступає ідеальне ізотропне тіло. В такому випадку енергія буде розсіюватися в усіх напрямках однаково. Вважаючи, що відстань R_0 достатньо велика, щоб вважати, що падаюча хвиля плоска, можна обчислити потужність, яку розсіює таке тіло:

$$P_r = \lim_{R_0 \rightarrow \infty} 4\pi R_0^2 \Pi_r. \quad (2.1)$$

З іншого боку:

$$P_i = \sigma \Pi_i, \quad (2.2)$$

де σ – ЕПР – площа поверхні ідеального ізотропного тіла. Із рівнянь (2.1) і (2.2) випливає, що:

$$\sigma = \lim_{R_0 \rightarrow \infty} 4\pi R_0^2 \frac{\Pi_r}{\Pi_i} = \lim_{R_0 \rightarrow \infty} 4\pi R_0^2 \left(\frac{U_i}{U_r} \right)^2. \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) справедливе для великих значень R_0 , бо тоді густини потоків падаючої і розсіяної хвиль Π_i та Π_r пропорційні квадратам амплітуд падаючої та відбитої хвиль U_i та U_r . [3]

2.2 РІВНЯННЯ РАДІОЛОКАЦІЇ

Для обчислення дальності визначення цілі, можна підставити значення ЕПР об'єкта в рівняння радіолокації. Для випадку, коли випромінений та прийнятий сигнали мають одну й ту ж поляризацію, воно має вигляд:

$$P_{np} = \left(\frac{P_{пер} G}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R^2} \right) S_{эф}, \quad (2.4)$$

де $P_{пер}$ – потужність, яку випромінює передавач, P_{np} – потужність хвилі, яку отримує приймач, G – коефіцієнт підсилення передавальної антени, R – відстань до цілі, $S_{эф}$ – ефективна площа приймальної антени, σ – ЕПР цілі.

Для бістатичного випадку рівняння радіолокації матиме вигляд:

$$P_{np} = \left(\frac{P_{пер} G}{4\pi R_{пер}^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R_{np}^2} \right) S_{эф}, \quad (2.5)$$

де $R_{пер}$ – відстань від цілі до передавача, R_{np} – відстань від цілі до приймача. [1]

2.3 ЕПР РЕАЛЬНИХ ЦІЛЕЙ

Більшість реальних цілей мають розміри значно більші, ніж довжина хвилі, якою вони опромінюються. Діаграми кутової залежності відбитого випромінювання мають багато пелюсток, бо на таких цілях наявні нерівності, які відбивають хвилі в різних напрямках, що призводить до складної кутової залежності. Тому ЕПР таких цілей має нелінійний характер і залежить як від

падаючого випромінювання, так і від самої цілі, що робить моделювання надзвичайно складним, а іноді неможливим. Через це ЕПР реальних цілей вимірюють експериментально.[4]

2.4 ЕПР СИСТЕМ ЯСКРАВИХ ТОЧКОВИХ ВІДБИВАЧІВ

Нехай задано систему з N точок. Відстань від початку координат до передавальної антени становить R_1 , а до приймальної – R_2 . n_1 і n_2 – одиничні вектори, які задають напрями до передавальної і приймальної антени відповідно. Координати кожної точки задаються відповідними радіус-векторами r_i , а їх ЕПР – σ_i (рис. 2.2).

Вважаємо, що кожна із вказаних точок однаково розсіює падаючу на неї електромагнітну енергію в усіх напрямках, тобто є так званим ізотропним розсіювачем. Тобто падаючий та відбитий сигнал для кожної із таких точок пов'язані один із одним співвідношенням (2.3).

Нижче отримаємо ЕПР для системи із таких розсіювачів, тобто співвідношення між сигналом, що падає на такі розсіювачі та сумарним сигналом, що потрапляє до приймальної антени від кожного із таких розсіювачів.

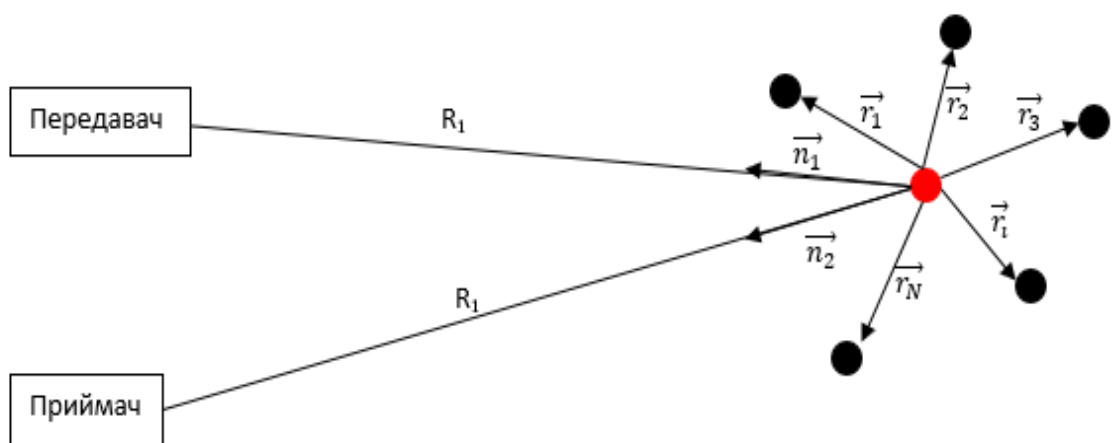


Рис. 2.2. Система точок.

2.5 НЕКОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК БЕЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ

Для некогерентного випадку без дифракційного розсіювання сумарна ЕПР системи буде визначатися як сума всіх точок:

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sigma_i . \quad (2.6)$$

При цьому ми нехтуємо тим, що хвилі відбиті від різних розсіювачів мають різну фазу і за рахунок інтерференції при додаванні можуть як збільшитись, так і зменшитись. Аналогом такої системи є один розсіювач, розміщений на початку координат, ЕПР якого рівна сумі ЕПР всіх точок (рис. 2.3).

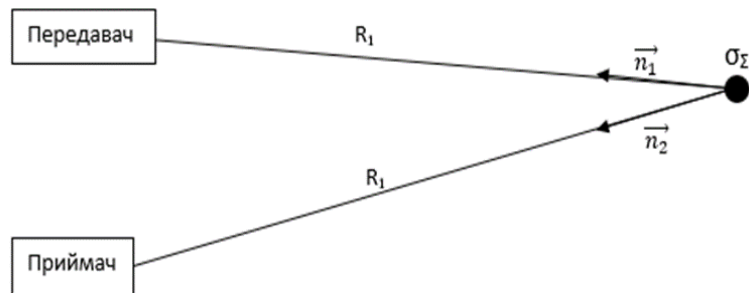


Рис. 2.3. ЕПР однієї точки.

Зрозуміло, що діаграма зворотного розсіювання такої низки розсіювачів не матиме залежності від кута і представлятиме собою коло з відповідним радіусом (див. Рис. 2.4.).

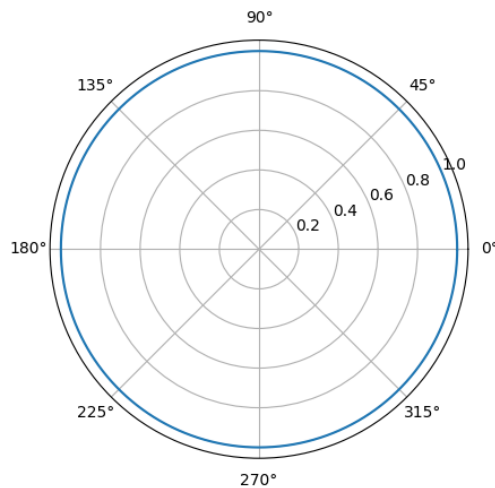


Рис. 2.4. ЕПР однієї точки для моностатичного випадку.

2.6 НЕКОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК З ДИФРАКЦІЙНИМ РОЗСІЮВАННЯМ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ

Дещо складнішим випадком для дослідження є врахування дифракційного розсіювання – залежності потоку падаючої і відбитої потужності від відстані. Для розрахунків необхідно ввести наступні величини: \vec{R}_{1l} – вектор, який спрямовано від передавача до і-ої точки, \vec{R}_{2l} – вектор, який спрямовано від приймача до і-ої точки. Із простих геометричних міркувань, зрозуміло, що ці вектори будуть визначатися наступним чином через радіус-вектор і-ої точки, одиничні вектори в напрямку випромінювача та приймача і відповідні відстані

$$\vec{R}_{1i} = \vec{r}_i - R_1 \vec{n}_1, \quad (2.7)$$

$$\vec{R}_{2i} = \vec{r}_i - R_2 \vec{n}_2. \quad (2.8)$$

Із простих фізичних міркувань зрозуміло, що сигнал, відбитий від системи розсіювачів, буде зменшуватися пропорційно до квадрату відстані:

$$U_{inp}^2 = \frac{U_{inep}^2}{R_{1i}^2 R_{2i}^2} = \frac{U_{inep}^2}{(\vec{r}_i - R_1 \vec{n}_1)^2 (\vec{r}_i - R_2 \vec{n}_2)^2}. \quad (2.9)$$

Таким чином, сумарний сигнал в приймальній антені буде визначатися як сума сигналів від різних розсіювачів:

$$U_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{U_i^2}{(\vec{r}_i - R_1 \vec{n}_1)^2 (\vec{r}_i - R_2 \vec{n}_2)^2}. \quad (2.10)$$

З огляду на те, що ЕПР розсіювача є пропорційним до квадрату амплітуди сигналу $\sigma = U_{прийм}^2$, то формула (2.10) набуває наступного вигляду:

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{(\vec{r}_i - R_1 \vec{n}_1)^2 (\vec{r}_i - R_2 \vec{n}_2)^2}. \quad (2.11)$$

ЕПР даної системи в залежності від відстані до передавача і відбивача зображено на Рис. 2.5 та Рис. 2.6. На Рис. 2.5 представлено діаграми зворотного розсіяння для системи із трьох точок. Ці точки розташовано у вершинах рівностороннього трикутника, сторона якого дорівнює $a=1$ м, початок координат співпадає з центром трикутника. Діаграми представлено для різних значень відстані від 0.05 до 1 метра від початку координат до сфери спостереження, довжина хвилі становить $\lambda=1$ м. Кут на Рис. 2.5 представляє собою азимутальний кут в площині, перпендикулярній до площини трикутника.

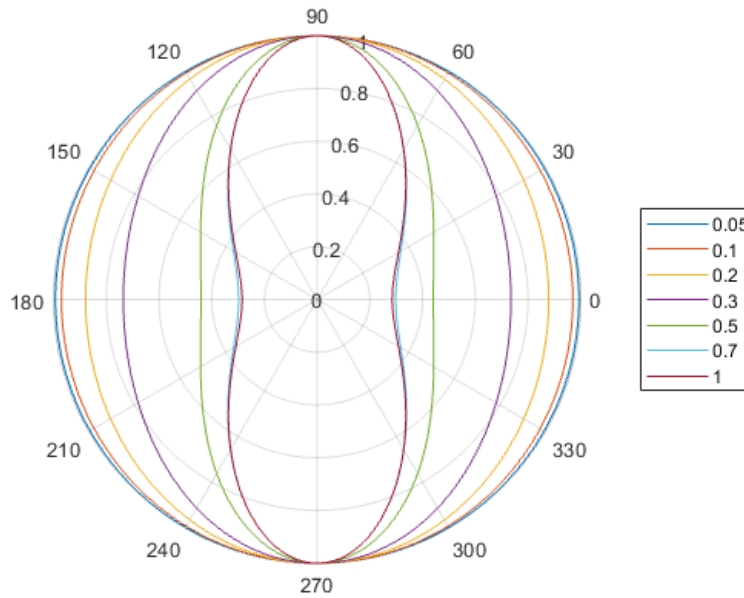


Рис. 2.5. ЕПР системи з трьох точок.

На Рис. 2.6 представлено діаграму зворотного розсіювання системи з чотирьох точок, які розташовані на вершинах квадрату зі стороною $a=1\text{ м}$, довжина хвилі становить $\lambda=1\text{ м}$, при цьому початок координат співпадає із геометричним центром квадрату. Діаграму побудовано для таких же значень кута, як вказано вище. Обхід по колу відбувається в площині, перпендикулярній площині квадрату.

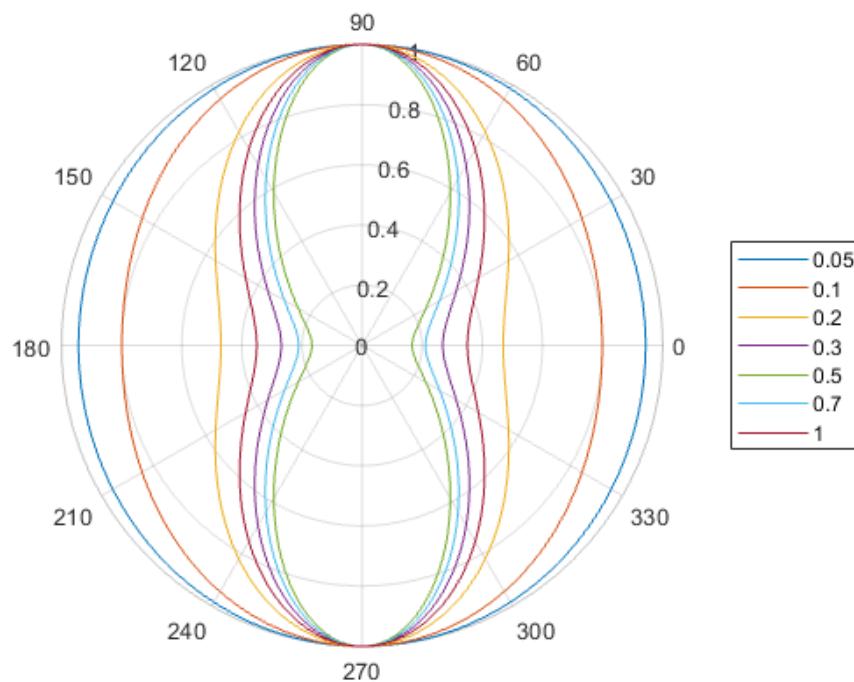


Рис. 2.6. ЕПР системи з чотирьох точок.

Як видно на Рис.2.6 на невеликій відстані від системи розсіювачів діаграма розсіяння виявляється майже ізотропною. Натомість при збільшенні відстані на діаграмі розсіяння починають формуватися дві пелюстки в напрямках 0 та 180 градусів, що відповідають напрямкам нормалей до площини квадрату.

2.7 КОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК БЕЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ

У задачі розсіювання хвилі на системі точок можна також враховувати фазу сигналу.

Будемо вважати, що на вхід приймача надходить гармонічний сигнал вигляду:

$$U_{ex} = U_{m\Sigma} \cos(\omega t - \varphi_\Sigma - \varphi_0). \quad (2.12)$$

Із простих тригонометричних міркувань цей вираз можна перетворити до наступного вигляду

$$U_{ex} = U_\Sigma \cos(\omega t - \varphi_0) \cos(\varphi_\Sigma) + U_\Sigma \sin(\omega t - \varphi_0) \sin(\varphi_\Sigma). \quad (2.13)$$

З іншого боку сигнал на вході приймальної антени повинен представляти собою суму гармонічних сигналів, що надійшли від кожного розсіювача. При цьому сигнали від кожного із розсіювачів теж представлятимуть собою гармонічні сигнали із різними набігами фази

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{1i} + R_{2i}). \quad (2.14)$$

Після прирівнювання суми гармонічних сигналів від кожного із розсіювачів до сигналу (2.12) та простих перетворень отримуємо систему рівнянь

$$U_{m\Sigma}^2 \cos^2 \varphi_\Sigma = \left(\sum_i^N \cos \Delta\varphi_i \right)^2 = \sum_i^N \cos \Delta\varphi_i \sum_j^N \cos \Delta\varphi_j, \quad (2.15)$$

$$U_{m\Sigma}^2 \sin^2 \varphi_\Sigma = \left(\sum_i^N \sin \Delta\varphi_i \right)^2 = \sum_i^N \sin \Delta\varphi_i \sum_j^N \sin \Delta\varphi_j. \quad (2.16)$$

Після додавання рівнянь (2.15) та (2.16) отримуємо вираз для амплітуди сигналу в приймачі

$$U_{m\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^N (U_{mi} U_{mj} \cos \Delta\varphi_i \cos \Delta\varphi_j + U_{mi} U_{mj} \sin \Delta\varphi_i \sin \Delta\varphi_j). \quad (2.17)$$

Враховуючи, що $\sigma = U_{\text{прієм}}^2$, рівняння (2.17) через ЕПР розсіювачів записуватиметься як:

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N (\sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \Delta\varphi_i \cos \Delta\varphi_j + \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \sin \Delta\varphi_i \sin \Delta\varphi_j), \quad (2.18)$$

або з урахуванням формул (2.7) та (2.8)

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N \left(\begin{aligned} & \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_i - R_1 \vec{n}_1 - R_2 \vec{n}_2|^* \\ & * \cos \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_j - R_1 \vec{n}_1 - R_2 \vec{n}_2| + \\ & + \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \sin \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_i - R_1 \vec{n}_1 - R_2 \vec{n}_2|^* \\ & * \sin \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_j - R_1 \vec{n}_1 - R_2 \vec{n}_2| \end{aligned} \right). \quad (2.19)$$

Діаграма розсіювання зображена на рис. 2.7 та рис. 2.8. На Рис. 2.7 представлено діаграми зворотного розсіяння для системи із трьох точок. Ці точки розташовано у вершинах рівностороннього трикутника, сторона якого дорівнює $a=1\text{м}$, початок координат співпадає з центром трикутника. Діаграми представлено для різних значень відстані від 0.05 до 200 метрів від початку координат до сфери спостереження. Кут на Рис. 2.7 представляє собою азимутальний кут в площині, перпендикулярній до площини трикутника. Графік дальньої зони представлено для дуже великих R ($R \rightarrow \infty$).

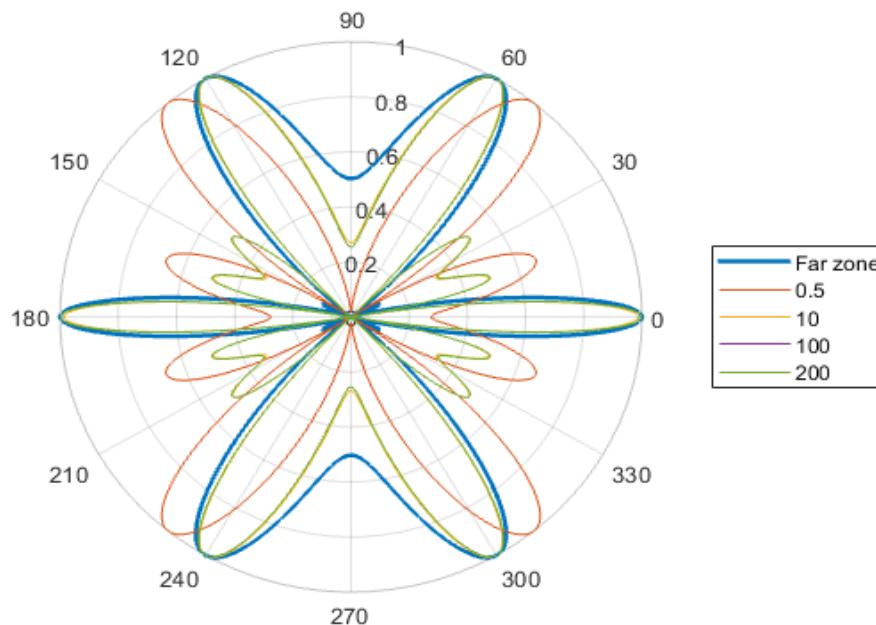


Рис. 2.7. ЕПР системи з 3 точок.

На рис. 2.8 представлено аналогічні діаграми для 4 точок, розміщених на вершинах квадрату зі стороною $a=1$ м та геометричним центром на початку координат. Довжина хвилі становить $\lambda=1$ м.

Як видно з діаграми, при збільшенні відстані до точок графіки ближньої і дальньої зон починають співпадати. Пелюсткова структура графіків зумовлена інтерференцією хвилі на системі точок.

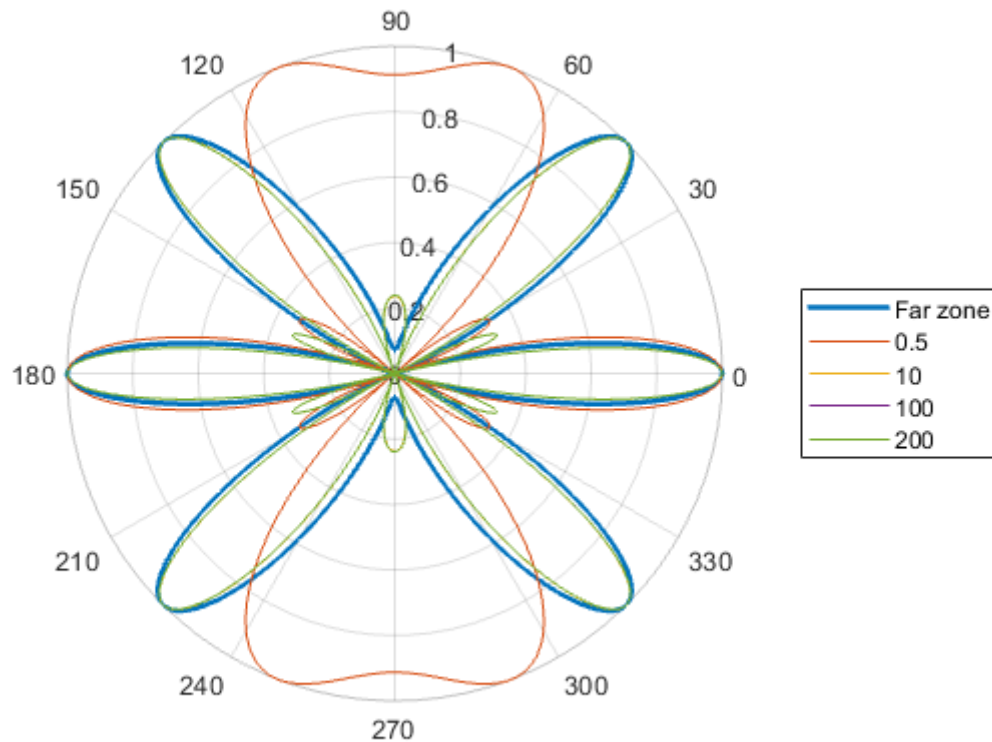


Рис. 2.8. ЕПР системи з 4 точок.

2.8 КОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК З ДИФРАКЦІЙНИМ РОЗСІЮВАННЯМ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ

Найскладнішим випадком розсіювання є об'єднання двох попередніх. Тобто при цьому враховується і дифракційне розсіювання, і різниця фаз між сигналами, відбитими від різних розсіювачів. З рівнянь (2.9) та (2.17) отримуємо наступну формулу для квадрату сумарного сигналу в приймачі:

$$U_{m\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^N \left(\frac{U_{mi}U_{mj}}{R_{1i}R_{2i}R_{1j}R_{2j}} \cos \Delta\varphi_i \cos \Delta\varphi_j + \frac{U_{mi}U_{mj}}{R_{1i}R_{2i}R_{1j}R_{2j}} \sin \Delta\varphi_i \sin \Delta\varphi_j \right). \quad (2.20)$$

Враховуючи вирази для векторів \vec{R}_{1l} та \vec{R}_{2l} (2.7), (2.8) та зв'язок між квадратом амплітуди і ЕПР $\sigma = U_{\text{прийм}}^2$ отримуємо:

$$U_{m\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^N \left(\begin{aligned} & \frac{\sqrt{\sigma_{mi}\sigma_{mj}}}{(\vec{r}_i - R_1\vec{n}_1)(\vec{r}_i - R_2\vec{n}_2)(\vec{r}_j - R_1\vec{n}_1)(\vec{r}_j - R_2\vec{n}_2)} * \\ & * \cos \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_i - R_1\vec{n}_1 - R_2\vec{n}_2| \cos \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_j - R_1\vec{n}_1 - R_2\vec{n}_2| + \\ & + \frac{\sqrt{\sigma_{mi}\sigma_{mj}}}{(\vec{r}_i - R_1\vec{n}_1)(\vec{r}_i - R_2\vec{n}_2)(\vec{r}_j - R_1\vec{n}_1)(\vec{r}_j - R_2\vec{n}_2)} * \\ & * \sin \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_i - R_1\vec{n}_1 - R_2\vec{n}_2| \sin \frac{2\pi}{\lambda} |2\vec{r}_j - R_1\vec{n}_1 - R_2\vec{n}_2| \end{aligned} \right). \quad (2.21)$$

Графіки для 3 та 4 точок представлені на рис. 2.9 та 2.10. На рис. 2.9 зображені діаграми розсіювання для трикутника зі стороною $a=1$ м і геометричним центром на початку координат і відстанню до передавача і приймача від 0.05 м до 1 м. На рис. 2.10 зображено аналогічні діаграми для точок, розміщених на вершинах квадрату зі стороною $a=1$ м і геометричним центром на початку координат.

Дані графіки не багатопелюсткові, так як при малих відстанях до точок вплив згасання хвилі, а також інтерференція має несуттєве значення через велику довжину хвилі у порівнянні з відстанню.

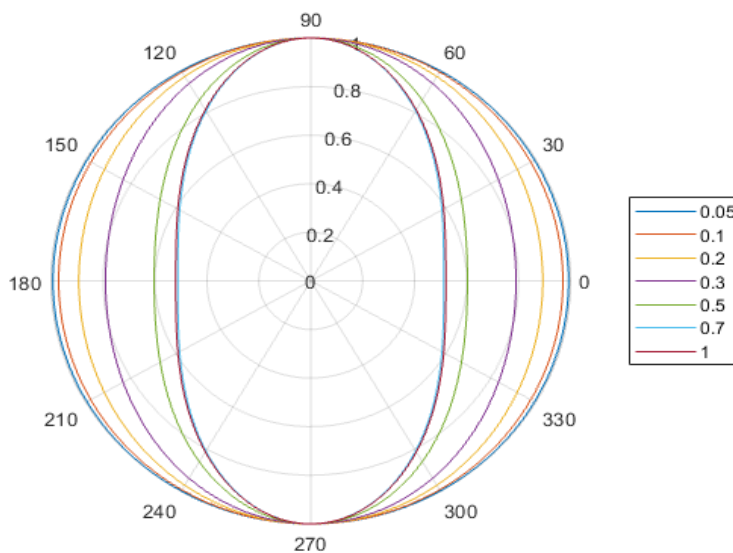


Рис. 2.9. ЕПР системи з 3 точок.

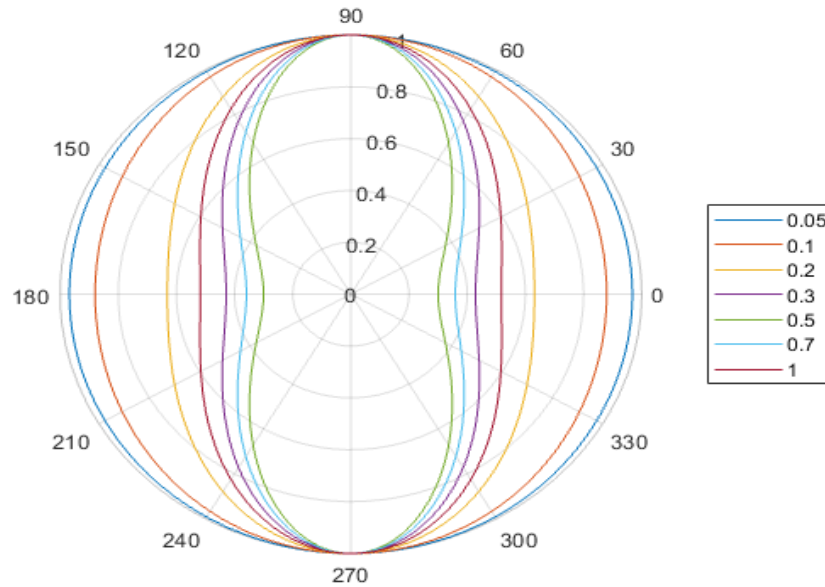


Рис. 2.10. ЕПР системи 4 точок.

2.9 КОГЕРЕНТНИЙ ВИПАДОК БЕЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ У ДАЛЬНІЙ ЗОНІ

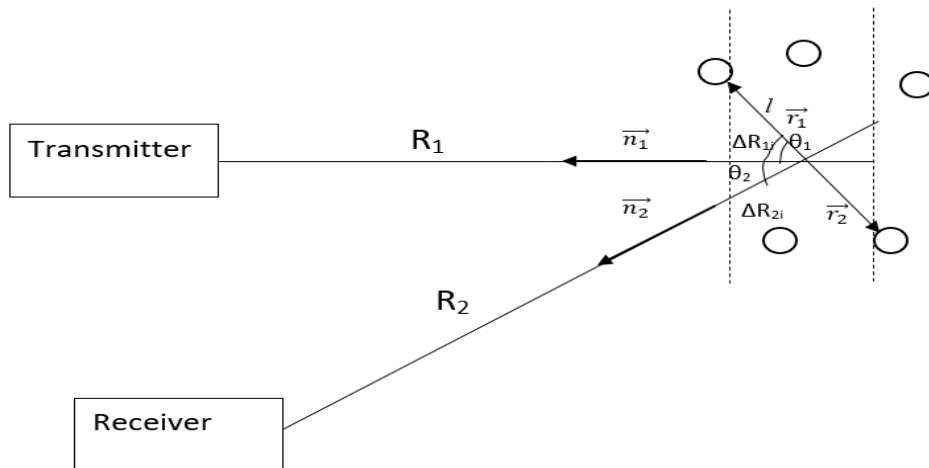


Рис. 2.11. Система N розсіювачів у дальній зоні.

Для дальньої зони можна вважати, що $R_1 \rightarrow \infty$ та $R_2 \rightarrow \infty$. Тому промені від розсіювача до приймальної антени та від розсіювача до передавальної антени можна вважати паралельними і різниця між ними буди проявлятися лише поблизу початку координат через різні напрямки на приймач та розсіювач. Аналогічним чином і фаза сигналу в приймачі буде залежати лише від відстані

між двома точками вздовж напрямку на передавальну й приймальну антени (рис. 2.11).

Вважатимемо, що різниця ходу від передавача до i -ої точки становитиме ΔR_{1i} , а до приймача – ΔR_{2i}

$$\Delta R_{1i} = \vec{n}_1 \vec{r}_i, \quad (2.22)$$

$$\Delta R_{2i} = \vec{n}_2 \vec{r}_i. \quad (2.23)$$

Нехай на вході приймача маємо гармонічний сигнал, який становить:

$$U_{\text{вх}} = U_{m\Sigma} \cos(\omega t - \varphi_\Sigma - \varphi_0), \quad (2.24)$$

де $U_{m\Sigma}$ – сумарна амплітуда випромінювання, що падає на всі розсіювачі. Застосовуючи до (2.24) формулу для косинусу різниці отримуємо

$$U_{\text{вх}} = U_{m\Sigma} \cos(\omega t - \varphi_0) \cos(\varphi_\Sigma) + U_{m\Sigma} \sin(\omega t - \varphi_0) \sin(\varphi_\Sigma). \quad (2.25)$$

Так як у дальній зоні можна вважати, що для кожного розсіювача $\omega t = \text{const}$ та $\varphi_0 = \text{const}$, то $U_{\text{вх}}$ буде залежати лише від φ_Σ .

$$U_{m\Sigma}^2 \cos^2 \varphi_\Sigma = \left(\sum_i^N \cos \Delta \varphi_i \right)^2 = \sum_i^N \cos \Delta \varphi_i \sum_j^N \cos \Delta \varphi_j, \quad (2.26)$$

$$U_{m\Sigma}^2 \sin^2 \varphi_\Sigma = \left(\sum_i^N \sin \Delta \varphi_i \right)^2 = \sum_i^N \sin \Delta \varphi_i \sum_j^N \sin \Delta \varphi_j, \quad (2.27)$$

де різниця фази із описаних вище геометричних міркувань приймає наступний вигляд

$$\Delta \varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta R_{1i} + \Delta R_{2i}) = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 \vec{r}_i + \vec{n}_2 \vec{r}_i). \quad (2.28)$$

Тоді квадрат амплітуди сумарного сигналу в приймальній антені дорівнюватиме

$$U_{m\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^N (U_{mi} U_{mj} \cos \Delta \varphi_i \cos \Delta \varphi_j + U_{mi} U_{mj} \sin \Delta \varphi_i \sin \Delta \varphi_j). \quad (2.29)$$

Беручи до уваги, що амплітуда сигналу пов'язана з ЕПР розсіювача як $\sigma = U^2$, можна записати рівняння (2.29) у вигляді:

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N (\sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \Delta \varphi_i \cos \Delta \varphi_j + \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \sin \Delta \varphi_i \sin \Delta \varphi_j). \quad (2.30)$$

Підставивши (2.28) в (2.30), отримуємо наступну формулу для визначення сумарної ЕПР системи точок.

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N \left(\begin{array}{l} \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 r_i + \vec{n}_2 r_i) \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 r_j + \vec{n}_2 r_j) + \\ + \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 r_i + \vec{n}_2 r_i) \sin \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 r_j + \vec{n}_2 r_j) \end{array} \right). \quad (2.31)$$

Нижче наведено результати розрахунку за допомогою формули (2.31) для різних випадків розміщення точок. На рис. 2.12 зображено діаграму зворотного розсіювання для двох точок, відстань між якими становить 1 м і які розміщені симетрично відносно початку координат вздовж осі x. Обхід точок по колу відбувається у площині точок, при цьому напрямки, які відповідають осі, на якій лежать точки, становлять 0° і 180° . Довжина хвилі становить $\lambda=1$ м.

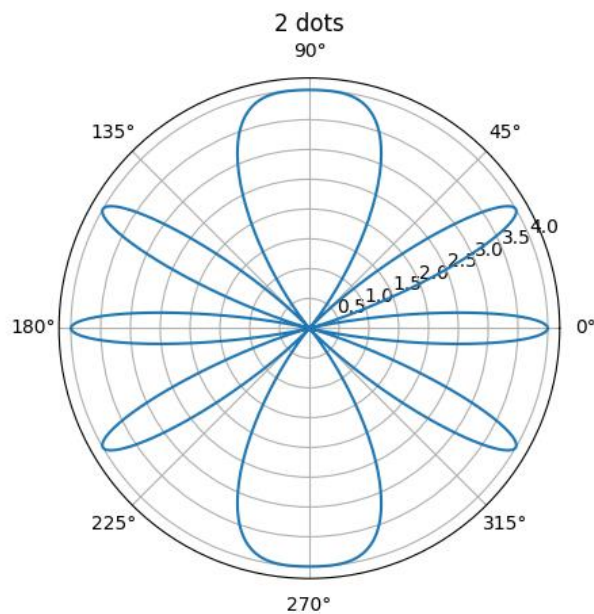


Рис. 2.12. ЕПР системи 2 точок.

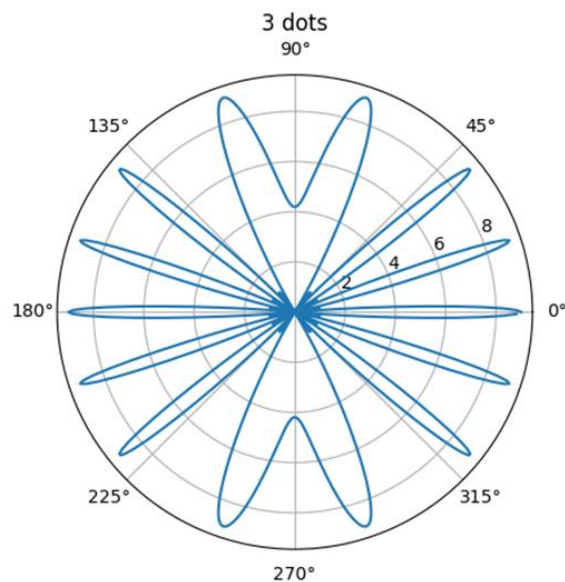


Рис. 2.13. ЕПР системи 3 точок.

На рис 2.13 зображено діаграму зворотного розсіювання для точок, розміщених на вершині рівностороннього трикутника зі стороною $a=1$ м і геометричним центром на початку координат. Кут на діаграмі відповідає азимутальному куту, що лежить в площині, перпендикулярній до площини точок.. Довжина хвилі становить $\lambda=1$ м.

На рис. 2.14 зображено діаграму зворотного розсіювання для точок, що розміщені на вершинах квадрату зі стороною $a=1$ м і геометричним центром на початку координат.

Для всіх трьох випадків кути 0° та 180° відповідають напрямку спостереження вздовж нормалі до площини фігур.

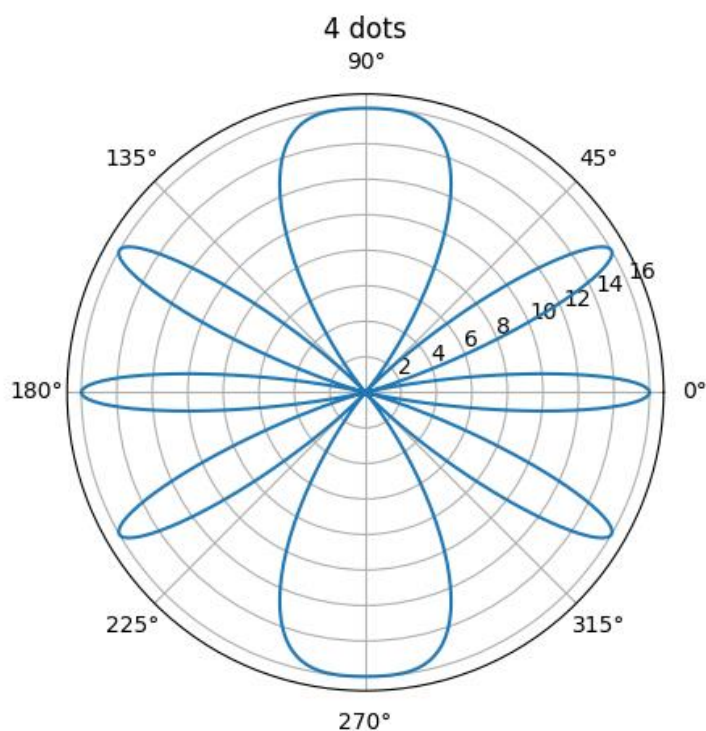


Рис. 2.14. ЕПР системи 4 точок.

Положення точок для всіх випадків вище зображено на рис. 2.15, 2.16, 2.17.

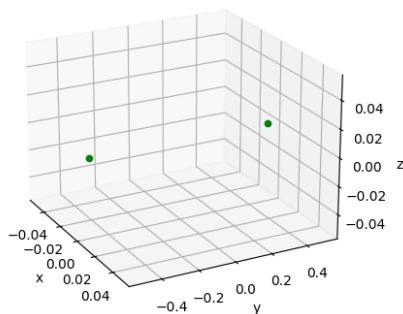


Рис. 2.15. Положення 2 точок.

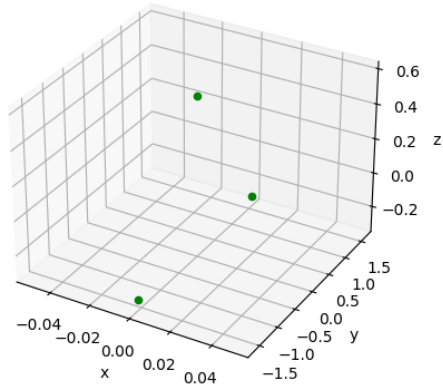


Рис. 2.16. Положення 3 точок.

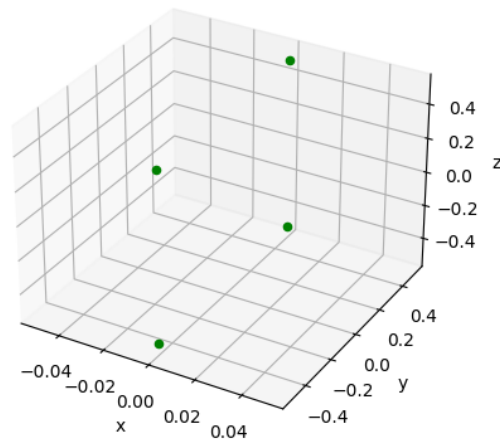


Рис. 2.17. Положення 4 точок.

3 НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ

Останнім часом популярним методом розв'язання багатьох технічних задач стало застосування нейронних мереж. Нижче нейронні мережі застосовуються для визначення параметрів моделі розсіяння хвиль на складному радіолокаційному об'єкті – низки ізотропних розсіювачів. Дані розсіювачі можуть відрізнятися значенням ЕПР для кожного із них і їхнім геометричним положенням. Також можна поставити мережі задачу визначити кількість розсіювачів, що створюють ту чи іншу діаграму розсіяння.

Нейронні мережі створюють за аналогією з людським мозком. Біологічний нейрон має рецептори – дендрити, які приймають сигнали від інших клітин, а також довгі відростки – аксони, які передають сигнали до інших клітин. Тіло клітини – сома – розпізнає сигнали, а також відправляє сигнали до інших клітин.[9]

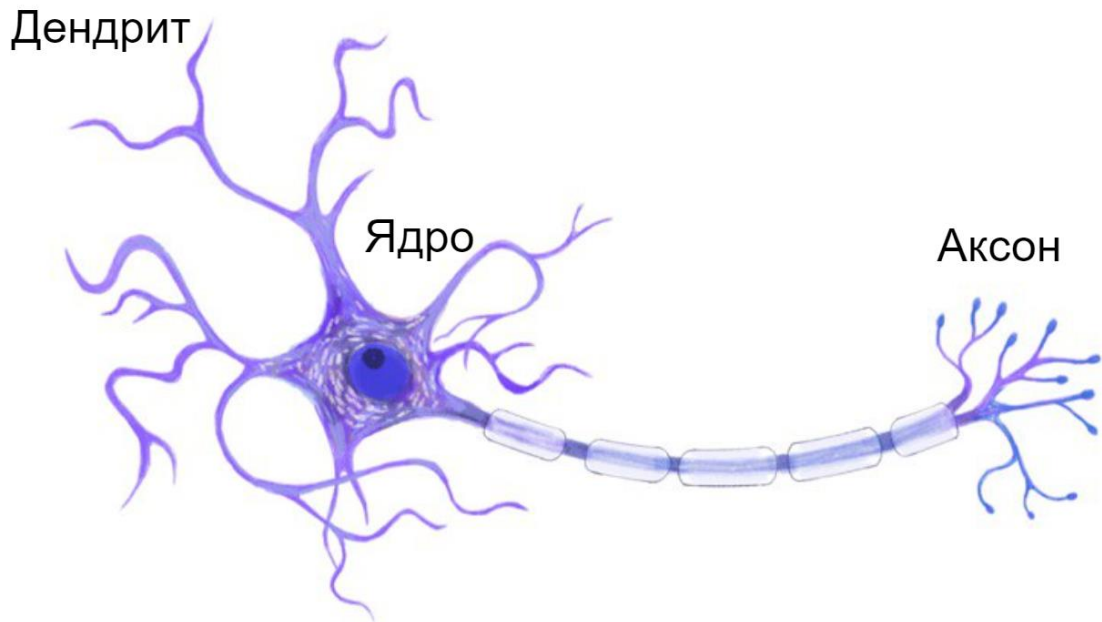


Рис. 3.1. Нейрон.

Нейронні мережі по суті імітують роботу людського мозку. Штучні нейронні мережі складаються з великої кількості простих процесорів (вузлів), які з'єднані між собою зв'язками, які мають певні вагові коефіцієнти. Кожен вузол отримує на вхід певну інформацію і в залежності від неї видає певний результат на вихід (рис. 3.2).

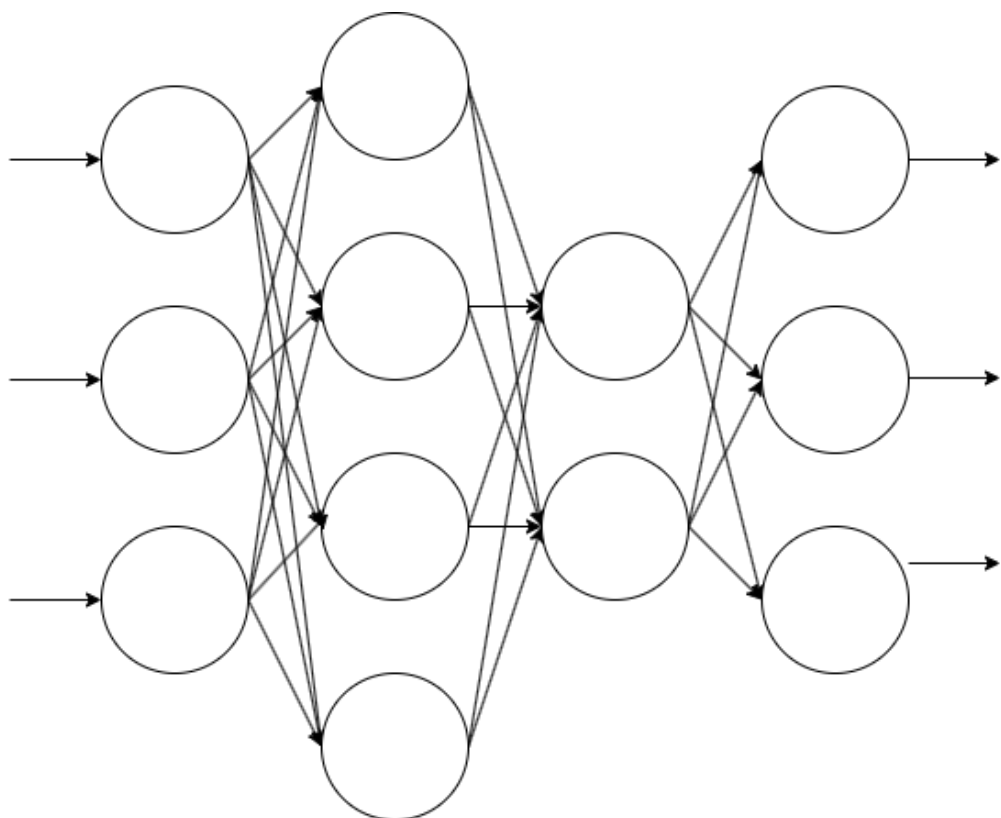


Рис. 3.2. Схема штучної нейронної мережі.

Кожен штучний нейрон отримує інформацію від багатьох інших та видає її багатьом іншим. Але такий процесор не має велику потужність: він генерує числовий результат з простим числовим значенням. При цьому, обробка всередині кожного окремого виконується за нелінійним алгоритмом(рис. 3.3). [8]

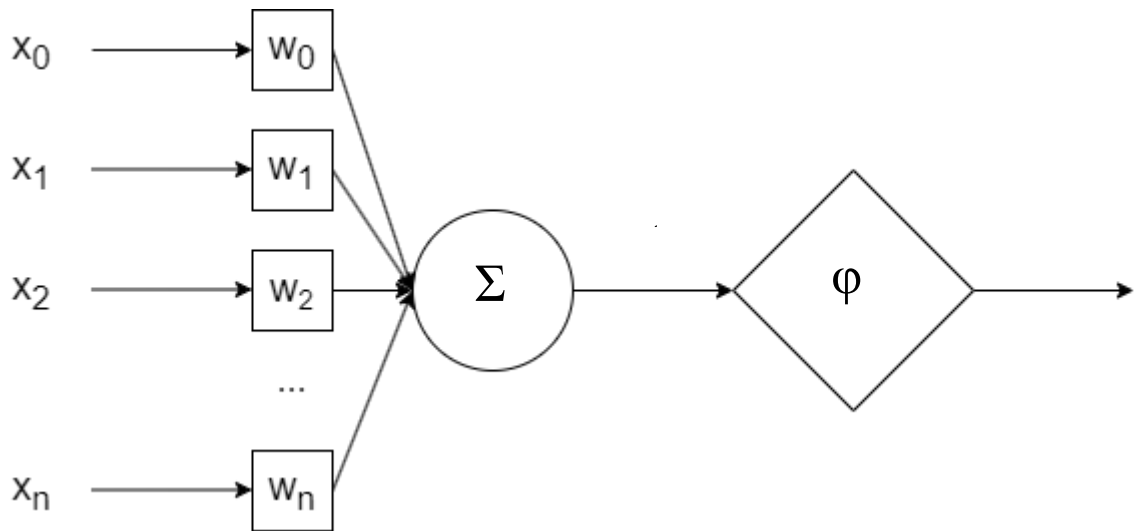


Рис. 3.3. Штучний нейрон.

Кожен штучний нейрон спочатку сумує отримані числа на вході, які помножені на певні вагові коефіцієнти. Отримане значення далі підставляється до функції активації, область значень якої зазвичай знаходиться в межах від 0 до 1 або від -1 до 1. Також у кожного нейрона є один вхід, на який надходить тільки ± 1 та ваговий коефіцієнт якого дорівнює зміщенню b_k .

У математичному вигляді нейрон обробляє інформацію наступним чином:

$$v_k = \sum_{m=0}^n x_m w_m, \quad (3.1)$$

де n – кількість вхідних сигналів у штучному нейроні.

$$y_k = \varphi(v_k). \quad (3.2)$$

$\varphi(\cdot)$ – функція активації нейрону.

3.1 ФУНКЦІЯ АКТИВАЦІЇ

Функція активації нейрону представляє собою спеціальна функція, яка визначає, чи буде нейрон активуватися чи ні. Завдяки цьому вона фактично «відсіює» непотрібну для обчислень інформацію на вході, залишаючи лише необхідну.[11]

Нижче розгляну деякі функції активації, які найчастіше використовуються у штучних нейронних мережах.

3.2 СИГМОЇДА

Сигмоїда – функція, яка отримує на вхід будь-яке число і видає на вихід число в межах від 0 до 1. Чим більше число, тим ближче воно до 1, і навпаки. Вона задається наступною формулою:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (3.3)$$

Графік даної функції зображено на рис.3.4.[8]

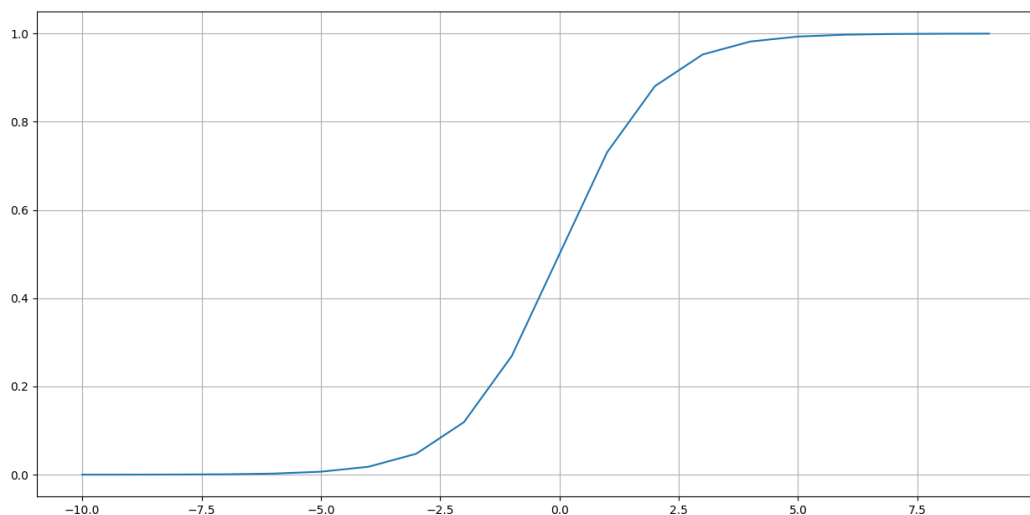


Рис. 3.4. Сигмоїда.

3.3 ТАНГЕНС ГІПЕРБОЛІЧНИЙ

Гіперболічний тангенс є дуже схожим на сигмоїду і має таку ж S-подібну форму, але область його значень знаходиться в межах від -1 до 1.[9]

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \quad (3.4)$$

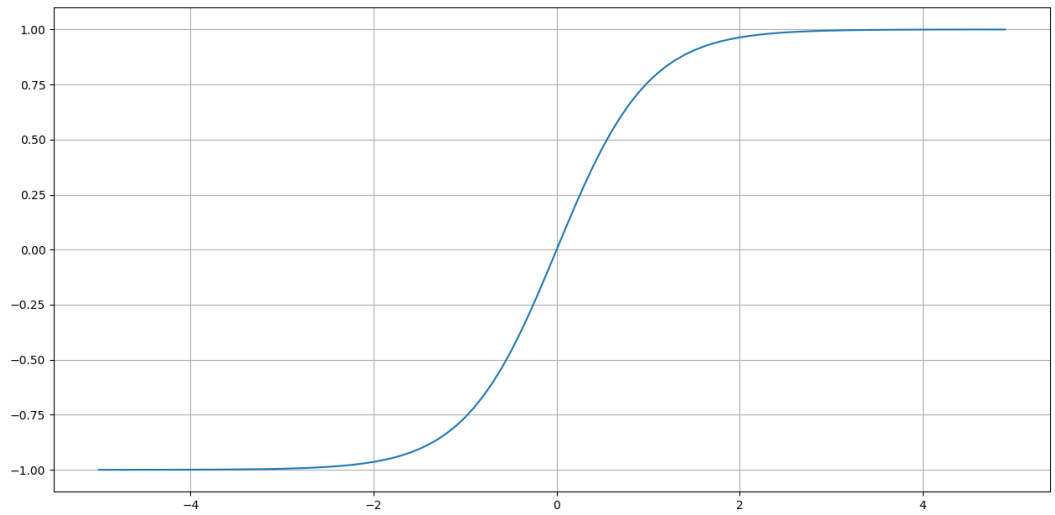


Рис. 3.5. Тангенс гіперболічний.

3.4 ReLU

ReLU (Rectified linear unit – випрямлений лінійний вузол) – функція, яка має область значень у межах від 0 до ∞ і визначається наступною формулою:

$$f(x) = \max(0, x). \quad (3.5)$$

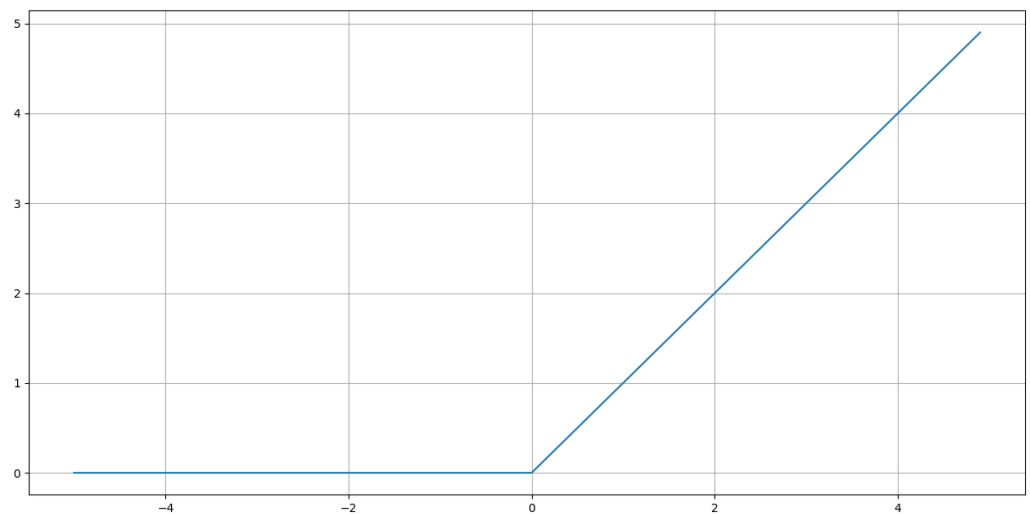


Рис. 3.6. Relu.

Недолік даної функції – поява «мертвих» нейронів, які ніколи не активуються через занулення всіх значень, які менше 0. [10]

3.5 ВИКОРИСТАНІ БІБЛІОТЕКИ

Так як системи точок мають дуже складну сумарну ЕПР, було вирішено використовувати нейромережі для полегшення роботи. Для створення моделей штучних нейронних мереж було використано мову програмування Python та бібліотеки для неї, такі як TensorFlow, Keras та NumPy.

Бібліотека NumPy використовується для числових, векторних та матричних обчислень. Має багато вбудованих функцій для маніпулювання із векторами та матрицями.[12]

Бібліотеки TensorFlow та Keras використовуються для побудови нейронних мереж. Але перша також дозволяє маніпулювати тензорами, що відкриває можливість низькорівневого проектування нейромереж. Keras у свою чергу має великий вибір вбудованих функцій та класів, які дозволяють створювати штучні нейронні мережі швидше, але з дещо обмеженим функціоналом.[6-7]

3.6 ВИЗНАЧЕННЯ ЕПР ТОЧКОВОГО РОЗСІЮВАЧА ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖІ

Для початку було вирішено використовувати нейромережу для визначення ЕПР для некогерентного випадку без дифракційного розсіювання. При цьому по діаграмі розсіяння, тобто по значенням ЕПР для різних кутів визначається значення ЕПР розсіювача. Отримані дані мали точність до 4 знаку після коми. Модель мала 3 шари: один вхідний із 360 нейронами, один вихідний з 1 нейроном, і прихований шар з 360 нейронами (рис.3.7).

Вхідний шар використовує лінійну функцію активації, тобто лише пропускає через себе інформацію. Прихований шар використовує ReLU функцію активації, а вихідний шар – лінійну функцію активації. Дана модель вдала для простих обчислень, таких як обчислення скалярної величини із великого масива числових даних. Наприклад, цю нейромережу можна натренувати для

обчислення площі кола за його радіусом або визначення скалярного добутку двох векторів.

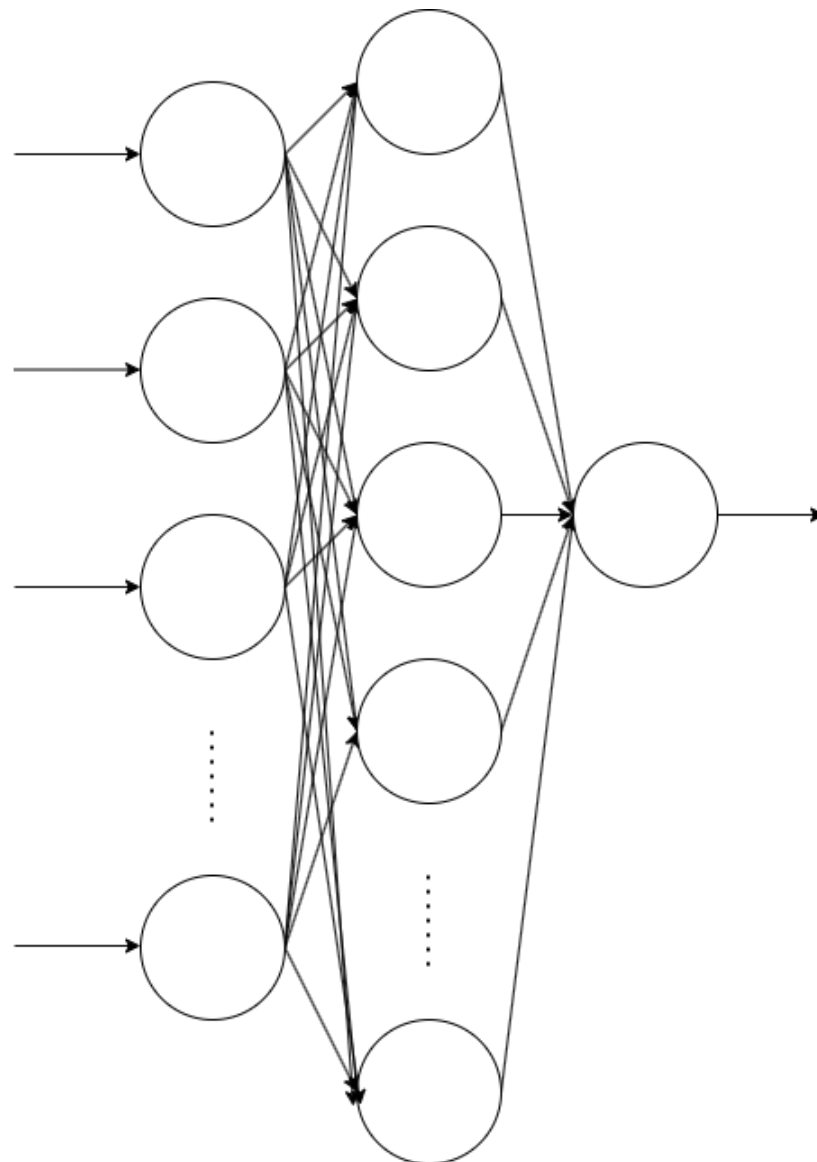


Рис. 3.7. Схема неймережі для визначення ЕПР системи точок для некогерентного випадку без дифракційного розсіювання.

Результати передбачень неймережі представлено в Таблиці 3.1 нижче.

Таблиці 3.1 Результати передбачення нейромережею ЕПР точкового розсіювача

Фактична ЕПР м ²	Передбачена ЕПР м ²	Різниця
0.82	0.82	10 ⁻⁴
0.81	0.81	10 ⁻⁵
0.56	0.56	5x10 ⁻⁷
0.94	0.94	10 ⁻⁵
0.43	0.43	10 ⁻⁵
0.96	0.96	10 ⁻⁵
0.58	0.58	10 ⁻⁶
0.017	0.017	10 ⁻⁵
0.54	0.54	2x10 ⁻⁷
0.89	0.89	10 ⁻⁵
0.57	0.57	6x10 ⁻⁷
0.61	0.61	2x10 ⁻⁶
0.097	0.097	10 ⁻⁵
0.66	0.66	4x10 ⁻⁶
0.33	0.33	7x10 ⁻⁶

Як видно з таблиці, нейромережа має доволі високу точність обчислень. Точність можна збільшити шляхом тренування на більшому датасеті.

3.7 КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ РОЗСІЮВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖІ

Наступним кроком в дослідженні можливостей нейромереж для роботи із системами яскравих точок стала їх класифікація. Була створена модель, із 720 вхідними нейронами, два прихованих шари із 800 та 360 нейронами і одним вихідним шаром із двома нейронами (рис. 3.8). Вхідний та вихідний шари використовують лінійну функцію активації, прихований шар із 800 нейронами – сигмоїду та прихований шар із 360 нейронами – ReLU.

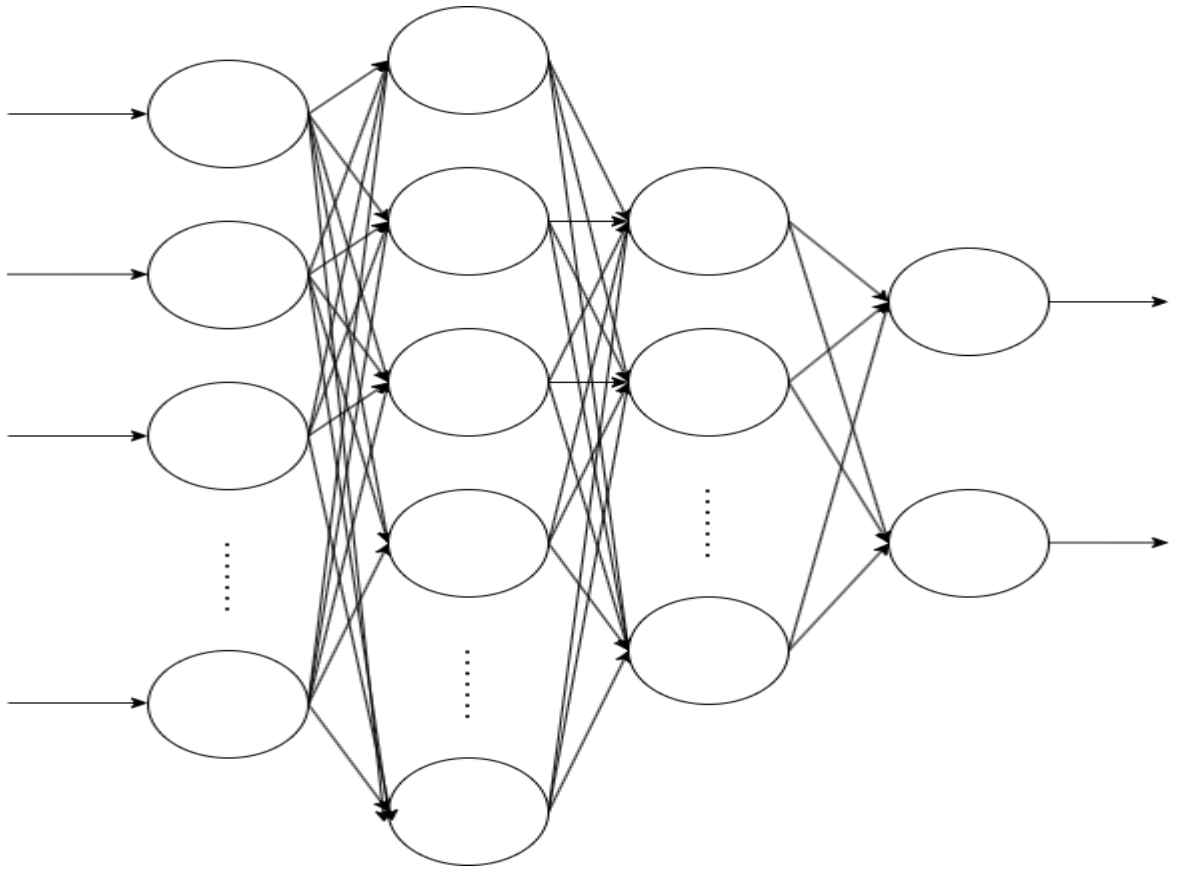


Рис. 3.8. Модель нейронної мережі для класифікації системи точок.

Дана система отримує на вхід кутову залежність ЕПР системи, а на виході надає ймовірність того, що ця система складається із однієї чи двох точок. Приклад роботи даної моделі представлено в таблиці 3.2.

Таблиці 3.2 Результати передбачення кількості розсіювачів за допомогою нейромережі

Ймовірність, що система має 1 точку, %	Ймовірність, що система має 2 точки, %	Кількість точок в системі
0	100	2
100	0	1
100	0	1
100	0	1
100	0	1
0	100	2
10.0	87.0	2
5.0	89.0	2
60.0	42.0	2
8.0	87.0	2
44.0	51.0	2
8.0	87.0	2
100	0	1
0	100	2
100	0	1
97.0	2.0	1
18.0	84.0	2
97.0	2.0	1
100	0	1
78.0	18.0	1

Як видно з таблиці, система іноді видає невірні результати, але все одно має доволі високу точність для обчислень.

Це підтверджує можливість використання нейромереж для побудови моделі розсіяння хвиль на об'єкті складної форми у вигляді низки розсіювачів за допомогою аналізу діаграми зворотного розсіяння.

4 ВИСНОВКИ

Для ефективного створення радіолокаційних систем необхідно, зокрема, знати ефективну поверхню розсіювання цілей, які вона має виявляти. Так як такі об'єкти мають складну форму поверхні, вони також мають складну кутову залежність ЕПР, що проявляється у багатопелюстковій формі діаграми розсіювання (також ЕПР суттєво залежить й від інших параметрів, таких як поляризація, частота, тощо). Через це моделювання реальних об'єктів стає складною задачею.

Для полегшення розробки нових засобів радіолокації, пропонується використовувати модель у вигляді низки так званих яскравих точок, які представляють собою ізотропні розсіювачі. При різному розміщенні таких розсіювачів у просторі, а також при зміні амплітуди розсіяного ними сигналу (ЕПР розсіювача) сумарна ЕПР такої системи повинна стати аналогічною або близькою до ЕПР реальних складних великогабаритних радіолокаційних об'єктів.

Задля спрощення виконання поставленої задачі, спочатку було досліджено зв'язок між ЕПР системи та її параметрів: відстанню між точками, їх розташуванням у просторі та ЕПР кожної точки. Зокрема отримано діаграми зворотного розсіювання для системи із двох точок на різних відстанях, системи із трьох точок, розташованих в кутах рівностороннього трикутника, та системи із чотирьох точок, розташованих в кутах квадрата. Моделювання для таких систем показало, що результуюча діаграма зворотного розсіювання представляє собою складну кутову залежність, за допомогою якої важко представити діаграму розсіювання для складного великогабаритного радіолокаційного об'єкта або окремих фрагментів його поверхні.

Далі було вирішено використовувати штучні нейронні мережі, які змогли б за допомогою аналізу діаграми зворотного розсіювання розміщувати розсіювачі й підбирати їх параметри таким чином, щоб сумарна ЕПР точок відповідала ЕПР якогось реального об'єкту.

Для підтвердження гіпотези про застосовність нейронних мереж до розв'язання такої задачі спочатку нейронну мережу було натреновано для визначення ЕПР одного ізотропного розсіювача по кутовій залежності, що надається на вхід мережі. Таку просту задачу обрано задля перевірки можливостей нейромережі і розв'язанням цієї задачі мережа успішно впоралась.

Наступним кроком стало визначення кількості точок в системі. На вхід нейромережа отримувала кутову залежність ЕПР для систем із різною кількістю розсіювачів і повинна визначити цю кількість розсіювачів. Після тренування мережі на тестовому наборі даних її було застосовано для визначення кількості

розсіювачів, що формують різноманітні діаграми розсіяння. Результати моделювання показали ефективність мережі для розв'язання такої задачі.

Для побудови нейронної мережі, яка могла б за допомогою точок моделювати реальні об'єкти, необхідне подальше дослідження різних типів нейромереж та експерименти задля визначення найкращої моделі.

5 ЛІТЕРАТУРА

1. Bassem R. Mahafza. Introduction to Radar Analysis. 2nd Edition. New York: Chapman and Hall/CRC. 2017. 460 с.
2. Mirabel Cerqueira Rezende, Malmonge Martin, Roselena Faez, Marcelo Alexandre Souza Miacci, Evandro Luis Nohara. Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets. Revista de Física Aplicada e Instrumentac , ao, vol. 15, no. 1.Грудень, 2002
3. Сайт «radartutorial.eu» - Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Cross%20Section.en.html>. 21.09.
4. Eugene F. Knott, John F. Shaeffer ; Michael T. Tuley. Radar Cross Section (2nd Edition). 2004. 626 с.
5. Eugene F. Knott . Radar cross-section measurements. New York: Springer New York. 2012. 546 с.
6. Сайт «Keras»- Режим доступу: <https://keras.io/>. 20.10.2023
7. Сайт «TensorFlow» - Режим доступу: <https://www.tensorflow.org/>
20.10.2023
8. Сайт «V7 Labs» - Режим доступу: <https://www.v7labs.com/blog/neural-networks-activation-functions> 21.11.2023
9. Abdel-Nasser Sharkawy. Principle of Neural Network and Its Main Types: Review: Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics. Серпень 2020.
10. Сайт «r_d» - Режим доступу <https://robotdreams.cc/uk/blog/327-funkciji-aktivaciji-stupinchasta-liniyna-sigmojida-relu-ta-tanh> 10.10.2023
11. Сайт «TS2.» - Режим доступу <https://ts2.space/uk/%D1%88%D1%96-%D1%82%D0%B0-%D1%84%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97-%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97-relu-sigmoid-tanh/#gsc.tab=0> 10.10.2023

12. Сайт «NumPy» - Режим доступа <https://numpy.org/doc/stable/index.html>

10.09.2023