

**ПЕРЕДАВАННЯ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ У ШИРОКОМУ
ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ЧЕРЕЗ МЕТАСТРУКТУРИ ІЗ ПАРАЛЕЛЬНИХ
ПРОВІДНИКІВ**

Спеціальність: «Радіотехніка»

Секція: «Проблеми сучасної радіотехніки»

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Анотація | 3 |
| Вступ | 4 |
| Розділ 1. Огляд літературних джерел | 6 |
| 1.1. Метаматеріали, їх класифікація та можливі застосування | 6 |
| 1.2. Використання провідникових метаструктур для передавання зображень | 7 |
| 1.2.1. Передавання неперервного плоского зображення | 7 |
| 1.2.2. Передавання растрового зображення | 10 |
| 1.3. Широкосмугове передавання енергії ЕМ хвиль через СПП | 11 |
| 1.4. Ендоскоп на основі провідникових метаструктур | 13 |
| Розділ 2. Передавання растрових зображень у широкому діапазоні суб-ГГц частот через СПП із різним діелектричним заповненням | 16 |
| 2.1. Опис ідеї передавання растрових зображень у широкому діапазоні частот. Дослідження роздільної здатності СПП. | 16 |
| 2.2. Передавання растрового зображення у широкому діапазоні суб-ГГц частот | 22 |
| 2.3. Передавання ЕМ сигналів через СПП із різним діелектричним заповненням у широкому діапазоні суб-ГГц частот | 24 |
| Висновки | 26 |
| Список використаної літератури | 27 |
| Додаток А | 29 |

Анотація

Розглядається актуальне питання розроблення пристроїв передавання растрових зображень через структури із паралельних провідників (СПП). Продемонстрований у роботі підхід є новим, оскільки результати досліджень підтверджують можливість передавання ЕМ сигналів одночасно по паралельних комірках СПП у широкому діапазоні суб-ГГц частот. У роботі вперше отримано таку функціональну можливість на основі передавання растрового зображення, а також вперше досліджено передавання ЕМ сигналів через СПП із різним діелектричним заповненням та різними значеннями втрат матеріалу заповнення середовища між провідниками. Отримані результати значно розширюють можливості застосування СПП та удосконалюють уже відомі пристрої ендоскопії та спектроскопії на основі СПП. Дослідження проведені шляхом моделювання моделей структури та виконанням експериментальних вимірювань лабораторних макетів.

Робота містить зміст, анотацію, вступ, 2 розділи, висновки, список використаної літератури із 16 наукових джерел та 1 додаток на 4 сторінках, об'єм роботи 28 сторінок друкованого тексту і містить 18 рисунків.

Вступ

Розвиток сучасних систем телекомунікацій з використанням метаматеріалів є досить актуальним, оскільки цей тип матеріалів характеризується незвичайними з точки зору електродинаміки властивостями ($\epsilon < 0$ та/або $\mu < 0$). Завдяки цьому використання метаматеріалів при розробленні чи модифікації радіотехнічних пристроїв та засобі телекомунікації вносить в їх характеристики новий функціонал.

Клас метаматеріалів – провідникові метаматеріали у наш час вже відомий для можливості застосування у пристроях ендоскопії, що функціонують як на частотах Фабрі-Перо резонансів, так і у широкому діапазоні частот від мікрохвиль до ІЧ. При цьому відомі ендоскопи, що здатні передавати енергію електромагнітних (ЕМ), а також плоскі неперервні та растрові зображення на частоті резонансу. Проте, наша увага зосереджена на широкосмугових ефектах при передаванні через структури із паралельних провідників (СПП). Це дозволить розширити функціональність досить вузького на даний момент класу існуючих пристроїв ендоскопії та спектроскопії, а також процесів передавання зображень через них в цілому.

Метою конкурсної роботи є вивчення процесів передавання растрових зображень через провідникові метаструктури, що забезпечуються можливістю реалізації одночасного передавання сигналів по сусідніх комірках СПП із різним діелектричним заповненням середовища між провідниками у широкому діапазоні суб-ГГц частот.

Для досягнення поставленої мети, необхідно було розв'язати наступні завдання:

- Здійснити аналіз сучасного стану пристроїв ендоскопії та спектроскопії на основі провідникових метаматеріалів, вивчити підходи щодо можливості передавання зображень через суперлінзи та гіперлінзи у широкому діапазоні частот та на частотах резонансів Фабрі-Перо;

- Дослідити можливості передавання ЕМ сигналів по паралельних комірках СПП у широкому діапазоні суб-ГГц частот, шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень вивчити крок розташування (роздільну здатність) джерел ЕМ сигналів на площині вхідного інтерфейсу СПП;
- Провести передавання растрового зображення через досліджувану метаструктуру за допомогою комп'ютерної моделі та експериментального макету у лабораторних умовах та здійснити порівняльний аналіз на основі оцінки детектованих на приймальній стороні зображень на різних частотах досліджуваного діапазону;
- Здійснити передавання ЕМ сигналів через СПП із діелектричним заповненням середовища між провідниками із різним значенням вологості матеріалу (різними значеннями втрат матеріалу середовища).

Об'єктом досліджень є процес передавання декількох ЕМ сигналів одночасно через СПП по паралельних комірках.

Предметом дослідження є імітаційні та експериментальні моделі провідникових метаструктур.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- *Вперше* показано можливість передавання растрових зображень у широкому діапазоні частот (0,45...0,7 ГГц), що забезпечується передаванням ЕМ хвиль дипольних випромінювачів, розміщених із кроком $2a$, по паралельних комірках СПП;
- *Вперше* продемонстровано передавання ЕМ хвиль для різного значення діелектричної проникності та втрат середовища заповнення між провідниками СПП на основі використання піску із різним значенням вологості 5% ($\varepsilon = 2.53$ та $tg(\delta) = 0.0036$) та 45% ($\varepsilon = 13$ та $tg(\delta) = 0.29$), що доводить, що передавання ЕМ хвиль здійснюється за допомогою поверхневих плазмонів провідників структури.

Розділ 1. Огляд літературних джерел

1.1. Метаматеріали, їх класифікація та можливі застосування

Метаматеріали являють собою штучно створені та особливим чином структуровані сполуки із від'ємним значенням магнітної μ та/або діелектричної ε проникності. Вони поділяються на: ENG (ε -negative – ε -негативні) – матеріали з $\varepsilon < 0$; MNG (μ -negative – μ -негативні) – матеріали з $\mu < 0$; DNG (double negative – подвійно негативні) – матеріали, в яких $\varepsilon < 0$ та $\mu < 0$ (рис. 1.1, а) [1].

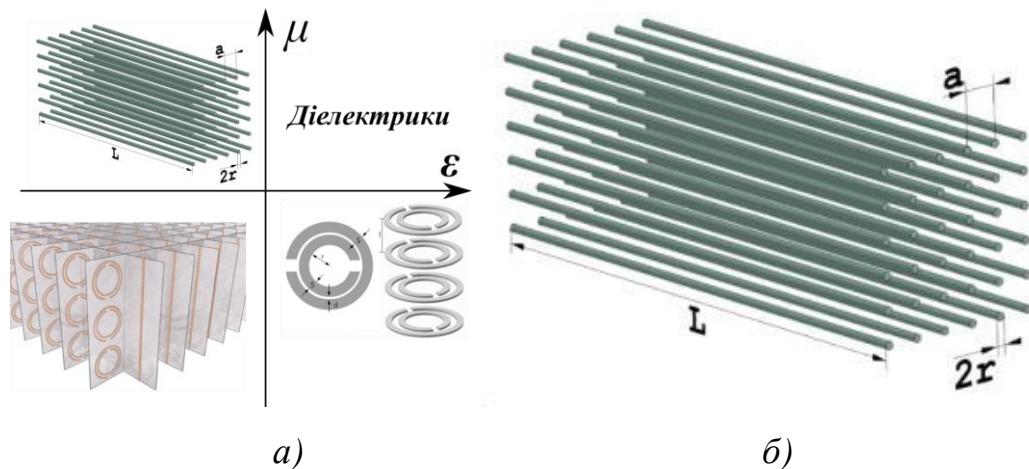


Рис. 1.1. Класифікація фізичних середовищ в залежності від значень діелектричної ε та магнітної μ проникностей та приклади структур, що до них відносяться (а), структура із паралельних провідників (б)

Структури із паралельних провідників (СПП), що відносяться до ε -негативних метаматеріалів, конструктивно нагадує хвилевід, вздовж якого можуть поширюватись ЕМ хвилі [2]. СПП являють собою матрицю $m \times n$ металевих провідників (рис. 1.1, б) заданої довжини L , радіусу r та періоду їх розташування a , простір між якими заповнений діелектриком. В якості діелектрика може бути використаний будь-який матеріал, проте необхідно враховувати при цьому його діелектричну проникність, оскільки це напряму впливає на процеси поширення ЕМ хвиль через структуру та на властивості метаматеріалу в цілому. Для зручності моделювання та теоретичного вивчення часто використовують вакуум, повітря чи поліетилен. Функціональність таких

структур пояснюється ще й тим, що існує багато методик щодо їх виготовлення різних розмірів для різних діапазонів частот від мікрохвильового, ТГц до оптичного [3]. Використання СПП можна класифікувати за різними сферами можливих застосувань. Структури такого роду використовують для покращення характеристик антен [4-5], суперлінз (структури із паралельних провідників, що функціонують на частотах резонансів Фабрі-Перо) та гіперлінз (із провідників, що розходяться з випадковим розміщенням провідників) [6-7], передавання чи випромінювання ЕМ енергії у широкому діапазоні частот [8-9].

1.2. Використання провідникових метаструктур для передавання зображень

1.2.1. Передавання неперервного плоского зображення

Перетворення затухаючих гармонік у розповсюджувальні хвилі в середині метаматеріалу уможливорює передавання електромагнітних хвиль з довільним розподілом поля через провідникові матеріали без втрат у роздільній здатності, що забезпечується просторовими гармоніками, що розповсюджуються з однаковими значеннями фазової швидкості вздовж фіксованого напрямку. Структури, що сформовані у блоки таких матеріалів, забезпечують унікальні властивості для передавання хвиль близького поля із суперроздільністю на дуже великі відстані від джерела випромінювання, що не може бути досягнуто, використовуючи інші відомі способи передавання зображень [10]. Блок, сформований із паралельно розміщених металевих провідників, приведений на рис. 1.2 дозволяє перетворити електромагнітні хвилі близького поля таким чином, щоб електромагнітні хвилі джерела, що розміщене поблизу досліджуваної конструкції, могли поширюватись по лінії зв'язку [11]. Такі хвилі розповсюджуються вздовж провідників і передають ЕМ хвилі розподілом поля від передньої стінки структури до її задньої стінки без спотворень. Структура працює у мікрохвильовому діапазоні частот та може бути зміщена у область інфрачервоного частотного випромінювання.

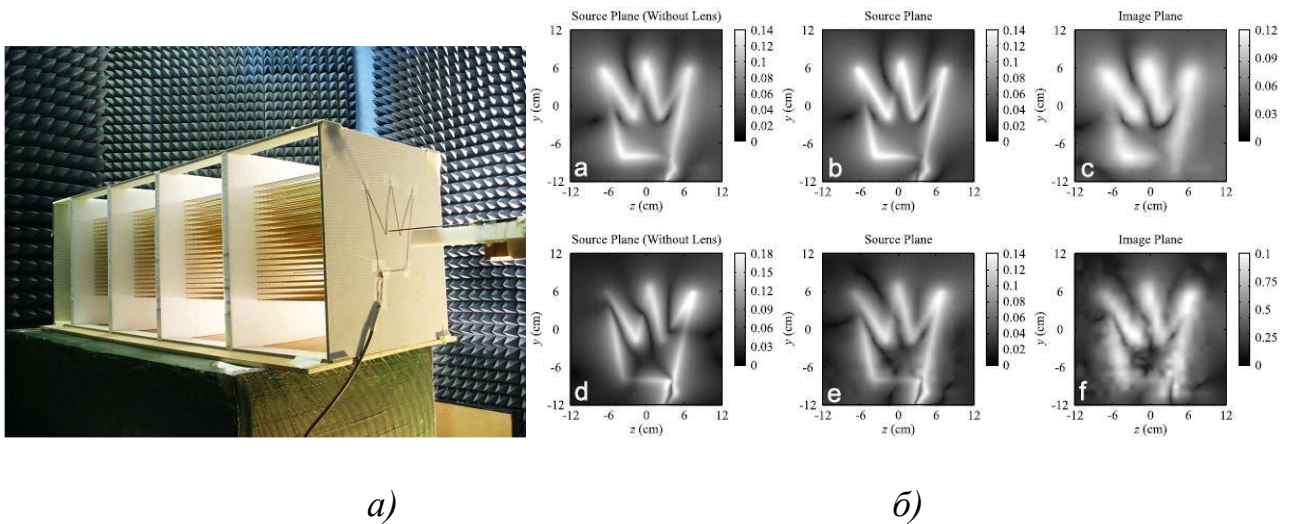


Рис. 1.2. Метаструктура із паралельно розміщених 21 на 21 металевих провідників для передавання зображень у мікрохвильовому діапазоні (а), та отримані зображення на частоті резонансу Фабрі–Перо (б) [10]

Передавальна антена формується у вигляді зображення (рис. 1.2, а), яке треба передати, та розміщувалось безпосередньо перед інтерфейсом структури на відстані 2 мм. На приймальній стороні розглядався розподіл електричного поля на відстані 2 мм від структури. Результати досліджень показують, що така структура здатна передавати сигнали на частотах Фабрі-Перо резонансів. При цьому зображення є чітким, а при відхиленні від значення частоти цієї хвилі, зображення є розмитим (рис. 1.2, б).

Експериментальним підтвердженням функціональності такої структури у терагерцовому (ТГц) діапазоні частот є результат, приведені на рис. 1.3. Її ефективність продемонстровано на прикладі передавання зображення із складним розподілом електричного поля, що створюється джерелом у вигляді букв, які необхідно передати на частоті 5 ТГц. Структура представляє собою набір срібних провідників вмонтованих у халкогенітне скло, що характеризується дуже малими втратами у цьому частотному діапазоні.

Для можливості забезпечення передавання ЕМ енергії у оптичному діапазоні частот через структуру із паралельних провідників, досліджено набір

нанопровідників. Відстань між провідниками у такій структурі становить менше 100 нм, що дозволяє передавати зображення із надзвичайно великою роздільною здатністю.

Провідникові метаматеріали здатні функціонувати у радіо та мікрохвильовому діапазонах частот та можуть бути легко виготовлені. Проте, для їх роботи у терагерцовому, інфрачервоному та видимому діапазоні частот найбільш перспективним є технології виготовлення, що включають процеси самоорганізації, які очевидно визначають структурні характеристики металевих нанопровідників. Прикладом такої технології є метод анодного електрохімічного травлення, що дозволяє виготовити пористу структуру напівпровідників та діелектриків. Пори такої структури можна заповнити різними матеріалами, включаючи метал та отримати структуру вільно розташованих випрямлених металевих нанопровідників діаметром близько 72,6 нм, як показано в [11]

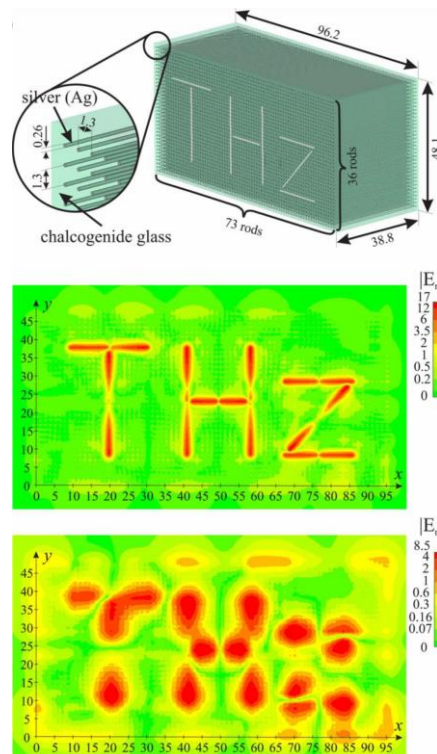


Рис. 1.3. Результати моделювання, для передавання зображень на частоті 5 ТГц за допомогою півхвильової лінзи із провідникових метаматеріалі

1.2.2. Передавання растрового зображення

Дослідження процесу передавання растрового зображення в ІЧ діапазоні частот вперше було здійснено у роботі [12]. Було досягнуто роздільної здатності, що відповідало періоду розміщення провідників за рахунок розміщення точкових джерел ЕМ хвиль навпроти кінців провідників перед інтерфейсом СПП та завдяки плазмонному механізму передавання енергії ЕМ хвиль (рис. 1.4).

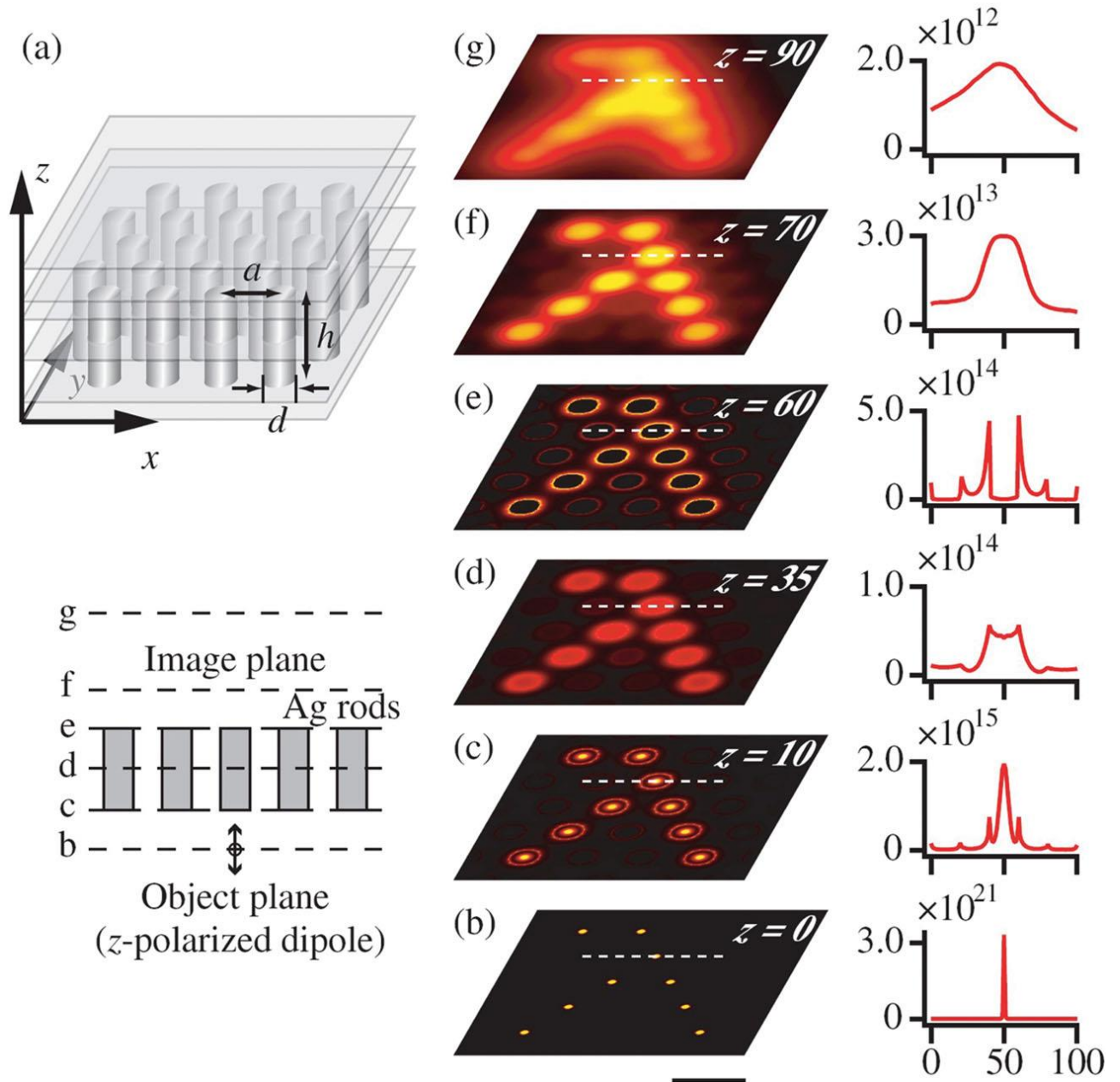
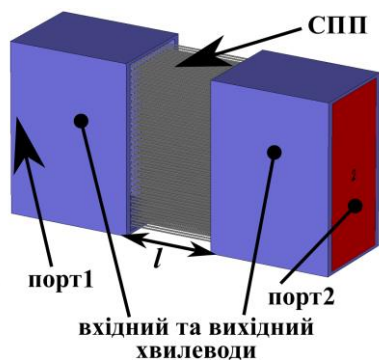


Рис. 1.4. Передавання растрового зображення через СПП з роздільною здатністю, що рівна періоду розташування провідників, на частоті резонансу Фабрі-Перо [12].

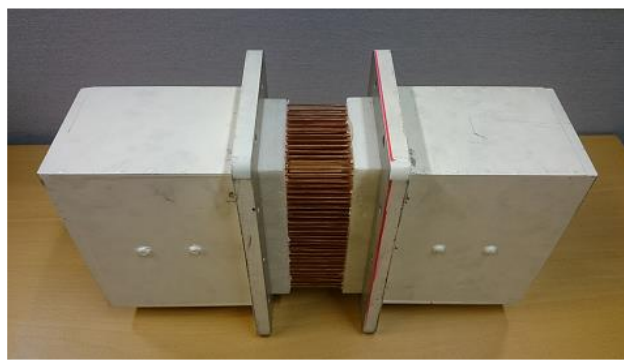
Проте, передавання растрових зображень шляхом запропонованого у [12] підходу можливе тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо СПП, що зумовлює прив'язку до фізичних розмірів структури.

1.3. Широко смугове передавання енергії ЕМ хвиль через СПП

Перш за все, СПП є широковідомі як суперлінзи для передавання зображень чи випромінювання ЕМ хвиль [13]. Проте, їх використання є доцільним тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо, що значно обмежує спектр застосувань структури. Проте, нещодавно була доведена можливість широко смугового передавання енергії ЕМ хвиль [14-15]. Головна ідея полягала в тому, що джерело сигналів безконтактно розміщувалось всередині структури між сусідніми провідниками або щонайменше на одній площині із кінцями провідників (на площині інтерфейсу СПП) [14]. Це дозволяло забезпечити ближньо-польову взаємодію між джерелом сигналів та провідниками структури, затухання можливих резонансів та відповідне розширення смуги робочих частот. Для того, щоб реалізувати таку концепцію, було розроблено модель, що складалася із двох хвилеводів, які виконували роль джерела та приймальної сторони, із повітряним проміжком довжиною l між їх апертурами, а також сконструйовано СПП, параметри якої становили $L = 100$ мм, $r = 0,75$ мм та $a = 6$ мм (рис. 1.5, а). Розміри СПП відповідали розмірам апертури хвилеводів, а її довжина становила $L = a + l$. СПП розміщувалась між двома хвилеводами та вмонтовувалась у кожен із портів на глибину $a/2$ (рис. 1.5, б).



a)



б)

Рис. 1.5. Модель (*a*) та експериментальна установка (*б*) системи, що складається із двох прямокутних металевих хвилеводів розмірами апертури 164 на 82 мм.

Хвилеводи розміщені один навпроти одного на відстані $l = 90$ мм. СПП вмонтована у кожен із хвилеводів на глибину $a/2$

Дослідження включають порівняння S_{21} -параметрів для двох випадків, коли передавання відбувається без та зі структурою розміщеною між портами. У першому випадку енергія ЕМ хвиль сильно розсіюється у вільний простір, а середнє значення S_{21} -параметрів становить 4,5 дБ у частотному діапазоні 0,9...2 ГГц (одномодовий режим роботи використовуваних хвилеводів) (рис. 1.6, *a* - пунктирна лінія). Якщо розмістити метаструктуру між хвилеводами, вмонтувавши її на 5 мм у кожний з портів, то покращується передавання ЕМ сигналів у 2,24 рази (рис. 1.6, *a* — суцільна лінія, рис. 1.6, *б*). У діапазоні частот 0,9...12 ГГц (багатомодовий режим використовуваних хвилеводів) середнє значення покращення передавання становить 3,78 разів [14].

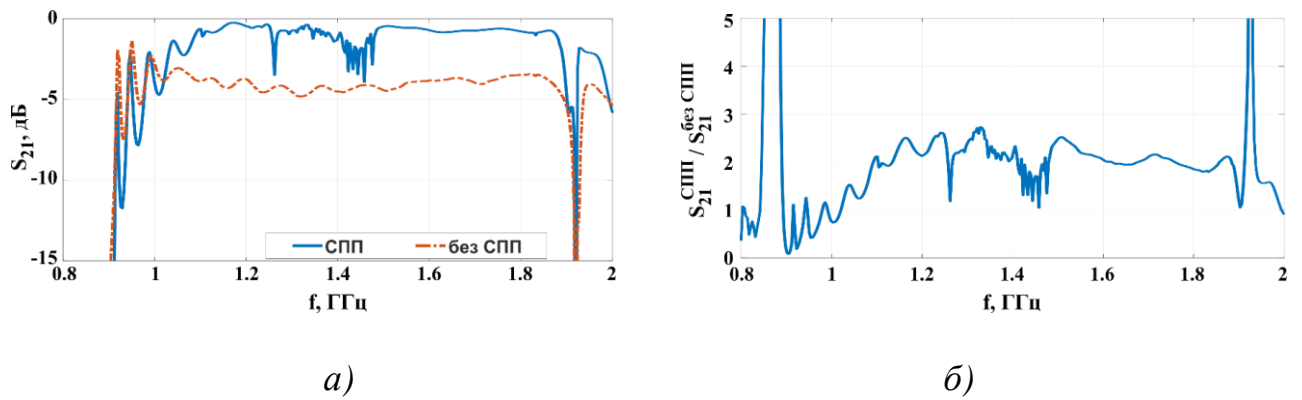


Рис. 1.6. *а* – дисперсія S_{21} -параметрів при передаванні ЕМ хвиль між двома хвилеводами через вільний простір (штрихова лінія – без СПП) та через структуру з паралельних провідників, (суцільна лінія – СПП); *б* – частотна залежність покращення передавання за допомогою експериментальної установки [14]

1.4. Ендоскоп на основі провідникових метаструктур

Розроблення пристроїв ендоскопії є надзвичайно актуальною задачею на сьогодні. Електромагнітний відгук багатьох органічних речовин відбувається у суб-ТГц та ТГц діапазонах частот, що робить його привабливим для широкого спектру застосувань. Смуга частот $0,3 \div 3$ ТГц є унікальним частотним діапазоном для зондування біологічних клітин, органічних молекул, радіоактивних атомів. Такі прилади здатні детектувати багато мікробів, вірусів та дуже малих фракцій вибухових речовин, а також здійснювати спектроскопію карциноми, меланому, опіків шкіри, запалення та рубцювання.

Дослідження широкосмугового передавання ЕМ хвиль через СПП стало початковою точкою для розробки засобів ендоскопії. У [16, 17] структури з паралельних провідників використовують для розроблення ендоскопу, що може працювати в мікрохвильовому та терагерцовому діапазоні частот. Ендоскоп складається з 6 на 6 мідних провідників вмонтованих в пористий діелектрик (використано поліетилен із діелектричною проникністю $\epsilon = 2,25$), оскільки він володіє порівняно низьким рівнем втрат у досліджуваному діапазоні частот.

Провідники вмонтовані у діелектрик у центрах між чотирма сусідніми повітряними отворами як показано на вставці рис. 1.7, *а*. Така конструкція забезпечує концентрування електричного поля у отворі між чотирма сусідніми металевими провідниками, що розташовані навколо. Такий принцип побудови ендоскопу дозволяє поширення ЕМ хвиль у ТГц діапазоні частот, зберігаючи при цьому низький рівень їх затухання. Дослідження в [15, 16] показують, що ендоскоп зберігає свої передавальні властивості при вигині з різними значеннями кута навіть більше 180° для структури довжина якої 2 см та частотного діапазону $0,5 \div 1$ ТГц (для радіусі згину R приблизно 6,3 мм). Більш того, такий пристрій демонструє функціональність при згині який співрозмірний радіусу $R \approx \lambda$ при частоті нижче 0,75 ТГц [17].

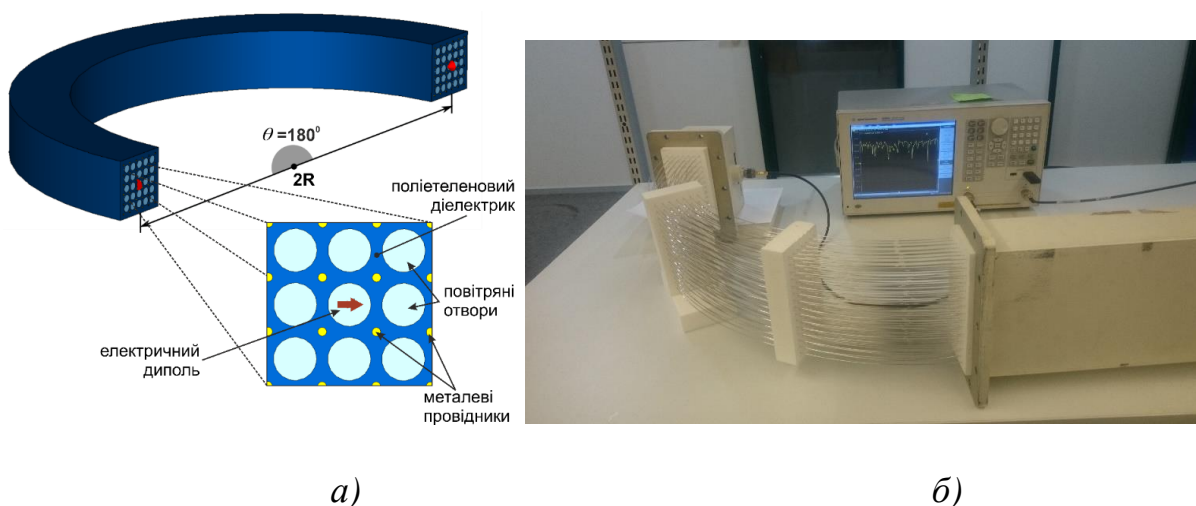


Рис. 1.7. Модель ендоскопа ТГц діапазону частот, що складається з паралельних металевих провідників вмонтованих в пористу діелектричну матрицю (*а*) та її експериментальну установку для мікрохвильового діапазону частот (*б*) [16, 17]

Проведені експериментальні дослідження у мікрохвильовому діапазоні частот (рис. 1.7, *б*) показали ефективне функціонування запропонованого ендоскопу в діапазоні мікрохвиль та підтвердив свою стабільну роботу для згину з кутами, що дорівнювали 90° , 180° і більше. В процесі досліджень була розрахована дисперсія втрат для прямого та зігнутого ендоскопу, яка показана

на рис. 1.8 [17]. Середні значення $\langle P \rangle$ складають 0,38, 0,4 та 0,41, що відповідають різним кутам згину ендоскопу.

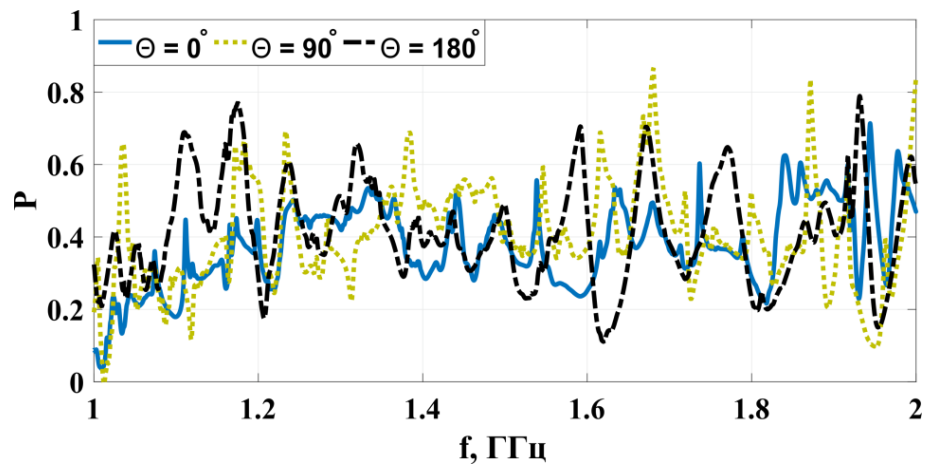


Рис. 1.8. Частотний розподіл втрат потужності для прямого, а також вигнутого під кутами 90° та 180° ендоскопів, отримані шляхом експериментальних досліджень в мікрохвильовому діапазоні частот [17]

Розділ 2. Передавання растрових зображень у широкому діапазоні суб-ГГц частот через СПП із різним діелектричним заповненням

2.1. Опис ідеї передавання растрових зображень у широкому діапазоні частот. Дослідження роздільної здатності СПП.

У попередньому розділі показано можливість передавання енергії ЕМ хвиль через СПП між двома хвилеводами або між двома дипольними випромінювачами. У першому випадку СПП вмонтовувався всередину передавального та приймального хвилеводних портів, таким чином сформована у вхідному хвилеводному порті падаюча ЕМ хвиля взаємодіяла із всією поверхнею вхідного інтерфейсу СПП і в подальшому здійснювалось передавання ЕМ хвиль у широкому діапазоні частот. У другому випадку передавання ЕМ хвиль здійснювалось між двома вмонтованими в СПП ендоскоп дипольними антенами. При цьому диполі поміщались в центральну позицію між кінцями чотирьох сусідніх провідників і за рахунок сильної близькопольової взаємодії між диполями та провідниками відбувалось передавання ЕМ хвиль. У даній роботі було зроблено припущення, що оскільки інтерфейс СПП складається із великої кількості, а передавання здійснюється в основному завдяки взаємодії передавального та приймального диполів із сусідніми провідниками СПП, тобто в елементарній комірці розмірами a на a , то можливо використовувати кожен із таких комірок по всьому інтерфейсу СПП для одночасного передавання ЕМ хвиль різних дипольних випромінювачів (рис. 2.1). А за рахунок їх розташування всередині СПП (на певній глибині) ще й забезпечити таке передавання в широкому діапазоні частот.

Для реалізації ідеї у середовищі моделювання CST Microwave Studio реалізовано модель СПП довжиною провідників $L = 150$ мм, радіусом $r = 0,5$ мм та періодом їх розташування $a = 10$ мм вздовж обох осей x та y інтерфейсу структури, як показано на рис. 2.1.

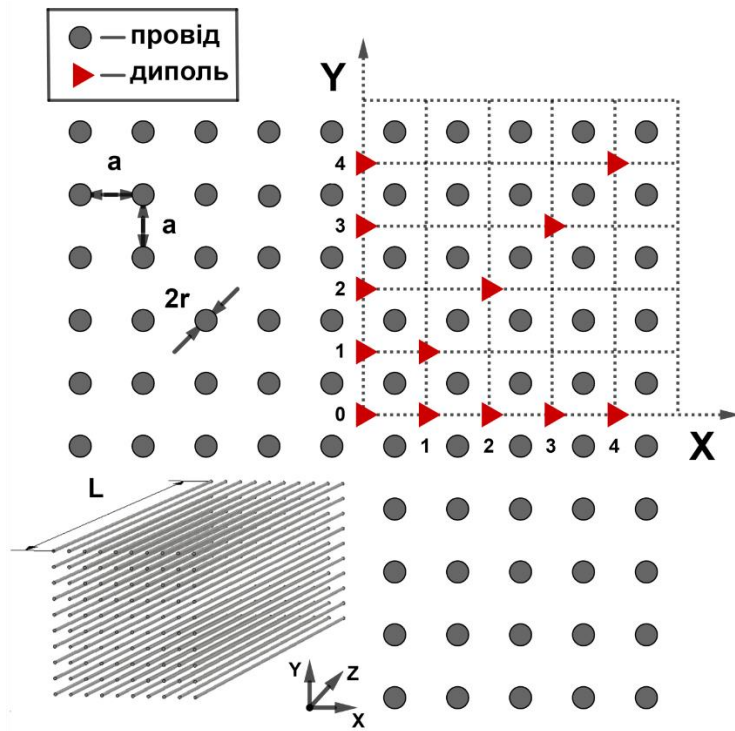


Рис. 2.1. Модель поперечного перерізу СПП перпендикулярно до розташування провідників із зазначенням позицій розташування дипольної антени на приймальній стороні.

Для того, щоб оцінити вплив дипольних випромінювачів, що будуть розміщуватись у комірках СПП, один на одного, необхідно було оцінити період їх розміщення. Для цього здійснено серію моделювань, де передавальний диполь розміщувався в позиції $(x,y) = (0,0)$ згідно системи координат, приведеної на рис. 2.1, посередині між кінцями чотирьох сусідніх провідників на глибині 10 мм. Розміщення дипольної антени на приймальній стороні здійснювалось згідно трьох вимірювань: а) для координат (x,y) при $x = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ та $y = 0a$; б) для координат (x,y) при $x = 0a$ та $y = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$; в) для координат (x,y) при $x = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ та $y = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$, відповідно. 3D-модель, що складається із СПП та двох диполів – передавального (у площині вхідного інтерфейсу СПП) та приймального (у площині вихідного інтерфейсу СПП), в середовищі моделювання з її кінцевими фізичними розмірами приведено на рис. 2.2.

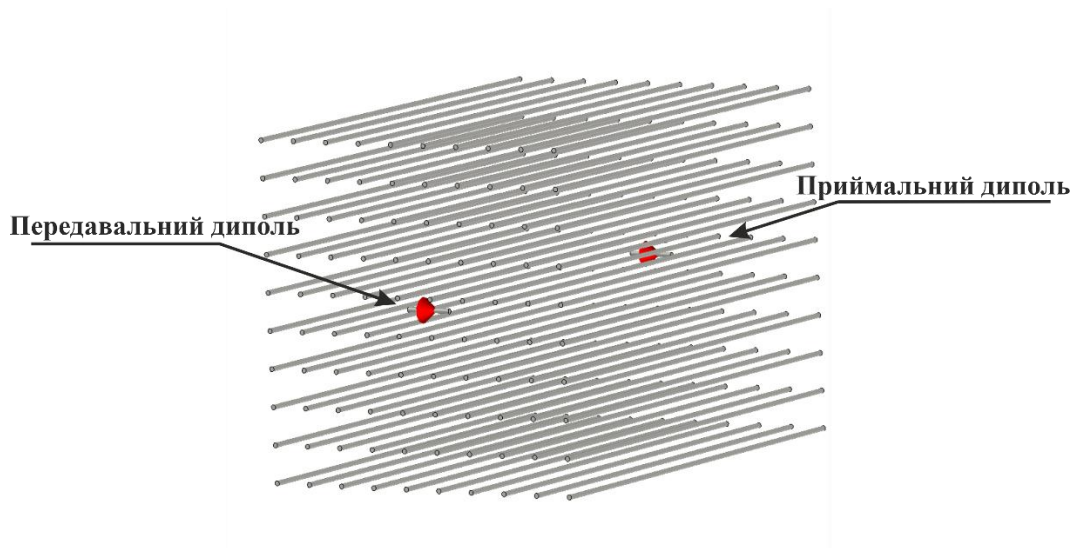


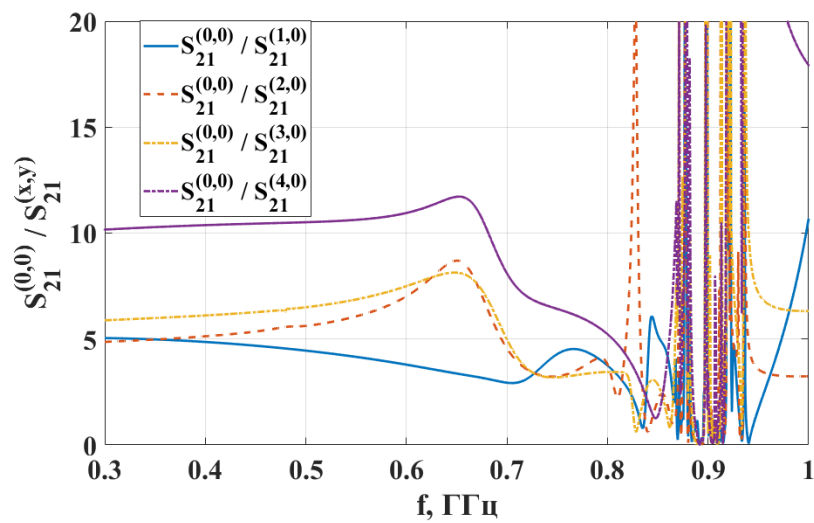
Рис. 2.2. 3D-модель СПП із середовища CST Microwave Studio, що показує розміщення передавального та приймального диполів у площині вхідного та вихідного інтерфейсів, відповідно.

Для кількісної оцінки допустимого значення кроку розміщення дипольних антен побудовано сімейство графіків, що представляють собою співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$, де $S_{21}^{(0,0)}$ – значення S_{21} -параметрів при розміщенні приймальної дипольної антени в тій же комірці, що і передавальний дипольний випромінювач та $S_{21}^{(x,y)}$ – значення S_{21} -параметрів при зсуві приймальної дипольної антени по осі x і y окремо чи x та y одночасно.

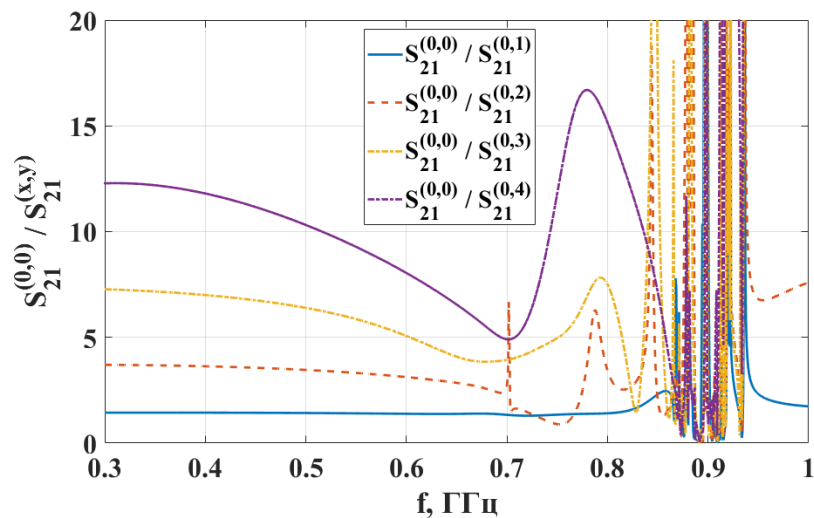
Слід врахувати, що при значенні довжини структури $L = 150$ мм в результаті досліджень резонанси Фабрі-Перо очікуються в околі 850-900 МГц для моделювання.

На рис. 2.3, *a* та *b* приведені співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$, де приймальна дипольна антена змінює своє положення вздовж осі x та по діагоналі, відповідно. Видно, що до значення частоти резонансу Фабрі-Перо співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$ приймають значення ~ 5 і більше, що цілком достатньо для детектування сигналів, а отже приймальні та передавальні дипольні антени можна розміщувати у кожній комірці вздовж осі x та по діагоналі.

З рис. 2.3, б, де приймальна дипольна антена змінює своє положення вздовж осі y , видно, що співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(0,1)}$ приймає значення $\sim 1,3 \dots 1,5$, а співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(0,2)} = \sim 4$. Це означає, що розміщення диполів у сусідніх комірках вздовж осі y при орієнтації вектору електричного поля дипольних антен вздовж осі x може утруднити розрізнення сигналів сусідніх комірок. Це зумовлено виглядом діаграми спрямованості дипольних антен, що зумовлює їх кращу взаємодію при паралельному розміщенні в порівнянні з їх колінеарним розміщенням.

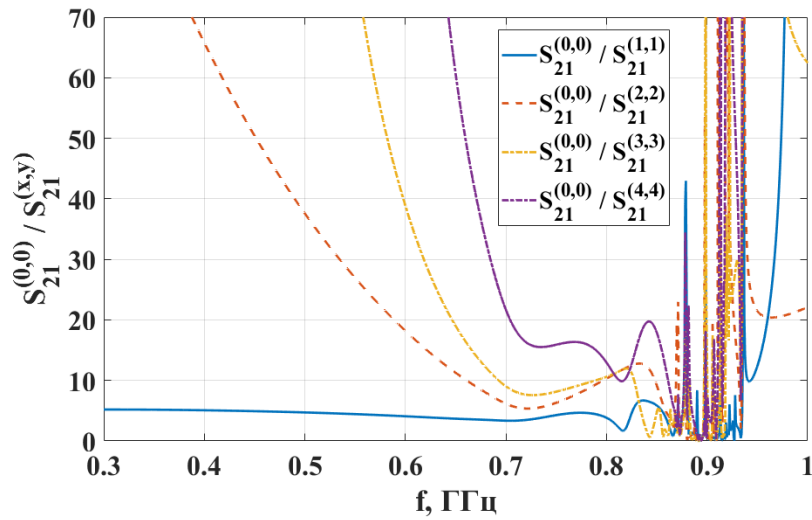


a)



б)

Рис. 2.3. Результати комп'ютерного моделювання, що представляють собою співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$ у випадку, коли: а) $x = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ та $y = 0a$; б) $x = 0a$ та $y = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ і в) $x = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ та $y = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$.



в)

Продовження рис. 2.3.

Для проведення експериментальних досліджень згідно комп'ютерної моделі досліджуваної системи виготовлено СПП та два електричних диполя із відповідними параметрами (рис. 2.4).

З експериментальних досліджень, приведених на рис. 2.5, видно, що передавання сигналів у широкому діапазоні частот через СПП по паралельних комірках можливе від 0,45 по 0,7 ГГц. Експериментальні вимірювання підтвердили результати комп'ютерного моделювання та показали, що доцільним є розміщення передавальних та приймальних дипольних антен з кроком a вздовж осі x та по діагоналі (рис. 2.5, a та $в$), а також з кроком $2a$ вздовж осі y (рис. 2.5, $б$). Це означає, що кількість пікселів (кількість джерел ЕМ сигналів, що можна розмістити на площині інтерфейсу СПП) рівна $S/(4a^2) = nma^2 / (4a^2) = nm/4$, де $S = nma^2$ – площа інтерфейсу СПП, де n та m – кількість провідників розміщених в одному горизонтальному та вертикальному рядку інтерфейсу СПП, відповідно.



Рис. 2.4. Експериментальний макет для дослідження передавання ЕМ сигналів між двома дипольними антенами (приймальною та передавальною) через СПП у діапазоні суб-ГГц частот та для дослідження роздільної здатності інтерфейсу СПП. Метаструктура складається із провідників довжиною $L = 150$ мм, радіусом $R = 1$ мм та періодом їх розташування $a = 10$ мм.

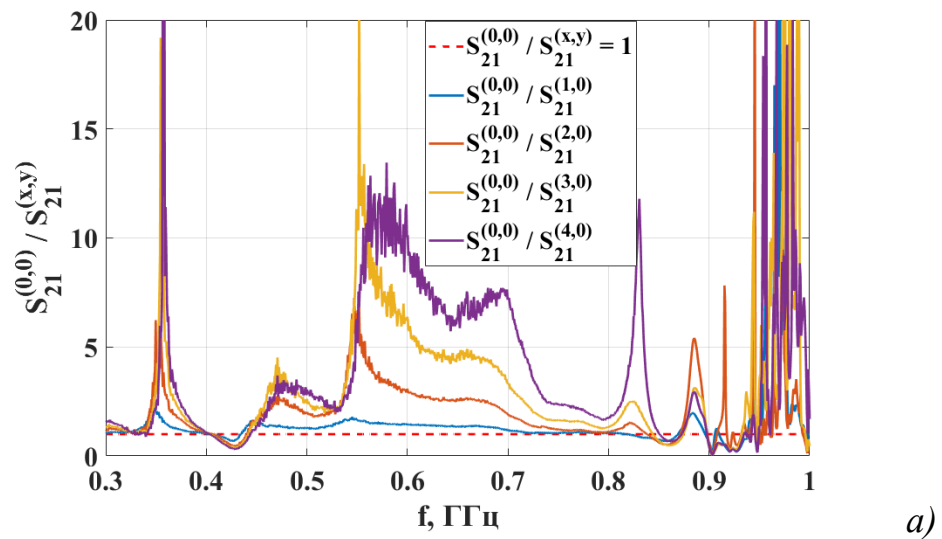
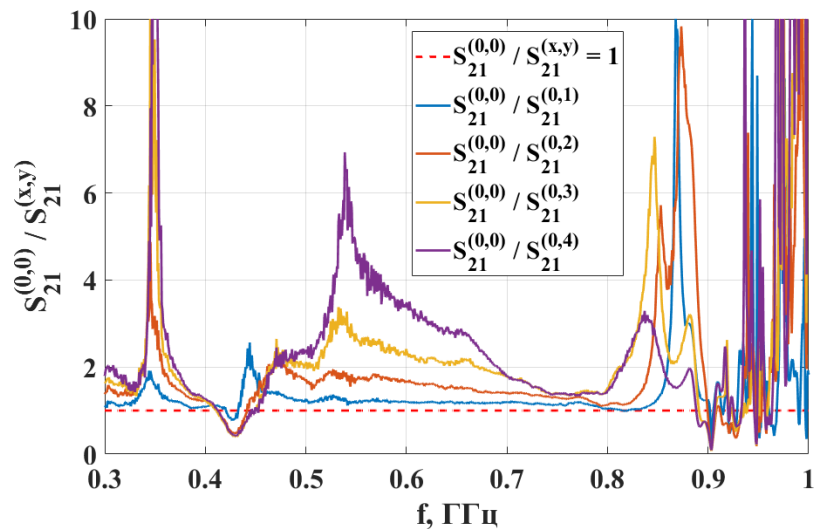
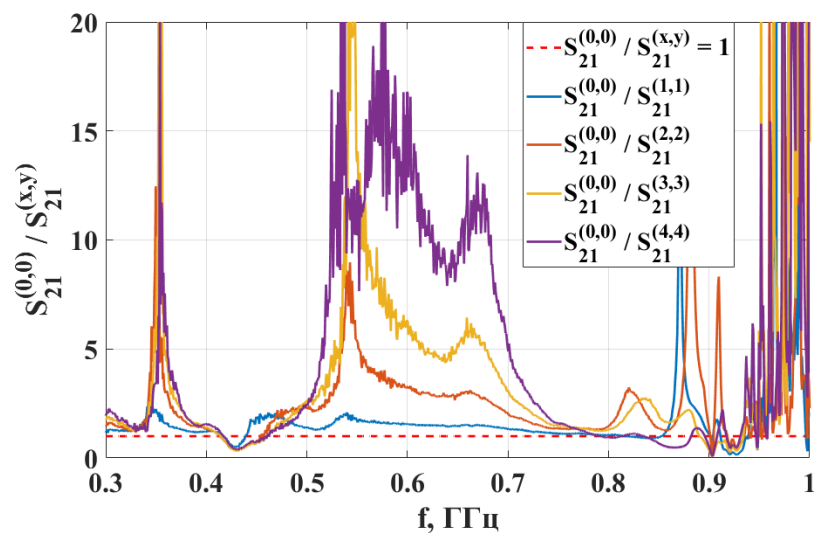


Рис. 2.5. Результати експериментальних досліджень, що представляють собою співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$ у випадку, коли: а) $x = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ та $y = 0a$; б) $x = 0a$ та $y = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$, а також в) $x = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ та $y = 0a, 1a, 2a, 3a, 4a$.



б)



в)

Продовження рис. 2.5.

2.2. Передавання растрового зображення у широкому діапазоні суб-ГГц частот.

Згідно отриманих вище результатів щодо роздільної здатності, здійснено дослідження при розміщенні диполів у вигляді латинської букви «R» як приведено на рис. 2.6. Дипольні випромінювачі розміщувались із кроком не менше, ніж $2a$ вздовж обох осей та по діагоналі.

Із серії комп'ютерних моделювань отримано розподіли електричного поля у площині перерізу, паралельній площині xu , на відстані 10 мм від вихідного

інтерфейсу вглиб СПП, що приведені на рис. 2.6, *a-u* для значень робочих частот від 300 до 750 МГц з кроком 50 МГц. В результаті отримано чіткі зображення, що можуть бути детектовані на приймальній стороні в діапазоні від ~400-450 до 700 МГц (рис. 2.6, *в-з*), що підтверджує отримані в розділі 2.1 результати щодо робочого діапазону частот. Розподіли, що приведені на рис. 2.6, *a-b* та *и, є* розмитими та не підлягають детектуванню. Це зумовлено тим фактом, що співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$ перекриваються на рівні 1 або ж є меншими 1.

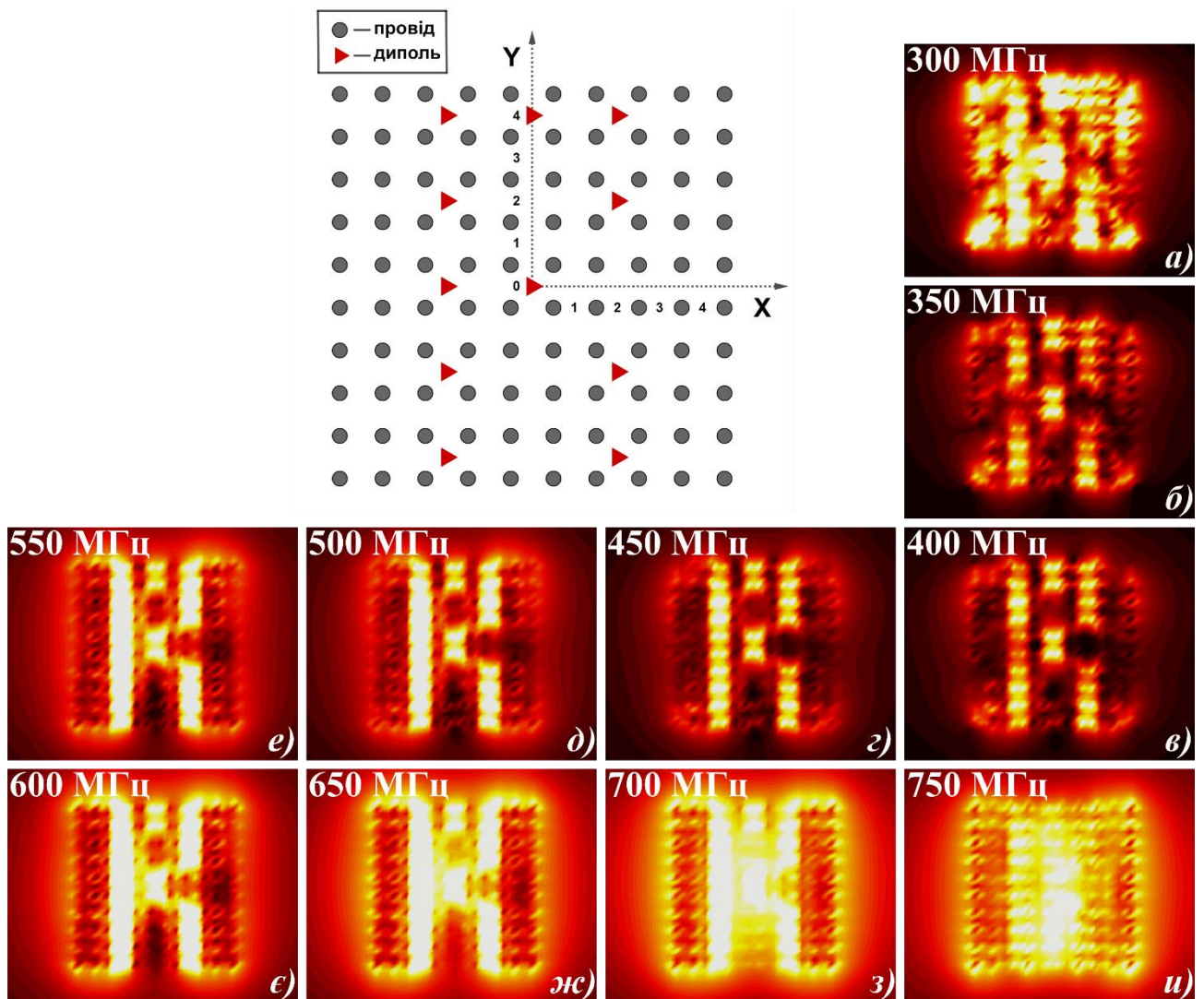


Рис. 2.6. Отримані шляхом комп'ютерного моделювання розподіли електричних полів на приймальній стороні у площині XY на глибині 10 мм від вихідного інтерфейсу СПП при значеннях частоти ЕМ сигналів, що передаються, у діапазоні 300...750 МГц із кроком 50 МГц у процесі передавання растрового зображення у вигляді латинської букви «R».

2.3. Передавання ЕМ сигналів через СПП із різним діелектричним заповненням у широкому діапазоні суб-ГГц частот

Вище приведені результати дослідження у суб-ГГц діапазоні частот через СПП, де у якості діелектрика (заповнення між провідниками) використано повітря. Проте, для розширення ряду можливих застосувань досліджуваної структури необхідно дослідити й інші матеріали із різним значенням діелектричної проникності та різним значенням втрат матеріалу. Для простоти експериментальних досліджень у якості діелектрика використано пісок із різним значенням вологості: 5% ($\epsilon = 2.53$ та $tg(\delta) = 0.0036$) та 45% ($\epsilon = 13$ та $tg(\delta) = 0.29$). Значення вологості матеріалу в експериментальних дослідженнях визначалось датчиком.

Експериментальний макет, що складається із передавального та приймального диполів, а також СПП із прошарком діелектричного матеріалу посередині, приведено на рис. 2.7. У процесі досліджень ширина діелектричного прошарку змінювалась: 10, 30 та 50 мм. Оскільки провідники СПП покриті тонким шаром лаку, то прямого контакту із піском немає і відповідно при підвищенні рівня вологості прямий вплив на СПП вологий пісок відсутній.

Результати експериментальних досліджень приведені в Додатку А (А1 – 10 мм, А2 – 30 мм, А3 – 50 мм), де перший стовпець відповідає вимірюванням із заповненням сухим піском (5%), а другий – вологим (5%). Процес вимірювання відповідав процесу, описаному в розділі 2.1. Із отриманих результатів видно, що ні наявність сухого піску, ні із підвищенням вологості (а відповідно і діелектричної проникності та втрат) співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$ не зазнають суттєвих змін у порівнянні із результатами, приведеними на рис. 2.5. Такий результат пояснюється шляхом аналізу розподілів електричного поля, приведених на рис. 2.6, з яких видно, що максимуми поля в основному зосереджені навкруг провідників, а не сконцентровані в центрі між двома чи чотирма сусідніми провідниками. За рахунок такої властивості передавання ЕМ

хвиль через СПП можна здійснювати при заповненні середовища між провідниками із різними характеристиками.

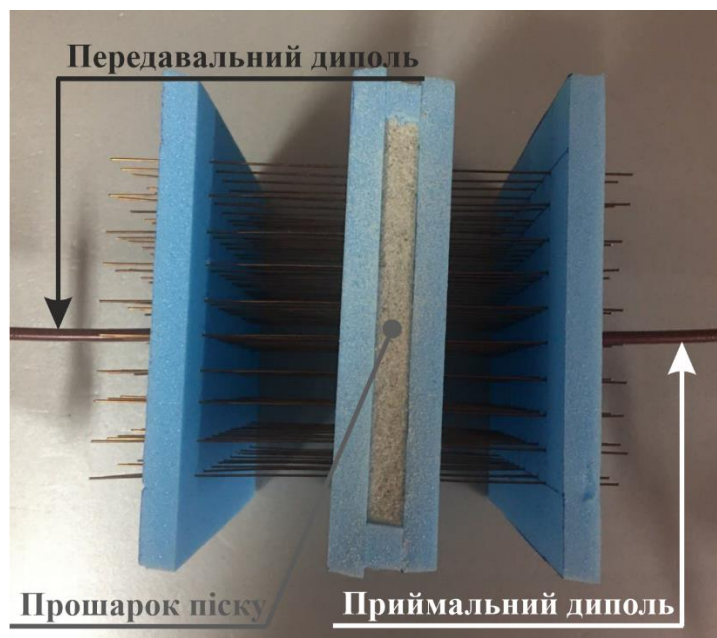


Рис 2.7. Експериментальний макет дослідження передавання ЕМ сигналів між двома дипольними антенами через СПП із діелектричним прошарком по середині структури.

Висновки

У роботі проведено дослідження передавання растрових зображень з використанням СПП. Ідея полягала в тому, щоб дискретизувати вхідний та вихідний інтерфейси структури, таким чином замінивши неперервні плоскі зображення на растрові. Забезпечити таку модель можна шляхом розміщення випромінювачів ЕМ хвиль у комірках між кінцями чотирьох сусідніх провідників. Проте, шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень показано, що розміщенням у кожній із комірок вхідного інтерфейсу детектування на приймальній стороні не є можливим. Таким чином, крок розміщення повинен становити $2a$, при цьому кількість пікселів структури становить $S/(4a^2)$.

Проведено експериментальні дослідження по передаванню ЕМ сигналів дипольної антени через СПП із різним значенням діелектричної проникності та втрат середовища, що заповнює простір між провідниками, використовуючи пісок із різним значенням вологості.

Результати роботи розширюють знання в області дослідження провідникових метаструктур для передавання зображень та енергії ЕМ хвиль у широкому діапазоні частот, на їх основі можна побудувати пристрої детектування речовин чи матеріалів, що розміщені всередині сипучих діелектриків або ж за рахунок зменшення розмірів та переведення у діапазон, наприклад, суб-ТГц чи ТГц, розробити пристрій ендоскопії для детектування мікробів, вірусів та шкідливих органічних клітин, а також дослідження спектральних характеристик поверхонь матеріалів.

Список використаної літератури

1. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic / A. Sihvola. // *Physical Review Letters*. – 2000. – №85. – С. 3966–3069.
2. Khobzei M. Overview of Applications of Wire Medium in Radio Engineering Means / M. Khobzei, D. Vovchuk, M. Michalska. // *IAPGOS*. – 2018. – №4. – С. 32–35.
3. Simovski C. Wire metamaterials: Physics and applications / C. Simovski. // *Advanced Materials*. – 2012. – №24. – С. 4229–4248.
4. Vovchuk D. Investigation of Frequencies Characteristics of Modified Waveguide Aperture by Wire Media / D. Vovchuk, M. Khobzei. // *Progress In Electromagnetics Research Letters*. – 2020. – №93. – С. 59–64.
5. Хобзей М. Структура із паралельних провідників як антена мікрохвильового діапазону частот / М. Хобзей. // *Матеріали XXII Міжнародного науково-молодіжного форуму “Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті” (Інформаційні радіотехнології та технічний захисту інформації)*,. – 2018. – С. 7–9.
6. Khobzei M. Model of Antenna Modified by Regular Wire Media for Control of its Main Characteristics / M. Khobzei, M. Apostolyuk, D. Vovchuk. // *International Joint Forum LEA'2018 & YSTCMT'2018*. – 2018. – С. 1–2.
7. Hyperlens makes thermal emission strongly super-Planckian / [C. Simovski, S. Maslovski, I. Nefedov та ін.]. // *Photonics and Nanisttructures – Fundaments and Applications*. – 2015. – №13. – С. 31–41.
8. Multi-mode broadband power transfer through a wire medium slab / [D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov та ін.]. // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2015. – №154. – С. 171–180.
9. Enhancement of Radiation With Irregular Wire Media / [S. Kosulnikov, M. Mirmoosa, D. Vovchuk та ін.]. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2016. – №12. – С. 5469–5474.

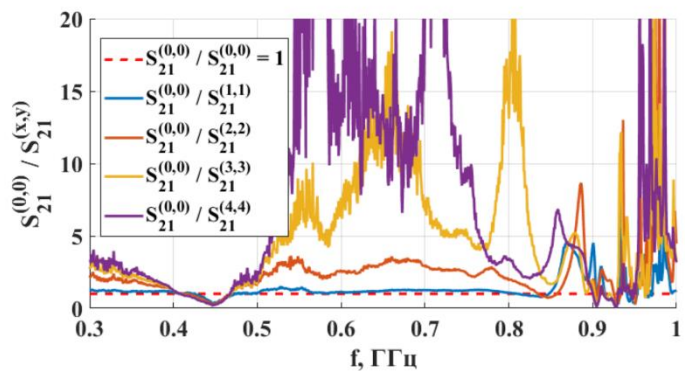
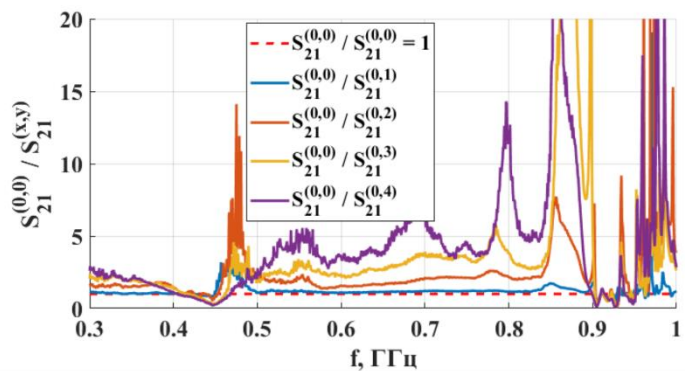
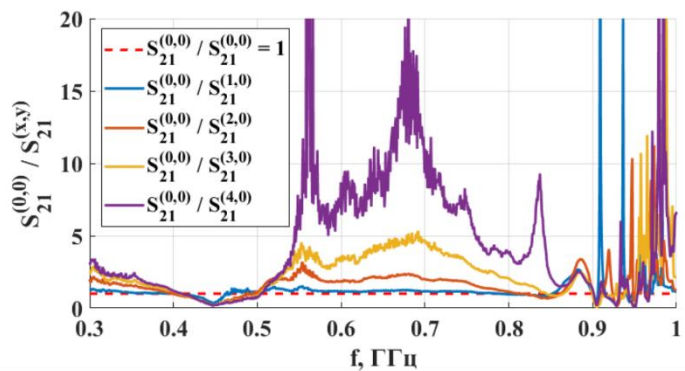
10. Belov P. A. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals / P. A. Belov, C. R. Simovski, P. Ikonen. // *Phys. Rev. B.* – 2005. – №71. – С. 193105.
11. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range / [P. Belov, Y. Zhao, S. Tse та ін.]. // *Phys. Rev. B.* – 2008. – №77. – С. 193108.
12. Ono A. Subwavelength optical imaging through a metallic nanorod array / A. Ono, J. Kato, S. Kawata. // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – №95. – С. 267407.
13. Wire metamaterials: Physics and applications / C. Simovski, P. Belov, A. Atrashchenko, Y. Kivshar. // *Adv. Mater.* – 2012. – №24. – С. 4229–4248.
14. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Medium Slab / [D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov та ін.]. // *Progress In Electromagnetics Research (PIER).* – 2015. – №154. – С. 171–180.
15. Broadband power transfer through a metallic wire medium slab / [S. Kosulnikov, D. Vovchuk, I. Nefedov та ін.]. // *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS).* – 2016. – С. 596–599.
16. Simovski C. Power Vortices in Wire-Medium Endoscopes (Invited) / C. Simovski, D. Vovchuk, S. Kosulnikov. // *12th International Congress Metamaterials, Espoo.* – 2018. – С. 315–317.
17. Vovchuk D. Unusual eigenmodes of wire-medium endoscopes: impact on transmission properties / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, C. Simovski. // *Optics Express.* – 2018. – №26. – С. 17988–18005.

Додаток А

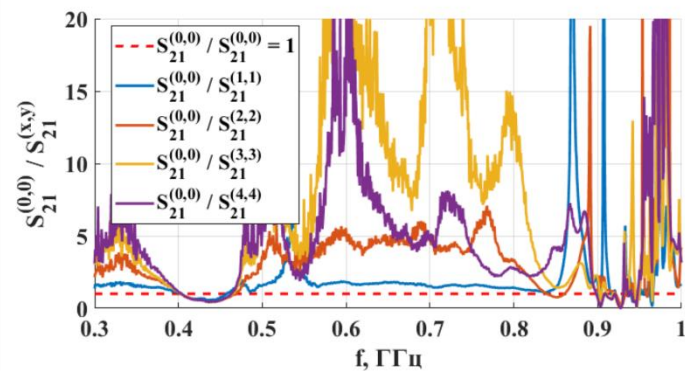
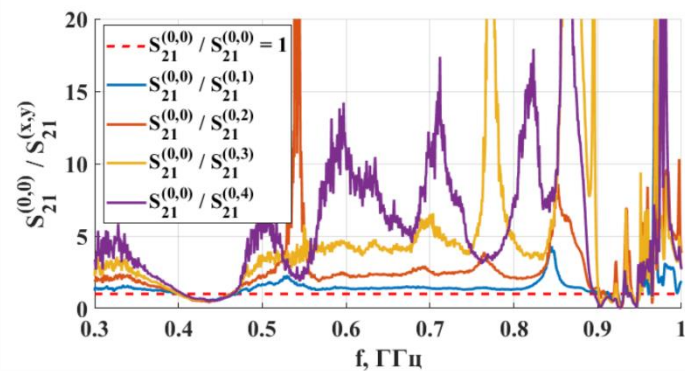
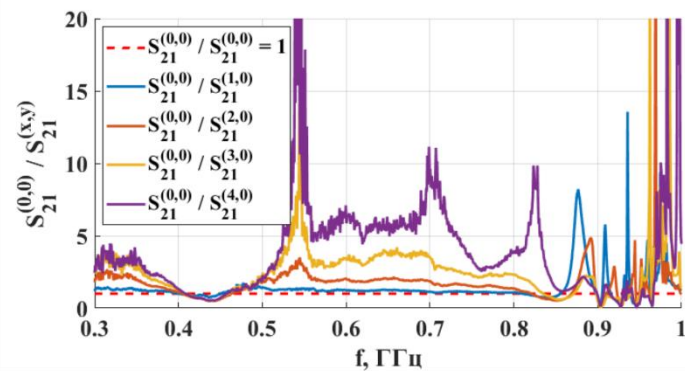
Результати експериментальних досліджень, що представляють собою співвідношення $S_{21}^{(0,0)} / S_{21}^{(x,y)}$ у випадку зсуву приймального диполя на $0a, 1a, 2a, 3a, 4a$ вздовж осей x та y , а також по діагоналі при передаванні через прошарок сухого та вологого піску по середині СПП товщиною: $A1 - 10$ мм, $A2 - 30$ мм, $A3 - 50$ мм

A1

Сухий

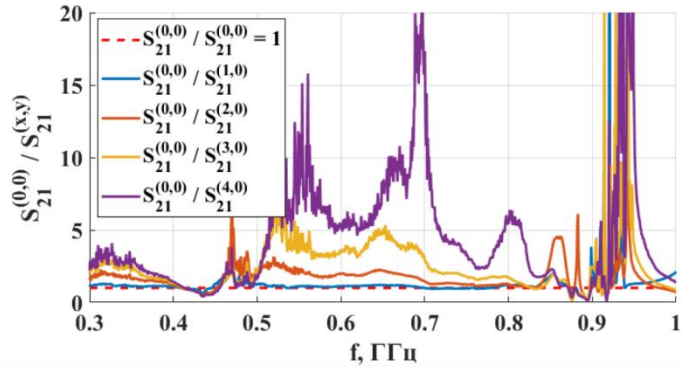


Вологий

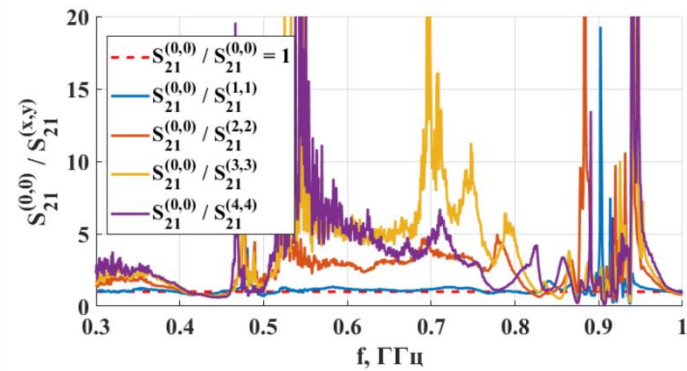
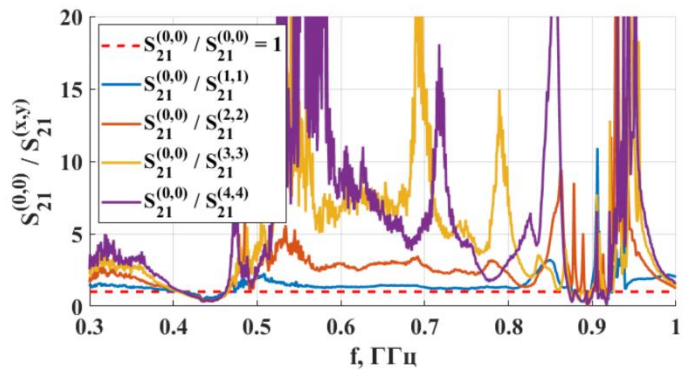
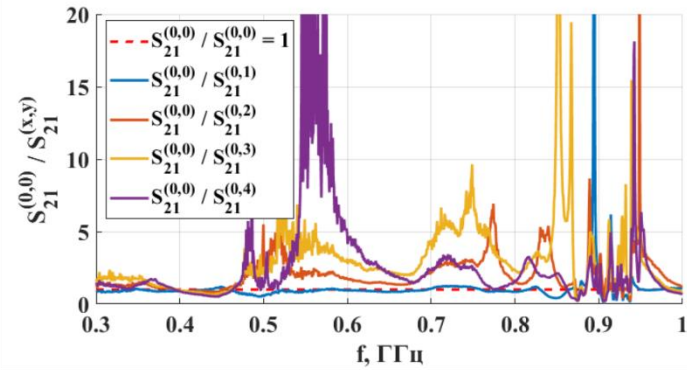
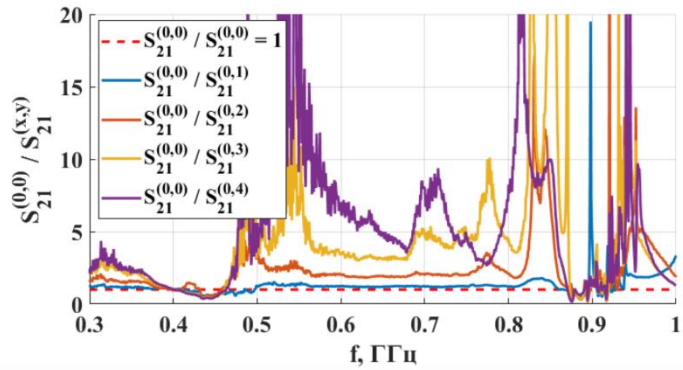
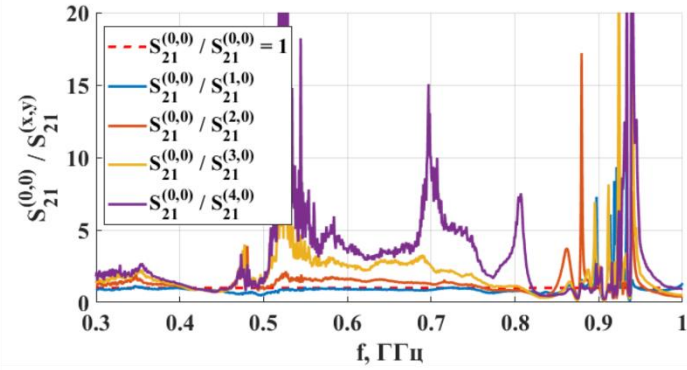


A2

Сухий

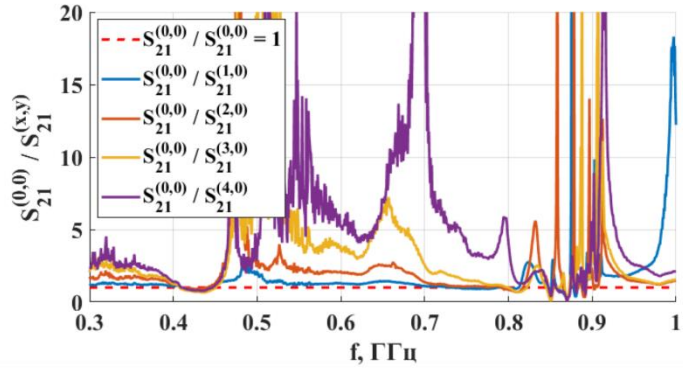


Вологий



A3

Сухий



Вологий

