

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.37:621.391

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т.М.

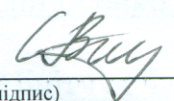
« 14 » 12 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: Дослідження багатовиткових рамкових антен для прийому
DVB-T2

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ЗТРМ-19

14.12.20 
(дата, підпис)

Вознюк С.С.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

14.12.20 
(дата, підпис)

Ципоренко В.В.

Житомир
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему: «Дослідження багатовиткових рамкових антен для прийому DVB-T2»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЗТРм-19
спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Вознюк С.С.

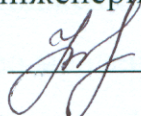
Керівник Ципоренко В.В.

Рецензент Нікітчук Т.М.

Житомир
2020

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук
« 15 » серпня 2020 р.

Завдання на атестаційну магістерську роботу

Вознюк Сергій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження багатовиткових рамкових антен для прийому DVB-T2»

затверджено наказом по університету від «16» листопада 2020 р. № 366/с

2. Мета дослідження: дослідження характеристик багатовиткових рамкових антен для прийому цифрового відео мовлення

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.)
частоти DVB-T2 для м.Житомир

4. Основні задачі дослідження: дослідити доцільність вибору багатовиткової рамкової антени на основі їх характеристик

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2020

6. Дата видачі завдання «15» серпня 2020 р.

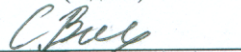
Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

Ципоренко В.В.

(прізвище, ініціали)


(підпис)

Вознюк С.С.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі здійснено дослідження характеристик багатовиткових рамкових антен для прийому цифрового відео мовлення.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження багатовиткових рамкових антен для заданого діапазону частот цифрового відео мовлення.

Підтверджено теоретичні розробки та положення програмним моделюванням та виконано дослідження основних властивостей характеристик багатовиткових рамкових антен, які дозволяють покращити параметри обробки сигналів у відповідності до заданих умов.

ANNOTATION

In the master's thesis the research of characteristics of multi-turn frame antennas for reception of digital video broadcasting is carried out.

Theoretical and experimental researches of multi-turn frame antennas for the set frequency range of digital video broadcasting are carried out.

Theoretical developments and provisions of software modeling are confirmed and the research of the basic properties of characteristics of multi-turn frame antennas which allow to improve parameters of signal processing according to the set conditions is executed.

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг складає 87 сторінок, з яких основний зміст викладено на 79 сторінках друкованого тексту, магістерська робота має в собі 26 звичайних рисунків та 100 рисунків взятих із комп'ютерної програми. Перелік джерел посилання нараховує 23 найменування.

Перелік ключових слів.

Рамкові антени, коефіцієнт стоячої хвилі, діаграма спрямованості.

Об'єктом досліджень є характеристики багатовиткових рамкових антен.

Предметом досліджень є методи покращення характеристик багатовиткових рамкових антен для цифрового відео мовлення.

Мета і задачі дослідження.

Для досягнення цієї мети розв'язувались наступні задачі:

- огляд та аналіз існуючих джерел літератури;
- дослідження характеристик багатовиткових рамкових антен;
- підтвердження теоретичних розробок та положень програмним моделюванням.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	9
1.1 Класична рамкова антена	9
1.2 Вхідний опір, ККД, коефіцієнт посилення і діаграма спрямованості класичної рамкової антени	10
1.3 Розміри класичної рамкової антени	13
1.4 Робота рамки з параметром, значно переважаючим довжину хвилі	18
1.5 Живлення рамкової антени	20
1.6 Багатовиткові рамкові антени	28
1.7 Цифрове відео мовлення DVB-T2	30
2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОВИТКОВОЇ РАМКОВОЇ АНТЕНИ	42
2.1 Критерій вибору антени	42
2.2 Діюча висота приймальної антени	42
2.2.1 Одновиткова рамка в електромагнітному полі	43
2.2.2 Діюча висота багатовиткової рамкової антени	46
2.3 Вхідний опір рамкової антени	48
2.4 Розрахунок антени	49
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАМКОВОЇ АНТЕНИ.....	50
3.1 Моделювання двовиткової дельтаподібної рамкової антени	50
3.2 Моделювання рамкової антени типу «подвійна петля»	67
ВИСНОВКИ	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	86

ВСТУП

Зародження передачі відео на відстані прийнято вважати з моменту, коли Александр Бейн винайшов в 1843 році факсовий апарат. Хоча апарат передавав статичні зображення, але сам принцип зчитувати і відтворювати зображення являється основою для передачі інформації на відстані. Наступною сходинкою розвитку була передача зображення за допомогою диска Пауля Ніпкова, який був винайдений 1884. До 1939 телевізійна трансляція відбувалась механічним способом, поки із винайденням електронно-променевої трубки не прийшла ера електричного способу. З використанням нового способу почався активний розвиток телебачення, і на даний момент розвивається цифрове телебачення, яке не має конкурентів.

Всьогодення цифрове телебачення майже повністю витіснило аналогове телебачення у світі. Для цифрового мовлення у різних частинах світу використовують різні стандарти: DVB – європейський, ATSC – американський, DTMB – китайський, ISBD – японський, DMB – північно-корейський.

У зв'язку з тим, що в Україні розвивається європейський стандарт, найбільш цікавим являються два покоління наземного телерадіомовлення DVB-T і DVB-T2.

DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) - європейський стандарт цифрового наземного телебачення вперше опублікований в 1997 р. Стандарт призначений для передачі стислого цифрового аудіо, відео та іншої інформації в форматі MPEG. Розробка другого покоління - DVB-T2 почалася в 2006 році, нова система обіцяла збільшення ефективності як мінімум на 30%, на тому ж обладнанні, що використовувалося першим поколінням.

Жодна система телерадіомовлення не обходиться без антени. Кожна антенна або приймає, або випромінює електромагнітні хвилі. Відповідно розрізняють прийомні і передавальні антени, що підключаються або до приймача, або до передавача за допомогою фідерів. Для прийняття сигналу DVB актуальною являється приймальна антенна, яка вловлює енергію вільних коливань і перетворює її в енергію хвиль.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВЧ	високочастотний
ДС	діаграма спрямованості
ЕМХ	електро-магнітна хвиля
УКХ	ультракороткі хвилі
КСХ	коефіцієнт стоячої хвилі
КХ	діапазон коротких хвиль
КАТВ	кабель антенний, телевізійний
ЦТБ	цифрове телебачення

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Класична рамкова антена

Основою багатовиткових рамкових антен являється звичайна рамкова антена. Такі антени, як рамкові антени, представляють собою подальший розвиток петлевого диполя. Класичний петлевий диполь (Рис. 1.1) має опір випромінювання, рівний приблизно 300 Ом.

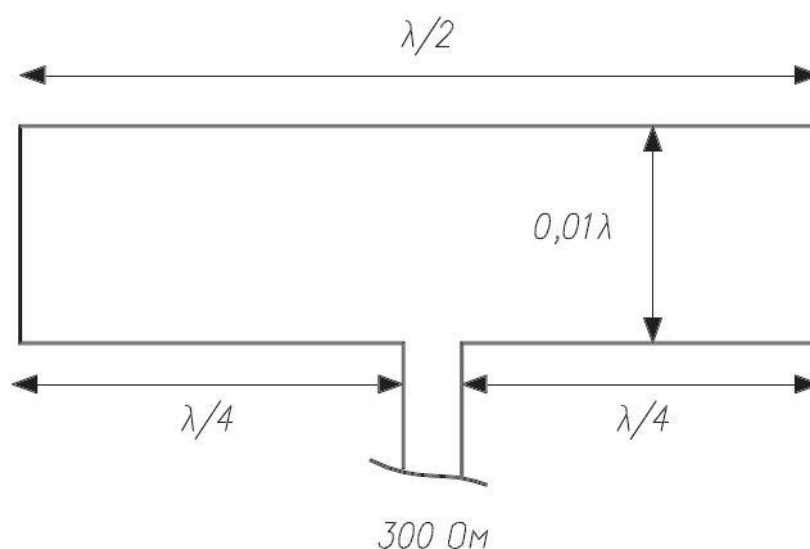


Рисунок 1.1 – Петлевий диполь

Смуга пропускання у петлевого диполя, як відомо з літератури, в кілька разів ширше, ніж у звичайного. Це його безсумнівна перевага; головним же його недоліком є високий вхідний опір. Якщо петлевий диполь «розтягнути», то вийде класична рамкова антена квадрат (рис. 1.2).

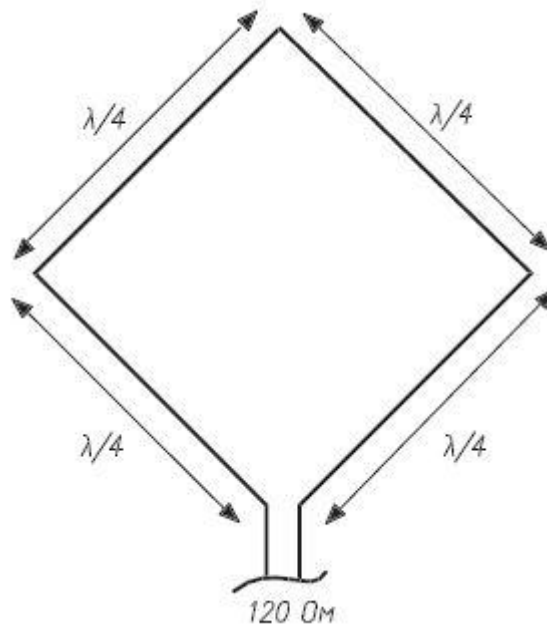


Рисунок 1.2 – Класична рамкова антена

Рамкова антена охоплює більший простір, ніж петлевий диполь. Тому вона має більш високий (у порівнянні з петльовим або простим диполем) коефіцієнт посилення. Оскільки і рамкові антени, і петльові диполі представляють собою симетричні антени, для їх правильного живлення потрібні симетрувальні пристрої. Рамкова антена, як і всі симетричні дипольні антени, для своєї роботи не потребує «землі». Рамки мають більш низький вхідний опір (близько 120 Ом), ніж петлевий диполь [5].

1.2 Вхідний опір, ККД, коефіцієнт посилення і діаграма спрямованості класичної рамкової антени

Розглянемо кілька типів рамкових антен, розташованих вертикально у вільному просторі (рис. 1.3).

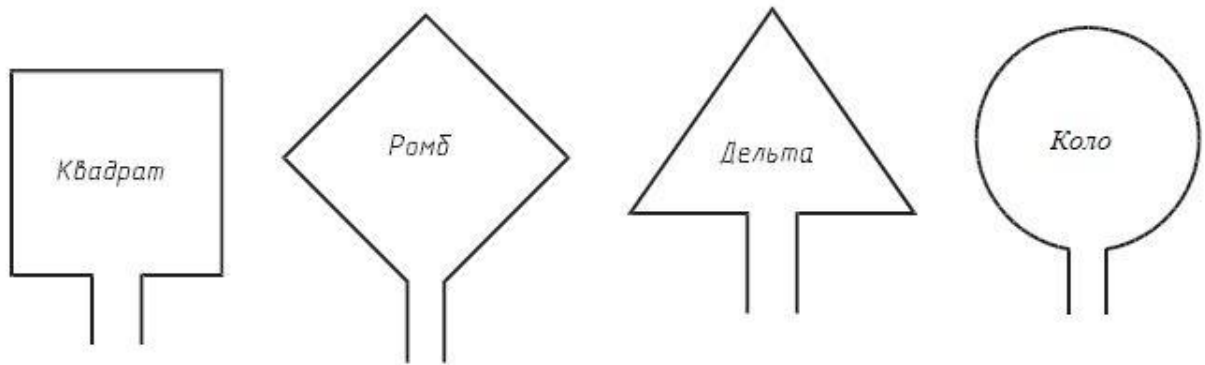


Рисунок 1.3 – Типи рамкових антен

При такому розташуванні їх діаграма спрямованості (рис. 1.4) в горизонтальній площині практично збігається з ДС диполя, а у вертикальній площині вона приблизно в два рази вужча.

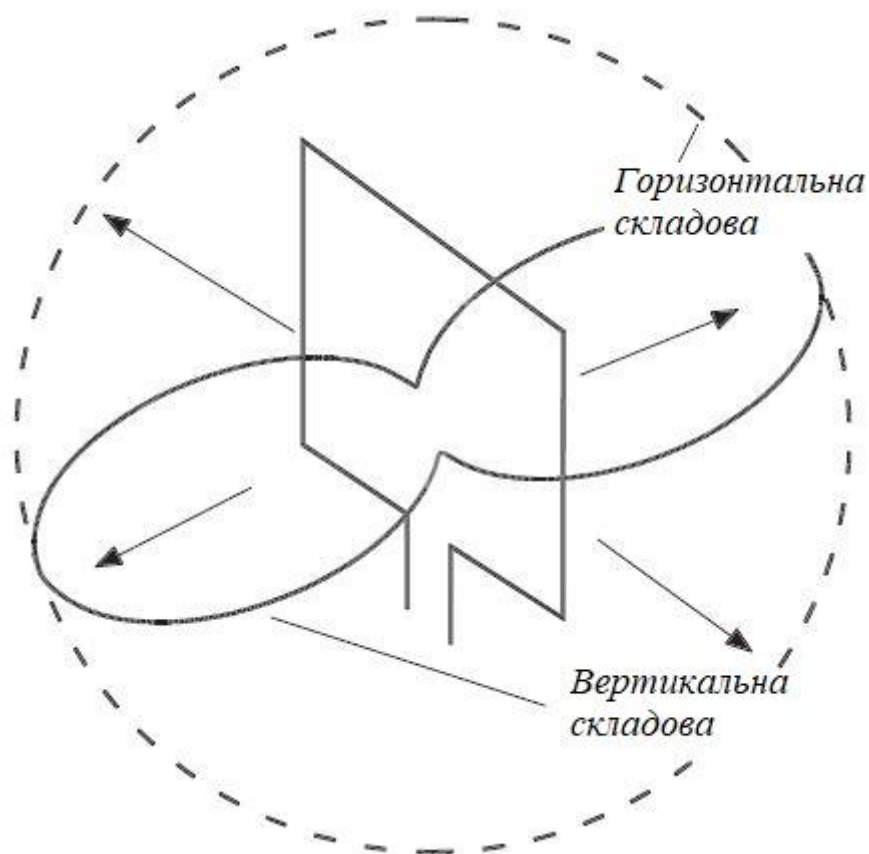


Рисунок 1.4 – Діаграма спрямованості рамкової антени у вертикальній і горизонтальній площинах

За рахунок того, що частина рамки розташована вертикально, значна частка випромінювання поляризована по вертикалі. В роботі [9] приведені

дані розрахунків вхідного опору рамок різної форми і їх коефіцієнти підсилення (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Параметри рамок різної форми

Вид рамки	Квадрат	Коло	Ромб	Дельта
Підсилення, дБ	3,14	3,49	3,14	2,82
Вхідний опір, Ом	117	133	117	106
Рівень вертикальної складової, дБ	-3,01	-3,74	-2,7	-2,09

Вони отримані на основі теоретичного дослідження, результати ж практичних вимірювань можуть дати декілька відмінні значення. З таблиці видно, що у рамкової антени будь-якої форми коефіцієнт посилення більше, ніж у диполя. Найвищий рівень вертикальної складової поля має антена в формі «дельти». Це зрозуміло: у неї довша, ніж у інших, вертикальна частина. Серед рамок різної форми, але з однаковим периметром, найбільшим посиленням володіє кругла рамка, що охоплює найбільшу площу. Вхідний опір рамки прямо пропорційно її коефіцієнту посилення. У дельтаподібної рамки він найвищий, а у круглої - найнижчий. Коефіцієнт корисної дії у рамкової антени трохи вище, ніж у диполя, і реально досяжні значення становлять 90% і більше.

Все вищесказане відноситься до вертикальних рамок, розташованих у вільному просторі. Але рамку, нижня частина якої знаходиться від землі на висоті понад чверть робочої довжини хвилі, можна вважати ідеальною, так що дані, наведені тут, вірні також і для неї.

Іноді можна зустріти описи рамок антен з нетрадиційною конфігурацією, що дозволяє краще узгодити антену з фідером. Прикладом може служити, зображена на рис. 1.5 антена з вхідним опором, близьким до

60 Ом; її можна живити безпосередньо через коаксіальний кабель 50 або 75 Ом.

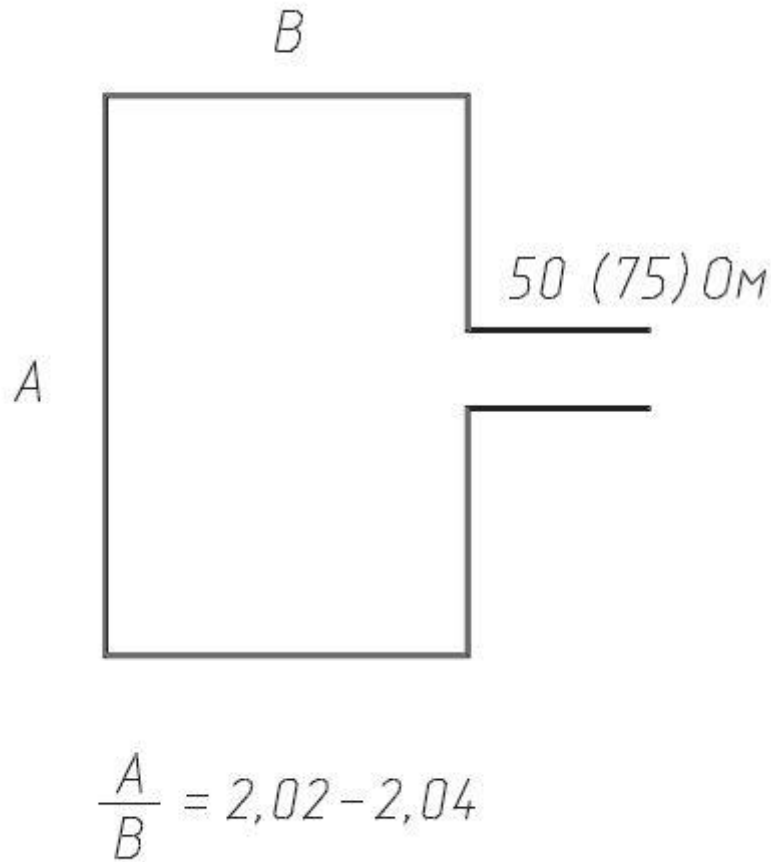


Рисунок 1.5 – Низькоомна рамкова антена

Коефіцієнт підсилення такого рамки всього на 1 дБ перевищує коефіцієнт посилення диполя. Це менше, ніж у рамок класичної форми (див. рис. 1.2). Проте, дані при таких типах рамок можуть бути корисними при конструюванні антен для низькочастотних діапазонів з невисокими опорами для установки [10] - [12].

1.3 Розміри класичної рамкової антени

Як говорилося вище, рамка є видом петлевого диполя. Через вплив кінцевої ємності довжина плеча у такого диполя трохи менше чверті робочої довжини хвилі і складає приблизно $0,248-0,249\lambda$ (рис. 1.6), в залежності від діаметра дроту, з якого він виконаний.

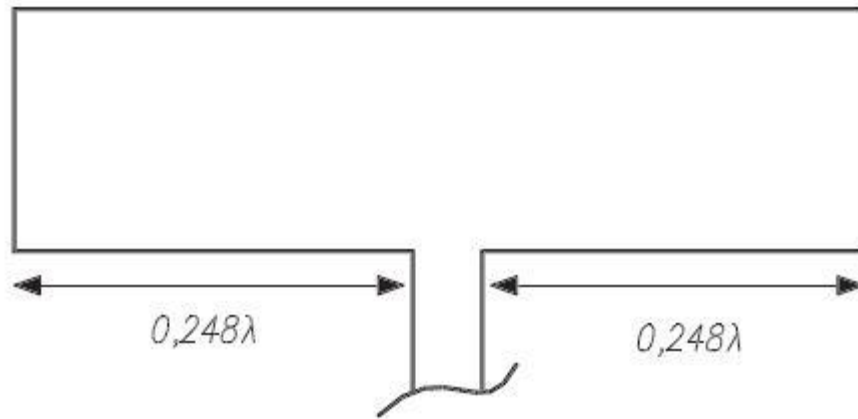


Рисунок 1.6 – Розміри резонансного петлевого диполя

На відміну від вібраторних антен, в рамковій антені вплив кінцевих ємностей відсутні (оскільки відсутні кінці). Тут, в результаті взаємодії випромінюючих сторін рамки відбувається квазі-зменшена фізична довжина. Так, периметр квадратної рамки, налаштованої в резонанс з робочою частотою, дорівнює 1,01-1,02 від відповідної довжини хвилі у вільному просторі (рис. 1.7).

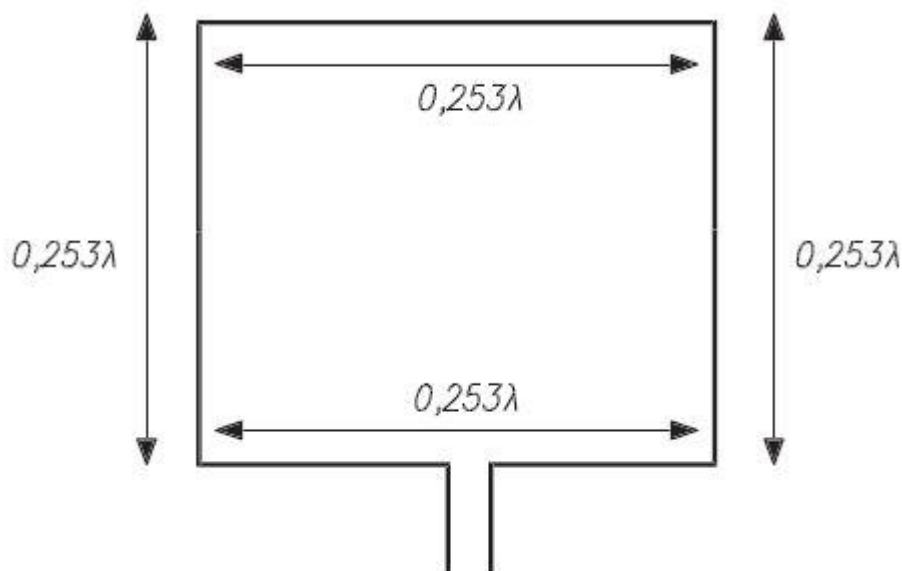


Рисунок 1.7 – Розміри класичної рамкової антени

У рамок інших форм периметр повинен бути таким же. Але якщо рамка розміщується на малій висоті і біля неї знаходяться сторонні предмети, то, можливо, доведеться підбирати довжини її сторін. У будь-якому випадку

периметр треба трохи зменшувати. Налаштовують рамку по мінімуму КСХ в середній точці робочого діапазону. У табл. 1.2 наведені значення периметра рамкової антени, резонуючій на основній частоті (при $n = 1$) і на частотах непарних гармонік ($n = 1,3,5, \dots$) для всіх аматорських КХ і частини УКХ діапазонів.

Таблиця 1.2 – Периметр рамки, резонуючій на робочій частоті і на її гармоніках

<i>Номер гармоніки, n</i>						
1	3	5	7	9	11	13
6	18	30	42	54	66	78
10	30	50	70	90	110	130
12	36	60	84	108	132	156
15	45	75	105	135	165	
17	51	85	119	153		
20	60	100	140	180		
30	90	150	180			
40	120	200	280			

У рамкових антен, на відміну від дипольних, діаметр полотна не впливає на коефіцієнт укорочення. Для них характерно, що зі збільшенням діаметра дроту зростає широкополосність антени. При діаметрі дроту 1-2 мм рамкова антена перекриває будь-який аматорський діапазон в межах від 1,8 до 144 МГц. Однак подальше збільшення діаметра призводить в основному лише до зростання її ваги і механічної міцності, а також до незначного підвищення її ККД. Звичайно, при використанні більш товстого дроту налаштування рамки спроститься і зменшиться вплив на рамку сторонніх предметів.

Вочевидь, відмінності в даних щодо окремих параметрів рамок, які призводять радіоаматори, пояснюються тим, що вони використовують дроти різного діаметра і рамки різної форми, підвішені на різній висоті. При цьому мова йде про вхідний опір, і також - про живлення та погодження антени в робочому діапазоні частот і про посилення рамки. Результати аналізу цих даних показують, що оптимум, очевидно, відповідає круглій підвішеній вертикально на висоті не менше чверті довжини хвилі рамці з периметром $1,01-1,02\lambda$.

При побудові рамкових антен корисно звернути увагу на те, що точка, що лежить в середині протилежної сторони рамки щодо місця підключення живлення (рис. 1.8), має нульовий потенціал. Цим можна скористатися, наприклад для заземлення полотна антени на щоглу або на траверсу. На рис. 1.8 схематично представлені конструкції заземлених одноелементних (а) і багатоелементних (б) рамкових антен.

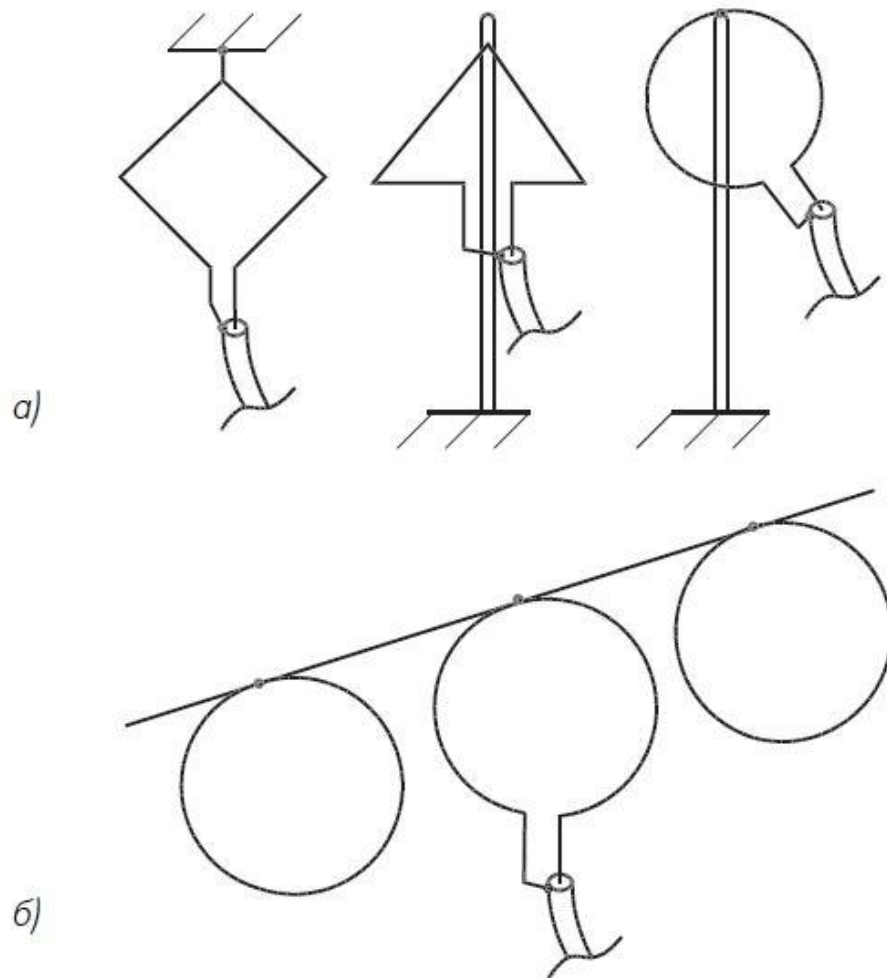


Рисунок 1.8 – Заземлені рамкові антени

Таке заземлення істотно забезпечить роботу в передгрозовий період, а також прибере електростатичний потенціал з антени і просто може бути зручним з конструктивної точки зору. Якщо центр полотна заземлений, то живлення антени необхідно здійснювати тільки через симетруючий пристрій. В іншому випадку її коефіцієнт посилення може зменшитися на 0,5-1,5 дБ. Більшою мірою це відноситься до рамок для низькочастотних діапазонів, в яких сильно проявляються різні розсиметруючі впливи [13].

Периметр рамкової антени розраховується за формулою: $L = 300 \cdot K / F$, де L - довжина рамки в метрах; F - частота в МГц; K - коефіцієнт подовження.

Останній приймається рівним 1,01 для товстого дроту діаметром 3 мм і більше 1,02 - для дроту діаметром менше 1-2 мм.

1.4 Робота рамки з параметром, значно переважаючим довжину хвилі

Серед радіоаматорів існує думка, що чим більше периметр рамки, тим в більш широкому робочому діапазоні вона може працювати. Нажаль, це не так. Рамкова антена - резонансна, і ефективно працювати може тільки в своєму резонансному діапазоні частот.

На рис. 1.9 показані периметр (Π_r) і довжини (L_p) плечей петлевого диполя [7] і сторін рамкової антени, відповідні резонансу на основній частоті та її гармоніках. У табл. 2.2. наведені значення периметра рамкової антени, резонуючій на основній частоті (при $n = 1$) і на гармоніках ($n = 3, 5, 7, \dots$).

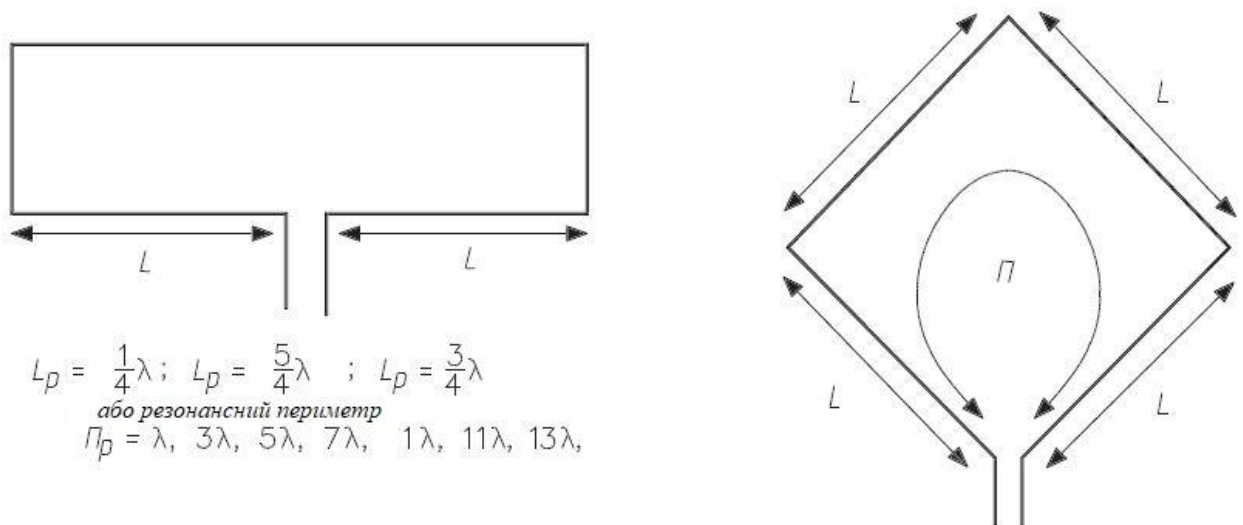


Рисунок 1.9 – Резонансні розміри петлевого диполя і рамки на основній частоті та гармоніках

Теоретично посилення довгої рамки вище, ніж короткої, проте реалізувати його без налаштування рамки в резонанс і подальшого узгодження її із лінією живлення неможливо. З табл. 1.2 видно, чого слід очікувати від рамки в конкретних діапазонах. Жодне з наведених значень периметра рамки не в змозі забезпечити прийнятних параметрів одночасно в

декількох аматорських діапазонах, оскільки він не є в них резонансним. У той же час при використанні тюнера [8] можна домогтися узгодження і задовільної роботи антени у всіх діапазонах, що лежать вище основної частоти, на яку налаштована рамка. Не можна тут не згадати класичний спосіб узгодження рамки для багатодіапазонної роботи, запропонований в [6]. Важко придумати що-небудь більш просте і красиве (рис. 1.10). Тут узгодження рамки здійснюється за допомогою включених симетрично по обидва її боки котушок індуктивності (L_1 , L_2). При цьому струм в антені розподіляється таким чином, що рамка резонує на довжині хвилі не тільки 160, але і 80, 40, 20 і 10 м.

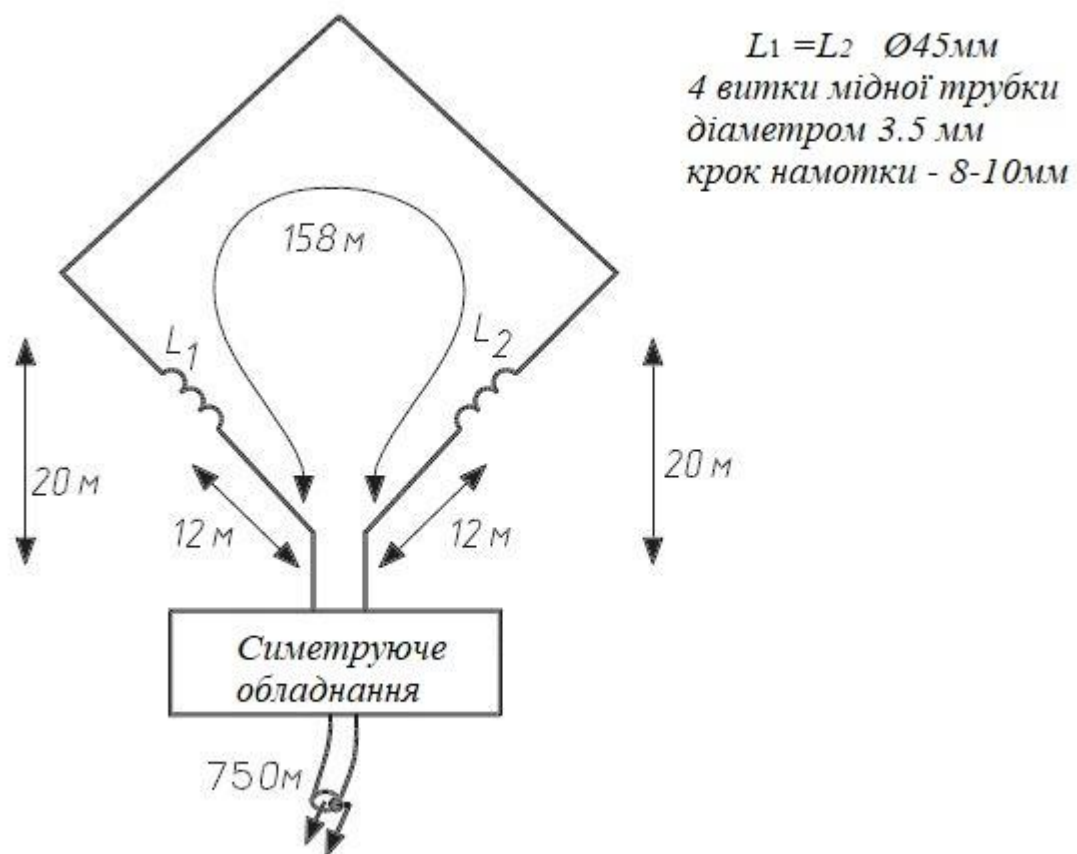


Рисунок 1.10 – Узгоджена за допомогою котушок багатодіапазонна рамкова антена

Налаштування системи в даному випадку полягає лише в налаштуванні рамки в резонанс в діапазоні довжин хвиль 160 м і в невеликому регулюванні

індуктивності котушок для отримання резонансу в інших діапазонах. Без цих котушок антена працює тільки в діапазоні 160 м. Якщо ж потрібно забезпечити досить ефективну роботу в декількох діапазонах, то для кожного з них необхідно використовувати окрему рамку. Варіант рамкової антени, спроектованої для низькочастотних діапазонів, з додатковим узгодженням в високочастотних діапазонах можна розглядати лише як допоміжний.

ДС рамки на гармоніках має приблизно такий же вигляд, як і на основній частоті, однак кількість і рівень пелюсток в ній вище і розташовуються вони більш полого [14] - [16] .

1.5 Живлення рамкової антени

Правильне живлення будь-якої антени є дуже важливим фактором її ефективнішої роботи. При використанні рамкової антени потрібно пам'ятати, що вона - симетрична, тому в ланцюзі живлення потрібно симетруючий пристрій. Якщо його немає, то виникає наводка перевідбиттів від різних предметів електромагнітної хвилі на зовнішню поверхню коаксіального кабелю, а потім проникнення її в антену (рис. 1.11) [17].

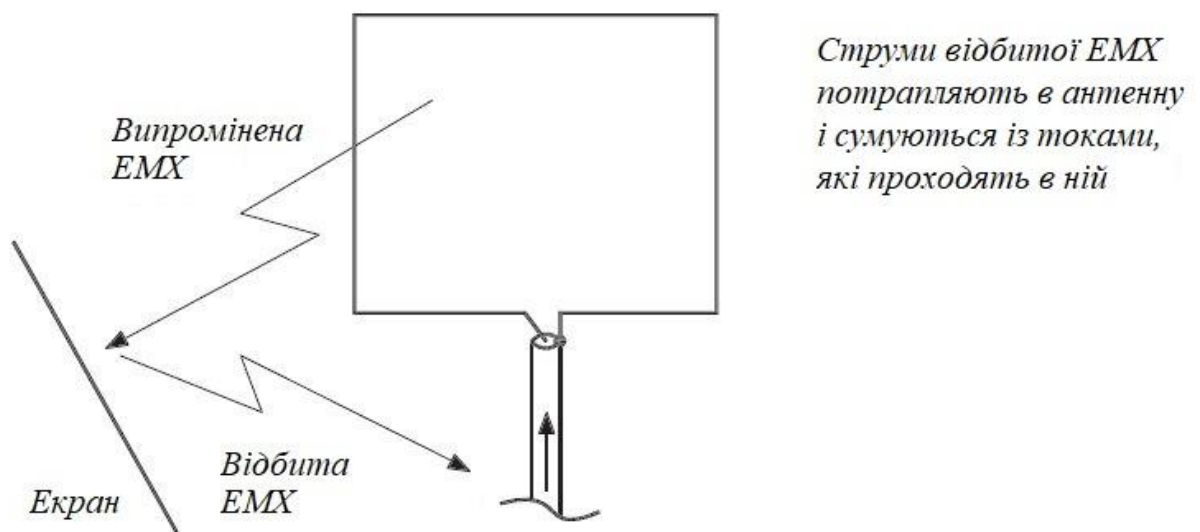


Рисунок 1.11 – Розсиметрування рамки

В цьому випадку наведені на зовнішній поверхні струми складаються всередині антени із струмами, порушуваними передавачем, що призводить до зростання КСХ і виникнення додаткових перешкод за рахунок випромінювання також і оболонки кабелю. У режимі прийому в коаксиальному кабелі виникне так званий «антенний ефект», коли енергія радіохвиль, наведена в його зовнішній оболонці, потрапляє на вхід приймача.

Найпростіше симетруючий пристрій можна зробити з 2-10 витків коаксиального кабелю (відповідно для частот 28 і 1,8 МГц) на досить великому феритових кільцях (рис. 1.12б), наприклад від відхиляючої системи телевізорів (годяться кільця зі значенням магнітної проникності в широких межах). При відсутності феритового кільця можна намотати 10-30 витків коаксиального кабелю на пластиковій пляшці діаметром 40-60 мм (рис. 1.12а).

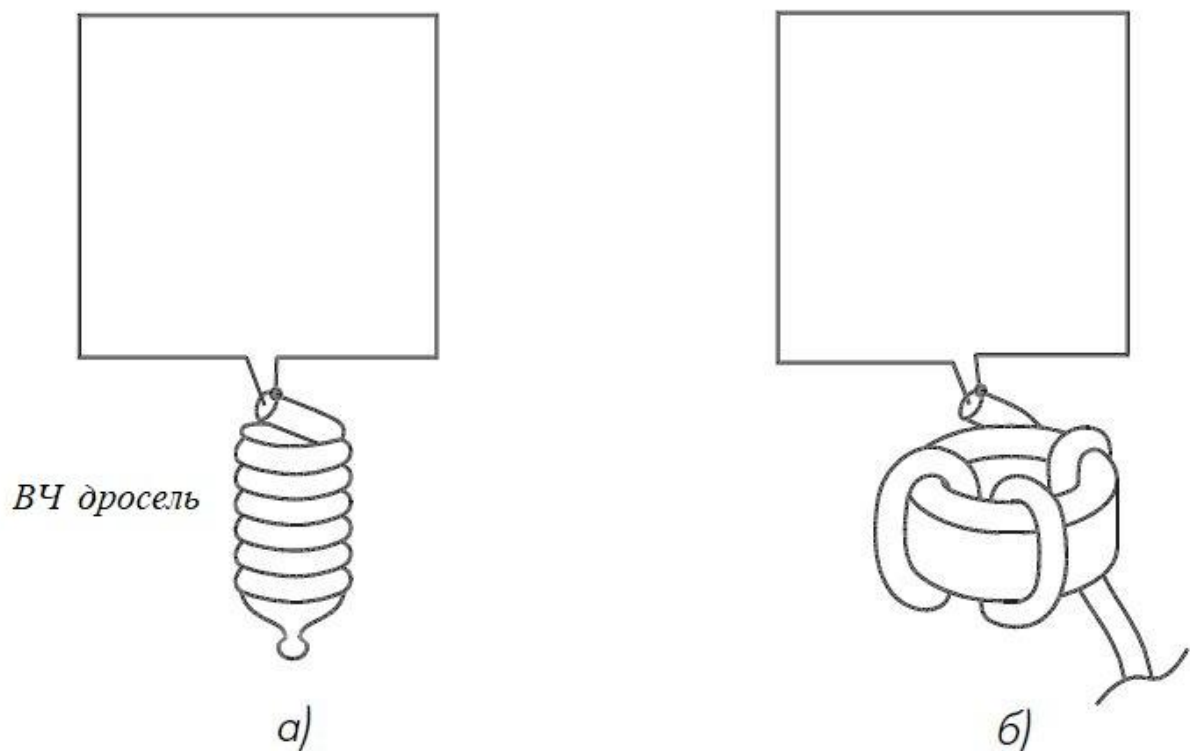


Рисунок 1.12 – Симетрування антени ВЧ дроселем

Виготовлений таким способом ВЧ дросель не пропустить наведений на зовнішній оболонці кабелю ВЧ струм в антену і назад, що рівносильно

симетруванню. На струми, які відбуваються всередині оболонки коаксіального кабелю, дросель впливу не робить. Це пристрій особливо ефективно, якщо з яких-небудь причин кабель виявився налаштованим в резонанс з основною частотою антени, з її непарними гармоніками, або з гармоніками передавача. У всіх цих випадках паразитне випромінювання кабелю особливо велике.

Слід також брати до уваги, що вхідний опір хвильової рамки становить 110-130 Ом. У рамки, горизонтальна частина якої підвішується близько до землі, воно зменшується і може виявитися нижче 50 Ом. Рамки, призначені для роботи ВЧ діапазонах і досить високо підвішені, мають вхідний опір близький до теоретичного (110-130 Ом). Звичайний спосіб узгодження для них - використання чверть-хвильового трансформатора (рис. 1.13).

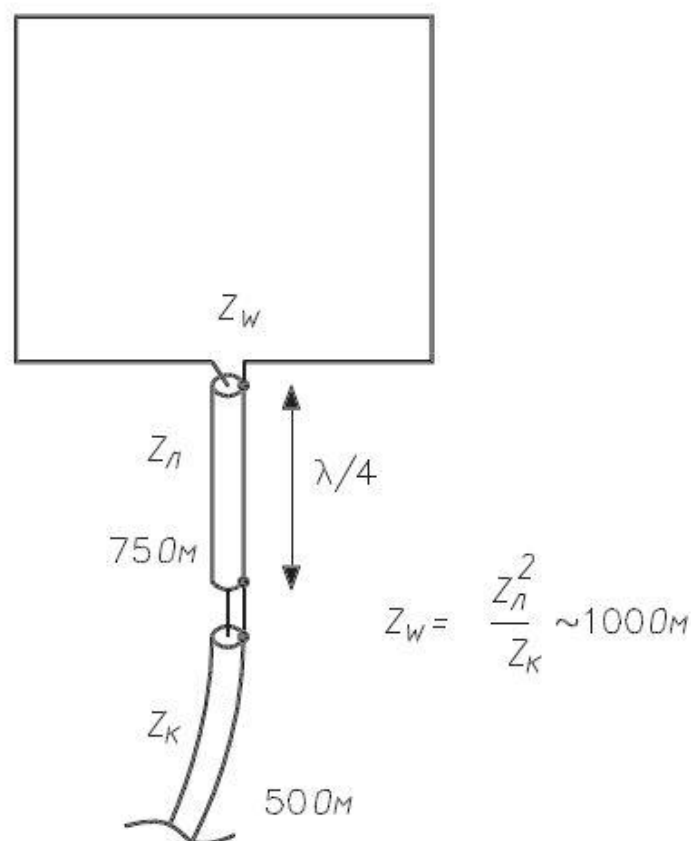


Рисунок 1.13 – Живлення рамкової антени через чверть-хвильовий трансформатор

Якщо він зроблений з 75-омного кабелю (треба не забувати про коефіцієнт укорочення 0,66-0,68 - в залежності від типу пластикової ізоляції кабелю), а лінія передачі - з 50-омного, то, як правило, досягається гарне узгодження рамкової антени. Можлива комбінована конструкція у вигляді намотування з коаксіального кабелю на пластиковій пляшці (рис. 1.14), що виконує одночасно функції чверть-хвильового трансформатора і симетруючого пристрою [18].

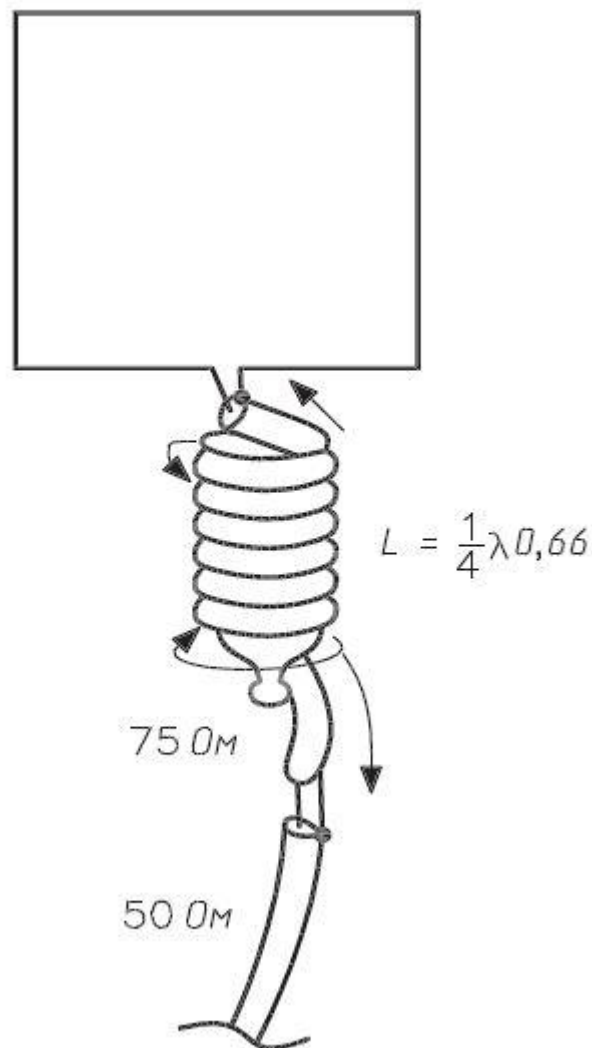


Рисунок 1.14 – Використання чверть-хвильового трансформатора для симетрування рамки

Іноді хороші результати дає живлення рамки через застосовувану в дротяної телефонії симетричну пару-скрутку. Її хвильовий опір лежить в межах 60-130 Ом, що дуже зручно при узгодженні рамки. Хвильовий опір

скручування можна визначити експериментально, якщо є прилади для вимірювання індуктивності та ємності. Для цього шматок скручування, практично будь-якої довжини (зручніше 2-3 м), підключається до вимірювального приладу. Спочатку вимірюють ємність (C_x) на одній стороні скручування при розімкнутих кінцях на іншій, потім останні замикають і визначають індуктивність (L_x), як показано на рис. 1.15.

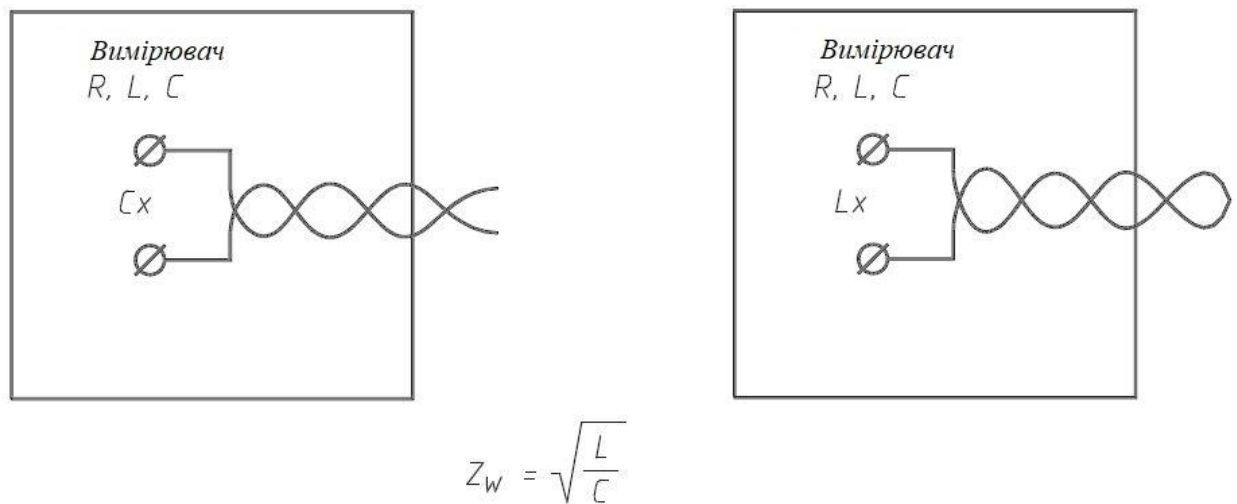


Рисунок 1.15 – Визначення хвильового опору скручування

Хвильовий опір розраховується за відомою формулою:

$$Z_w = \sqrt{L_x / C_x},$$

де Z_w - хвильовий опір скручування, Ом;

L_x - індуктивність скручування, Гн;

C_x - ємність скручування, Ф.

Часто використовують також і гамма-узгодження. На рис. 1.16 показані два варіанти підлаштування пристрою гамма-узгодження - конденсатором (а) і за допомогою перемички (б).

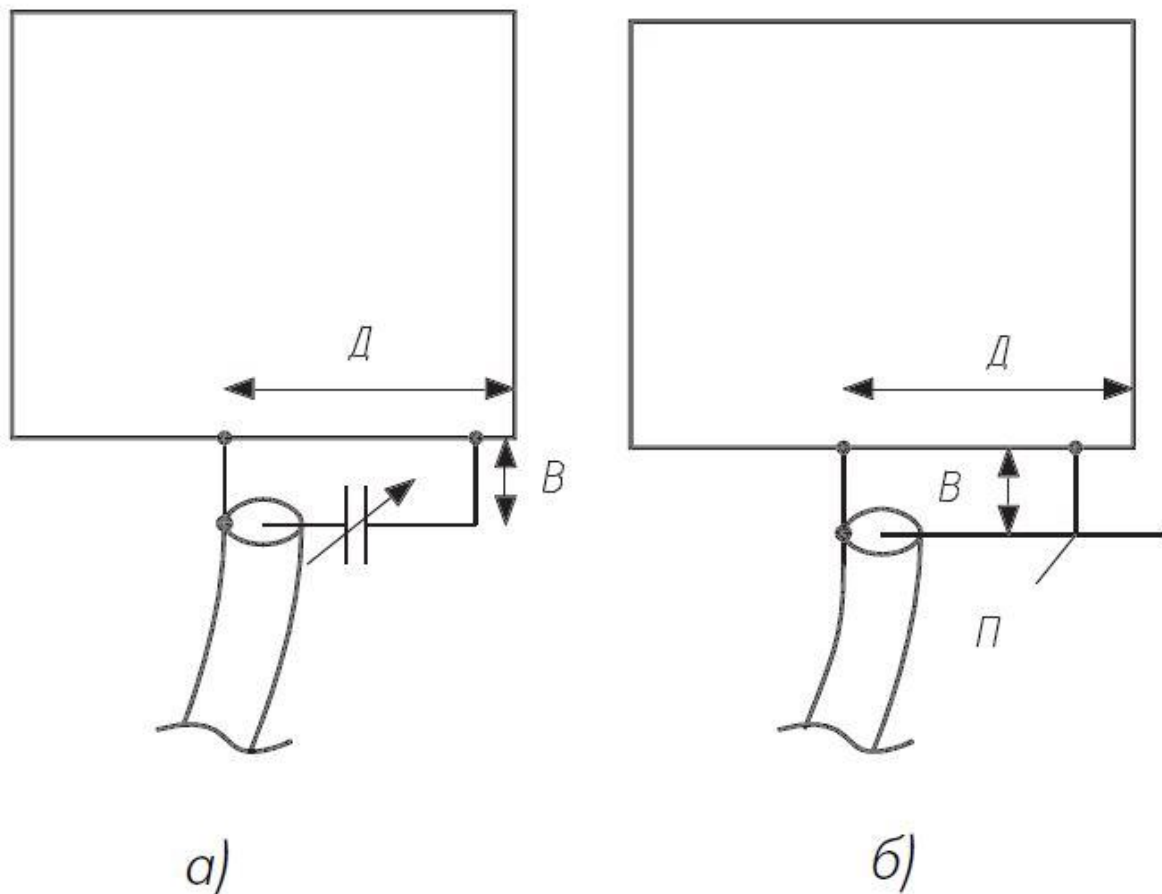


Рисунок 1.16 – Живлення рамки через пристрій гамма-узгодження

Фізично гамма-узгодження означає підключення кабелю до тієї точки антени, в якій вхідний опір для струмів високої частоти активне і рівне хвильовому опору кабелю. Розрахунок гамма-узгодження нескладний. Висоту B (див. Рис. 1.16) не обов'язково витримувати з високою точністю; вона визначається за формулою: $B = (2 \dots 4) \lambda / 10$, де B - висота в сантиметрах; λ - довжина хвилі в метрах.

Наприклад, для довжини хвилі 40 м: $B = (2 \dots 4) \times 40/10 = 8 \dots 16$ см

Відстань D знаходимо з виразу $D = 3\lambda$, де D – відстань в сантиметрах; λ - довжина хвилі в метрах.

Наприклад, для довжини хвилі 40 м: $D = 3 \times 40 = 120$ см

Величина максимальної місткості підлаштування конденсатора визначається за формулою: $C = 5\lambda$, де C - ємність конденсатора в пікофарад; λ - довжина хвилі в метрах.

Наприклад, для довжини хвилі 40 м: $C = 5 \times 40 = 200$ пФ

Ці формули отримані дослідним шляхом і в них одночасно використовуються різні одиниці виміру.

На практиці вибирають кілька більшу відстань D , ніж це впливає з розрахунків, і підключають для підстроювання узгодження змінний конденсатор, за допомогою якого можна забезпечити компенсацію індуктивної складової вхідного опору схеми гамма-узгодження та отримати в кабелі КСХ, близький до одиниці. В іншому випадку додаткове узгодження рамки доводиться здійснювати перемичкою Π (рис. 1.16б), оскільки вхідний опір реальної рамки не завжди збігається з теоретичним значенням. Використання методу гамма-узгодження дозволяє застосовувати цільні металеві рамки, більш міцні і зручні при установці, особливо для роботи на УКХ. Гамма-узгодження призводить також до зменшення рівня перешкод прийому телебачення, так як не є оптимальним по відношенню до гармоникам основного сигналу і шунтує їх на виході кабелю - вході антени.

Параметри пристроїв гамма узгодження представлені в табл. 1.3. Краще, якщо провід погоджувальної схеми буде вдвічі тонше дроту полотна рамки (в крайньому випадку, він повинен бути не товще його і не тонше жили коаксіального кабелю живлення). При потужності передавача 100 Вт бажано, щоб конденсатор змінної ємності був з повітряним зазором між пластинами не менше 0,5 мм. Для потужностей до 100 Вт цілком підійде і керамічний підлаштований конденсатор (його обов'язково треба ізолювати від проникнення вологи).

Таблиця 1.3 – Параметри схеми гамма-узгодження для різних діапазонів

Діапазон, м	160	80	40	30	20	17	15	12	11	10	6	2
Відстань, см	480	240	120	90	60	51	45	36	33	30	18	6
Висота, см	32	16	8	6	4	3,6	3,6	3	3	3	2	1
Ємність, пФ	800	400	200	150	100	85	75	60	55	50	30	10

По можливості слід використовувати симетричне гамма-узгодження і включати в схему живлення антени симетруючий пристрій (рис. 1.17).

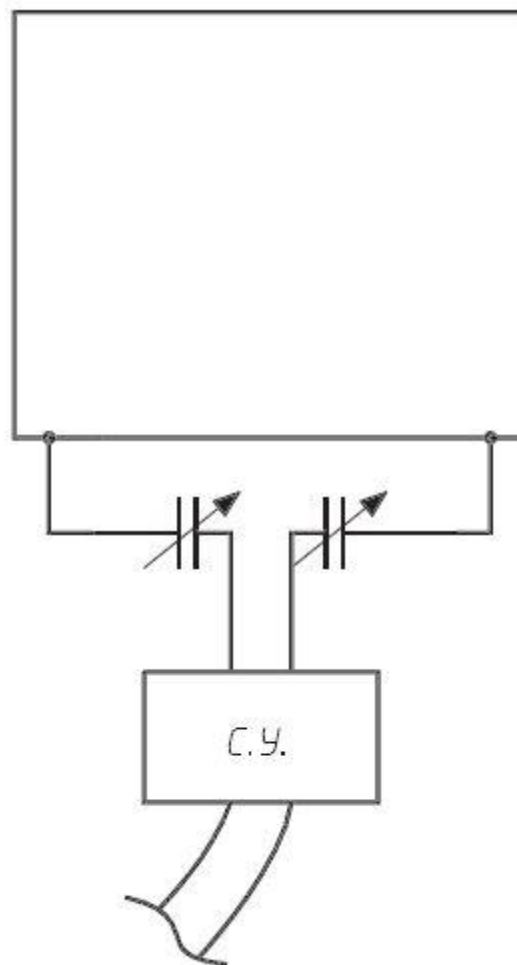


Рисунок 1.17 – Симетрувальний гамма-погоджувальний пристрій

Налаштування гамма-погодження проводиться таким чином: за допомогою конденсатора або шляхом зміни довжини погоджувального пристрою намагаються домогтися мінімуму КСХ в середині робочого діапазону антени.

Спрощений варіант живлення рамки - застосування високоомної двухпровідної лінії, наприклад типу КАТВ, або так званої «локшини». Оскільки ця лінія має хвильовий опір близько 300 Ом для КАТВ і 400-600 Ом для різних видів «локшин», живлення антени буде здійснюватися в режимі стоячої хвилі.

Крім основної частоти і непарних гармонік, рамка з таким живлення працює і на парних гармоніках. Це означає, що рамку для діапазону 160 м можна узгодити також і на всіх аматорських КВ діапазонах. Але її узгодження з вихідним каскадом передавача на його гармоніках не гарантує ефективності її роботи в цих діапазонах, оскільки режим роботи рамки може виявитися нерезонансним, а значить, ККД буде низьким. Проте, як допоміжна антена, така рамка буває корисною для повсякденної роботи в ефірі.

У будь-якому випадку коаксіальний кабель з симетруючим пристроєм або симетрична лінія передачі (якщо вони використовуються) повинні на можливо більшій протяжності розташовуватися перпендикулярно до лінії, що проходить через точки живлення рамки [16].

1.6 Багатовиткові рамкові антени

Класична рамкова антена містить один виток дроту, однак існують і багатовиткові рамкові антени (рис. 1.18).

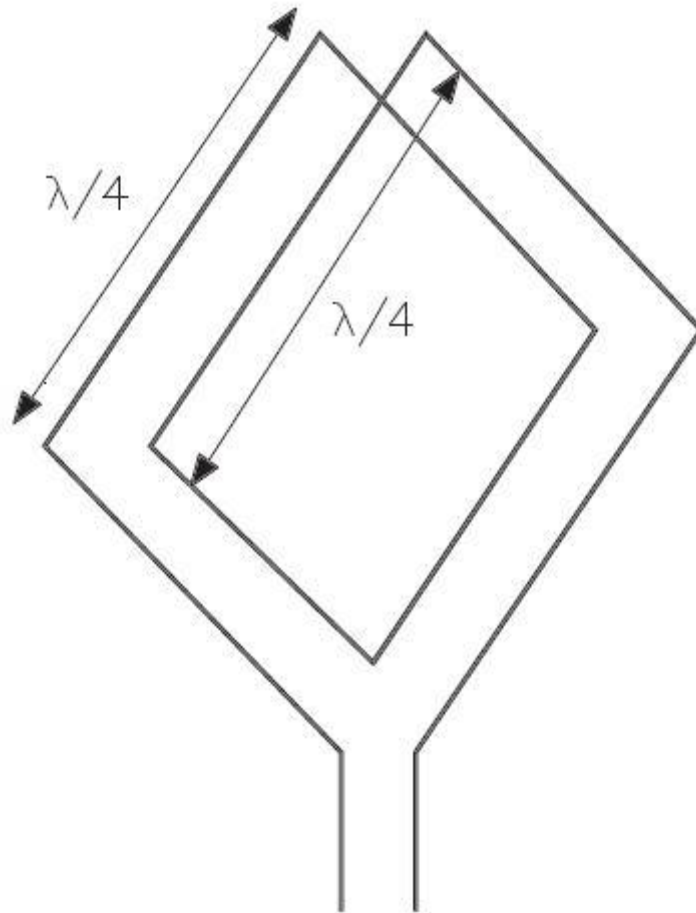


Рисунок 1.18 – Двовиткова рамкова антена

Хоча в аматорській практиці такі антени зустрічаються рідко, знати їх параметри корисно.

Вхідний опір у двовитковій антені в 2-3 рази вище, ніж у одновитковій, і досягає декількох кіло при 3-4 витках. Звідси випливає, що коефіцієнт посилення двовиткової рамки приблизно на 0,5-1 дБ вище, ніж одновиткової. В її ДС, яка, в загальних рисах, збігається з діаграмою одновиткової рамки, більш різко виражені мінімуми [19].

Ці переваги зазвичай не вдається реалізувати через складність узгодження високого вхідного опору рамки з низьким опором коаксіального кабелю або вихідного каскаду передавача. Крім того, подвійна рамка сильніше схильна до розсиметруючого впливу навколишніх предметів, ніж одиночна. Існує також проблема, пов'язана із забезпеченням постійної

відстані між внутрішньою і зовнішньою рамками. Чим більше відстань між сусідніми рамками, тим вище посилення, так як при цьому рамкова антена охоплює більший обсяг.

Але все ж таки іноді подвійна і навіть потрійна рамки знаходять застосування. Слід зауважити, що довжина сторони рамки повинна бути кратна чверті робочої довжини хвилі. Використовування багатовитковиткової рамки із загальним периметром, рівним довжині хвилі, недоцільно, оскільки її посилення менше, ніж у одновитковій. Багатовиткові резонансні рамки можна застосовувати в багатоеlementних директорних антенах, в якості активного елемента [5].

1.7 Цифрове відео мовлення DVB-T2

Застосування багатовиткової рамкової антени широко використовується для цифрового телебачення. DVB-T2 – це стандарт ЦТБ другого покоління, і його слід порівнювати із стандартом першого покоління DVB-T. DVB-T передбачає трансляцію кодованого цифрового телевізійного сигналу (у форматі кодування MPEG-2, а в надалі - у більш досконалих форматах, наприклад MPEG-4). Для передачі цифрового сигналу кодується і перетворюється в OFDM-сигнал. OFDM - це технологічна модуляція за допомогою ортогональних несучих, тобто модулюються безліч (у DVB-T - близько 8 тис.) несучих, розташованих у заданій полосі з фіксованим кроком за частотою. Швидкість модуляції окремої несучої при цьому досить мала, що дозволяє ефективно використовувати завдостійке кодування та приймати заходи для боротьби з міжсимвольною інтерференцією (вводити спеціальні захисні інтервали у кожному OFDM-символі). Це актуально при мовленні в умовах складного рельєфу та міської забудови, коли відбувається перевідбиття та багатопромеєне розповсюдження сигналів, що залучають зони завмирання та ін. Сама OFDM-модуляція реалізується за допомогою алгоритму зворотнього швидкого перетворення Фур'є (на передавальній стороні) в цифровій формі. Основні параметри OFDM-сигналу - відношення

довжини захищеного інтервала до загальної тривалості символів, число номінальних піднесучих, тип модуляції піднесучої (інформаційна здатність одного модуляційного символу, в нашому випадку залежною від числа можливих положень значучих амплітуд та фазових сигналів).

Стандарт DVB-T2 отриманий, як мінімум на 30% покращений ємність мереж ЦТБ за порівнянням з DVB-T, при тій самій інфраструктурі мереж та частотних ресурсів. Однак, на практиці перевага виявляється менше 50%. DVB-T2 принципово відрізняється, як архітектурний системний рівень (MAC-рівень – Media Access Control), так і особливості фізичного рівня [1].

На системному рівні принципового відтворення нового стандарту - це концепція магістральних потоків фізичного рівня (Physical Layer Pipe - PLP). Якщо стандарт DVB-T був призначений виключно для передачі пакетів MPEG-2, то DVB-T2 дає можливість трансляції різноманітні по природі і структурі інформаційні потоки. Система DVB-T2 здатна передавати кілька незалежних мультимедійних потоків, кожен зі своєю схемою модуляції, швидкістю кодування та тимчасовими інтервалами. Виникає відносно складна кадрова структура, як на логічному, так і на фізичному рівні - нічого подібного в DVB-T не було. Відповідно, у системі DVB-T2 з'являється нова функція - попередня обробка вхідних потоків. У цілому, загальна схема обробки сигналів у системі DVB-T2 істотно ускладнюється.

У стандарті розрізняються три основних типи потоків -транспортний потік (Transport Stream - TS), узагальнений інкапсульований потік (Generic Encapsulated Stream -GSE) і узагальнений безперервний потік (Generic Continuous Stream - GCS). Кожен потік являє собою послідовність користувальницьких пакетів (UP - User Packet). Транспортний потік - це послідовність пакетів фіксованої довжини (пакети MPEG-2, 188 байт, перший байт - завжди синхробайт зі значенням 47_{16}). Потік GSE характеризується пакетами змінної або фіксованої довжини, яка вказується в

заголовках цих пакетів. Потік GCS являє собою безперервний потік бітів. Реально - це або послідовність пакетів без вказівки їх довжини, або пакети максимально можливої довжини 64 Кбіт [2].

Пакети кожного магістрального потоку об'єднуються в потікові (Baseband) кадри (ВВ-кадри) - окремо для кожного потоку (рис.1.19). ВВ-кадр містить ВВ-заголовок (80 біт), поле даних і поле вирівнювання. В останньому можна передавати дані внутрішньоканальної сигналізації. У заголовку пакета міститься інформація про тип транспортного потоку, розмірі призначеного для користувача пакета (при необхідності) і всього поля даних, наявності режимів видалення порожніх пакетів та додаткових синхропакетів, використовується постійна/змінна модуляція і т.п. Розмір поля даних і вирівнюючого поля визначається параметрами згорткового кодера (в сумі не більше 53770 біт).

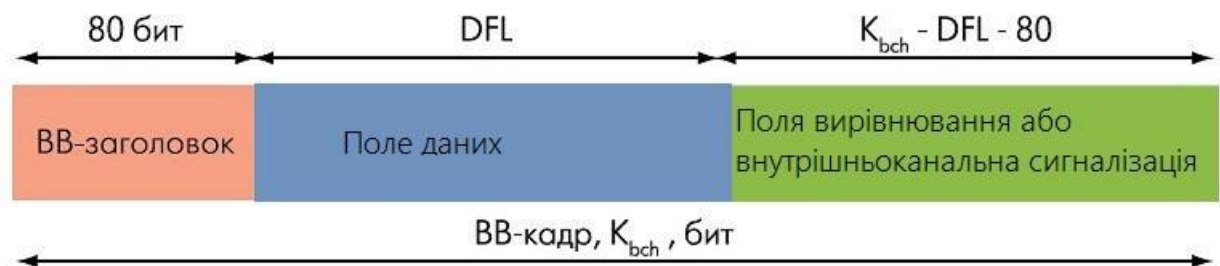


Рисунок 1.19 – Структура потікових кадрів

Стандарт DVB-T2 орієнтований на передачу телевізійних потоків, в яких найчастіше використовуються порожні пакети (для вирівнювання швидкості потоку), різного роду затримки і т.п. для збереження постійної швидкості потоку. Тому в DVB-T2 передбачені засоби видалення цієї надлишкової інформації, але з можливістю її відновлення на приймальному кінці. Крім того, опціонально передбачений і механізм згорткового кодування CRC-8 на рівні користувача пакетів.

Сформований ВВ-кадр шифрується (рандомізують шляхом перемноження на псевдовипадкову послідовність) і піддається коригуючому кодуванню. Механізм захисного кодування - ще одна принципова особливість стандарту DVB-T2. В якості коригуючого коду використовується каскадний код. В якості зовнішнього коду в ньому застосований блоковий кодер Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (БЧХ, BCH). В якості внутрішнього - нізкоплотностний код з перевіркою на парність (LDPC). Залежно від швидкості кодування LDPC, розмір вхідного блоку даних для БЧХ-кодера може відрізнятися, однак вихідний розмір кодового слова після LDPC завжди становить 64800 біт.

Перед модуляцією (крім BPSK і QPSK) кодові слова піддаються побітному перемішуванню і розподіляються по модуляційним символам.

У DVB-T2 додана модуляція 256-QAM (8 біт на символ), що підвищує ємність каналу передачі на 33% (щодо схеми 64-QAM в DVB-T). Зазвичай перехід від 64-QAM до 256-QAM вимагає збільшення співвідношення сигнал/шум на піднесучій на 4-5 дБ. Однак завдяки застосуванню коригувальних кодів BCH-LDPC, ефективність яких набагато вище традиційних кодів виправлення помилок (в т.ч. Ріда-Соломона), в DVB-T2 швидкість кодування може бути набагато вище і загальна пропускна здатність каналу істотно зростає [3].

Ще одне нововведення DVB-T2 - введення схеми модуляції з "обертним" сигнальним сузір'ям (рис.1.20). Ця процедура означає, що сформований модуляційний символ повертається в комплексній площині на певний кут, що залежить від числа рівнів модуляції (29° для QPSK, $16,8^\circ$ - для 16-QAM, $8,6^\circ$ для 64-QAM і $\arctg(1/16)$ для 256-QAM). Більш того, перед початком обертання квадратурна(Q) координата кожного модуляційного символу циклічно зсувається в рамках одного кодового слова

(тобто береться з попереднього символу цього слова, Q-компонента першого символу стає рівною Q-компоненті останнього).

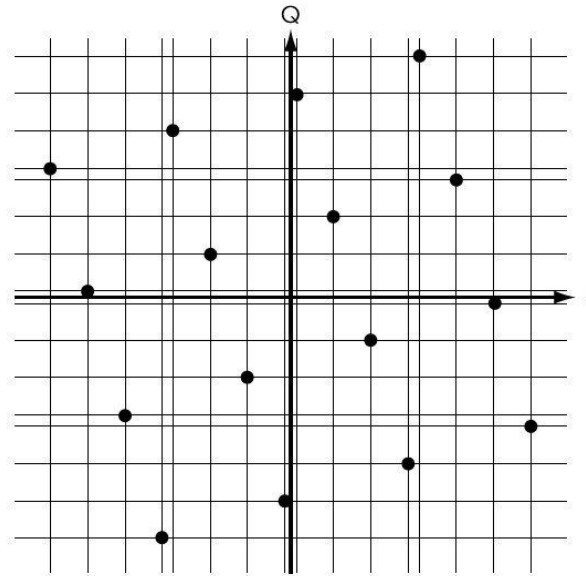


Рисунок 1.20 – Сигнальне сузір'я 16-QAM після повороту

У квадратурних каналах передаються проекції точки сигналу на відповідні осі (синфазну і квадратурну). При звичайному сигнальному сузір'ї кілька точок розташовані на декількох загальних ортогональних лініях, і їх проекції збігаються. Після повороту сигнального сузір'я (рис.6) у кожній точці - унікальні Q- і I-координати. Деякі з координат виявляються досить близько одна до одної, але по одній координаті точки завжди можна відновити іншу її координату. А механізм зсуву Q-координати призводить до того, що вихідні координати сигнальної точки виявляються в різних модуляційних символах (тобто свідомо на різних піднесучих), що істотно знижує ймовірність їх одночасної деградації як через випадкові імпульсні перешкоди, так і через селективні затухання в каналі. В роботі [7] зазначено, що застосування такої техніки забезпечує операційне посилення 7,6 дБ (рис.1.21) [4].

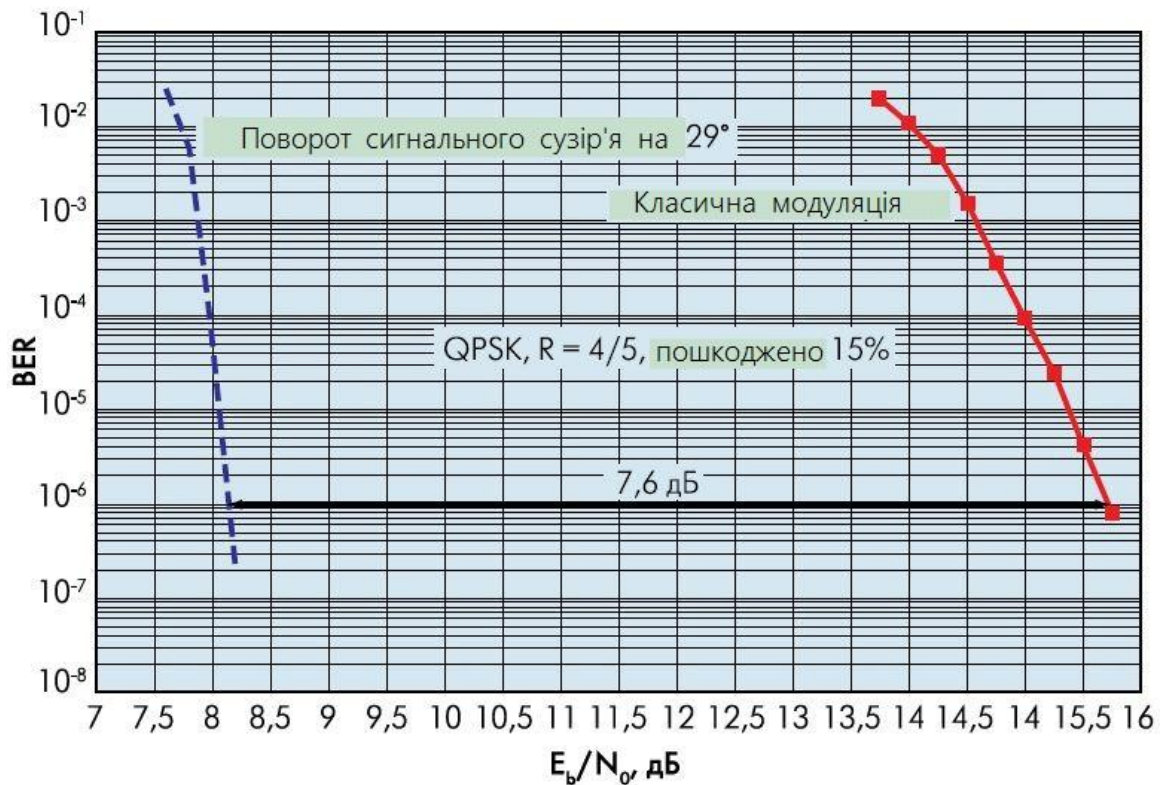


Рисунок 1.21 – Вигода від повороту сигнального сузір'я модуляційних символів

Після формування модуляційних символів відбувається їх переміщення в межах кодового слова.

Всі розглянуті до цих пір процедури виконуються паралельно для окремих магістральних потоків. В результаті для кожного PLP формується послідовність модуляційних символів. З них необхідно сформувати OFDM-символи. Але якщо в DVB-T ця процедура була абсолютно прозорою, то в DVB-T2, через можливість транслювати кілька мультимедійних потоків, необхідно сформувати досить складну кадрову структуру.

Кадр фізичного рівня DVB-T2 (T2-кадр) (рис.1.22) починається з преамбули P1. Це OFDM-символ з модуляцією DBPSK, двома захисними інтервалами з двох сторін (в сумі 1/2 тривалості символу). Він служить для синхронізації, ідентифікації потоку DVB-T2, а також містить 7

інформаційних біт з початковою інформацією про T2-кадри, а саме число номінальних піднесучих в OFDM (1K-32K) і формат передачі наступної за P1 преамбули P2 (режими MISO або SISO). Вся інша інформація про T2-кадри (довжина, модуляція, швидкість кодування і т.п.) передається в преамбулі P2, яка може займати кілька OFDM-символів. Далі слідує поле даних (інформаційні OFDM-символи). Замикає T2-кадр спеціальний завершальний OFDM-символ. В залежності від параметрів OFDM, в T2-кадрі може бути від 60 до 2098 OFDM-символів при смузі передачі 8 МГц. Максимальна тривалість T2-кадру - 250 мс.

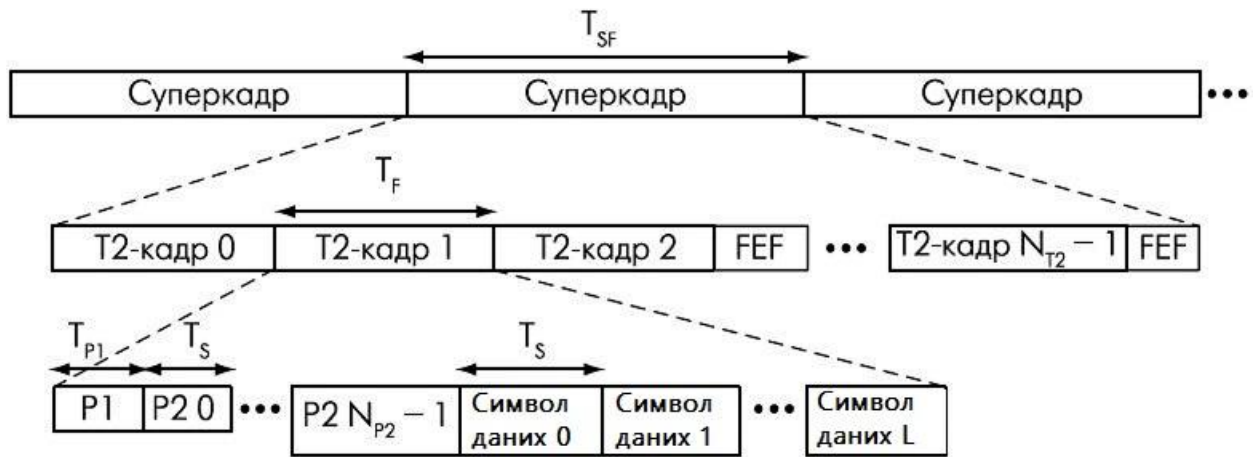


Рисунок 1.22 – Структура кадрів в системі DVB-T2

T2-кадри об'єднані в суперкадр. Крім T2-кадрів в суперкадр входять поля, зарезервовані для подальшого використання (FEF - Future Extension Frames). Вони можуть чергуватися в довільному порядку. Максимальна тривалість суперкадра - 128 с. Якщо в суперкадрі немає FEF, його максимальна тривалість $T_{SF} = 64$ с, що відповідає 256 T2-кадрам по 250 мс.

Розподілом потоків по кадрам займається спеціальний диспетчер ще на стадії формування ВВ-кадрів. Уже тоді, задовго до формування OFDM-символів, створюється сигнальна інформація. Стандарт DVB-T2 надзвичайно

гнучкий з точки зору мультиплексування безлічі потоків в єдиний трансляційний сигнал.

Формування OFDM-кадрів нерозривно пов'язане з розподілом фрагментів різних магістральних потоків як всередині T2-кадру, так і в рамках суперкадру. З цієї точки зору стандарт виділяє три типи потоків PLP - загальний, а також потоки даних типу 1 і 2. Загальний PLP - це інформація, загальна для групи з кількох PLP (наприклад, таблиці програм і сервісів PSI/SI для кількох транспортних потоків). Потоки PLP типу 1 в T2-кадрі не поділяються на фрагменти - іншими словами, в кожному T2-кадрі може бути тільки один фрагмент кожного PLP типу 1. Нарешті, потоки типу 2 можуть в межах T2-кадру розділятися на кілька фрагментів (від 2 до 6480), що прямують до кадрі поперемінно (рис.1.23).

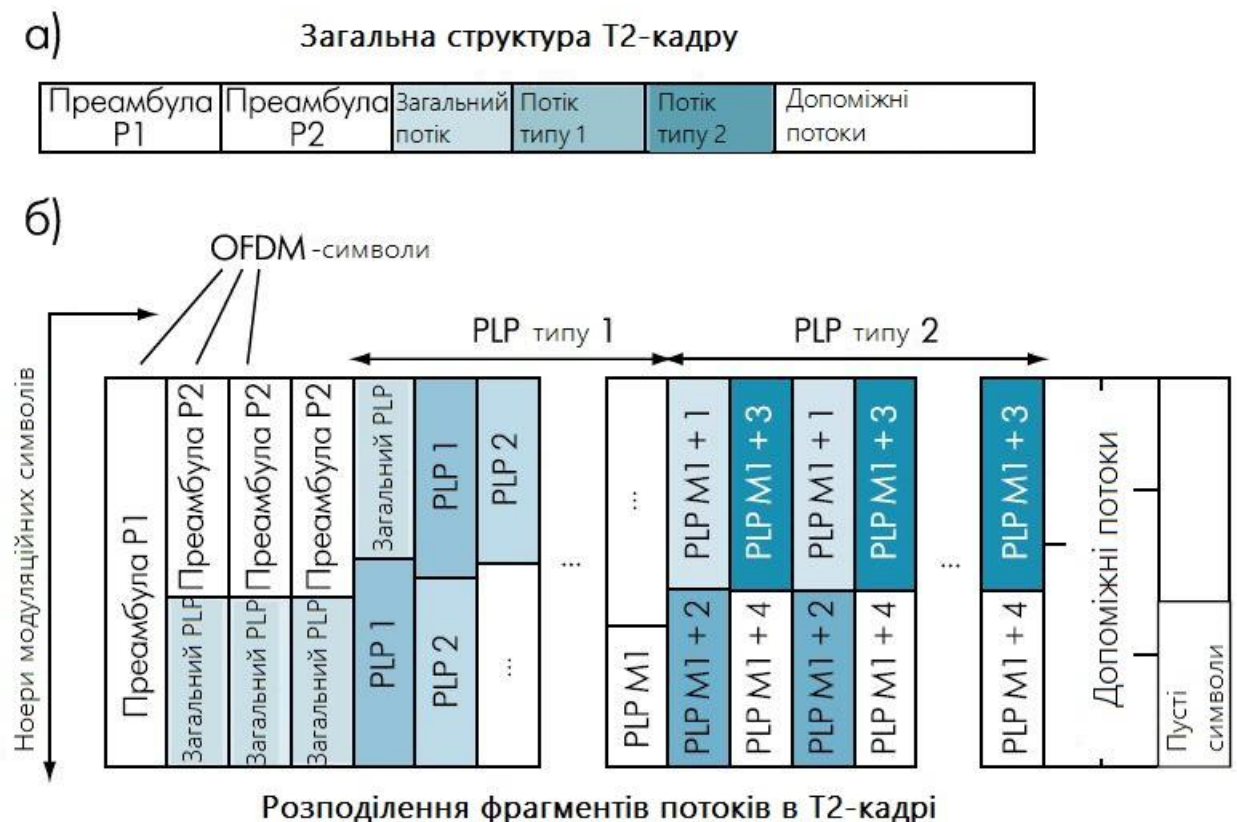


Рисунок 1.23 – Загальна структура T2-кадра (а) розподілення фрагментів потоків в T2-кадрі(б)

Потоки можуть відображатися на T2-кадри за певними правилами. Наприклад, потік N передається в групах по три суміжних T2-кадру, які прямують через інтервал в один кадр. Більш того, перед розподілом по T2-кадрам в рамках кожного PLP можливо тимчасове перемежування. Для цього кодові слова потоку PLP після формування модуляційних символів і їх перестановки групуються в т.зв. інтерлівінговані кадри, що містять динамічно змінювальне ціле число кодових слів. Інтерлівінговий кадр складається з одного або декількох інетрлівінгових блоків (рис.1.24).

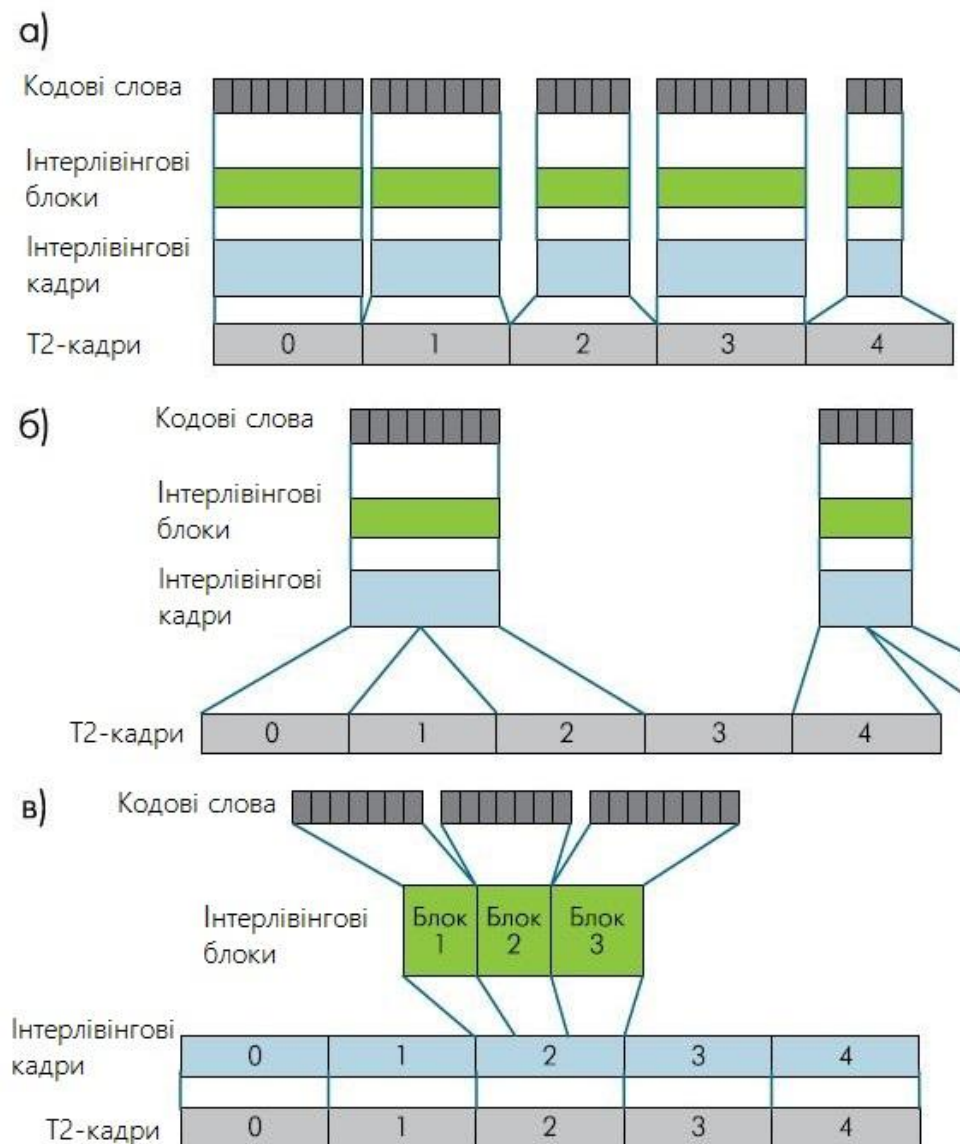


Рисунок 1.24 – Розподілення інтерлівінгових блоків і кадрів різноманітних PLP по T2-кадрам: а) – один в один, б) – декілька інтерлівінгових кадрів в один T2-кадр, в) – три інтерлівінгових блока в один інтерлівінговий кадр

Перемежування символів відбувається в межах всього інтерлівінгового блоку. Процедура розбиття на інтегрлівінгові блоки і кадри виконується на рівні магістральних потоків, з урахуванням їх специфіки. Інтерлівінгові кадри відображаються на кадри фізичного рівня (T2-кадри) - один в один або один інтерлівінговий кадр в кілька T2-кадрів. Відзначимо, що плюс до всіх перерахованих видів перемежувань - на рівні біт в кодових словах, модуляційних символів, тимчасового інтерв'ївнїга, - використовується ще і частотний інтерлівінг, тобто перестановка піднесучих в межах OFDM-символу.

У стандарті DVB-T2 зміни торкнулися і структури OFDM-символів. Збільшено можливе число номінальних піднесучих - крім 8K (8×1024) додані режими 16K і 32K піднесуть (а також 1K і 4K). Оскільки зі збільшенням числа тих, що піднесуть для OFDM-сигналів спектральна характеристика стає більш крутою (рис.1.25), можна розширити використовуваний частотний діапазон, не виходячи за межі дозволеної спектральної маски. Це дозволяє використовувати в OFDM-символі більше піднесучих для передачі даних. Такий режим допустимо використовувати при 8K, 16K і 32K піднесучих. Ефект від розширеного режиму становить від 1,4% (8K) до 2,1% (32K).

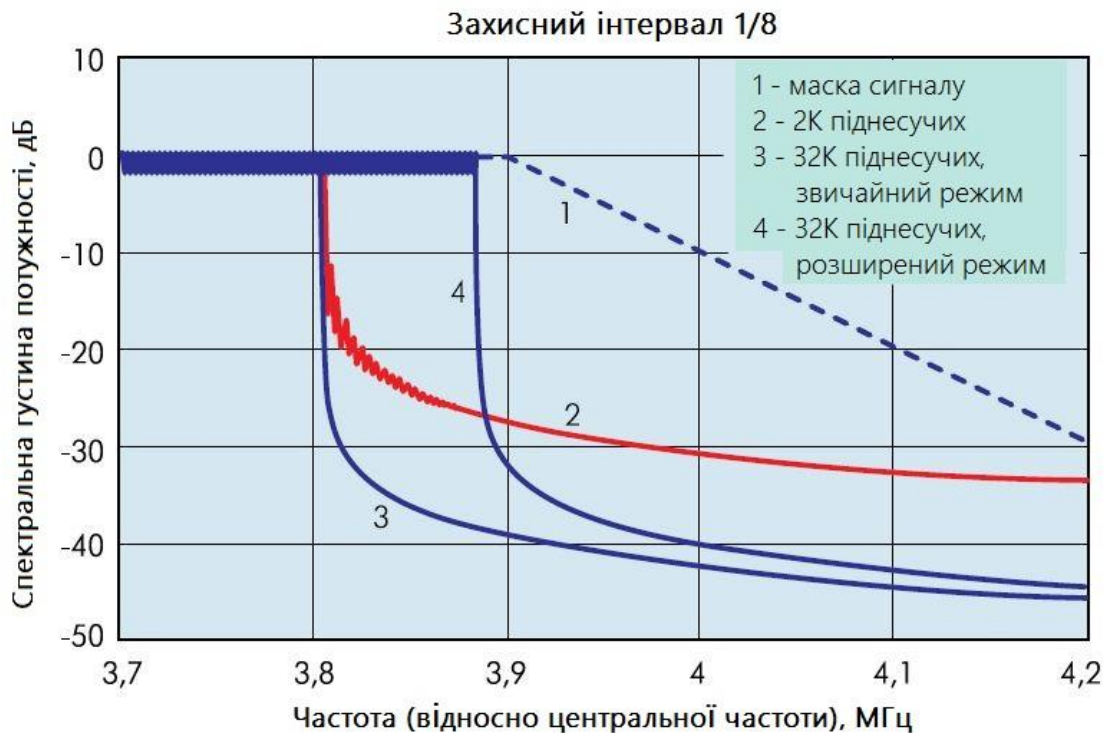


Рисунок 1.25 – Спектральна характеристика сигналів DVB-T2

Чим більше номінальних піднесучих, тим довший може бути OFDM-символ. Це, в свою чергу, дозволяє зменшити захисний інтервал до $1/128$ (проти $1/32$ в DVB-T). Використання такого захисного інтервалу при 32К номінальних піднесучих еквівалентно захисному інтервалу $1/32$ при 8К піднесучих. Однак пропускна здатність при цьому зростає має велике значення. Всього в DVB-T2 дозволено використовувати сім відносних довжин захисних інтервалів - $1/128$, $1/32$, $1/16$, $19/256$, $1/8$, $19/128$ і $1/4$.

У DVB-T2 можливо і більш гнучкий розподіл пілотних піднесучих. Замість однієї фіксованої схеми розподілу пілотних частот в DVB-T, в DVB-T2 передбачено вісім різних схем їх розподілу. Вибір варіанту залежить від числа номінальних піднесучих і розміру захисного інтервалу. В результаті якщо в DVB-T розподілені пілотні піднесучі становили 8% всіх піднесучих, то в DVB-T2 цей показник може становити також 1, 2 і 4%.

Ще одна принципово нова можливість - передача в режимі MISO з використанням схеми Аламоуті, тобто приймач обробляє сигнал від двох передавальних антен. Вводяться і додаткові частотні смуги - 10 МГц і 1712 МГц (остання - для мобільних сервісів).

В цілому, всі ці нововведення дозволяють створити дуже гнучку і в той же час надзвичайно ефективну систему трансляції мультимедійних потоків. При цьому максимальна швидкість вхідного транспортного потоку після попередньої обробки (наприклад, видалення нульових пакетів) може перевищувати 50 Мбіт/с .

Зрозуміло, зовсім не обов'язково використовувати всі можливості стандарту. У тому числі і трансляцію безлічі мультимедійних потоків. Однак в поєднанні з новими видами кодування відеосигналу (такими як MPEG-4) ця технологія є суттєвим кроком вперед. І що важливо з точки зору мереж широкосмугового доступу, стандарт DVB-T2 - це вже не "просто" система транспорту пакетів цифрового відеоконтенту. Це - потужний інструмент мультимедійного мовлення, в який спочатку закладені величезні можливості по розширенню функціональності.

2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОВИТКОВОЇ РАМКОВОЇ АНТЕНИ

2.1 Критерій вибору антени

Діапазон робочих частот DVB-T2: $f = (470 - 790) \text{ МГц}$, що відповідає дециметрованому (ультракороткі) діапазону хвиль $\lambda = (1000 - 100) \text{ мм}$.

– мінімальні зміни активного та реактивного вхідного опору $R_{\text{вх}}$ та $X_{\text{вх}}$ в смузі робочих частот, та високий рівень $R_{\text{вх}} \geq 50 \text{ Ом}$ для можливості узгодження антени зі стандартним фідером 50 Ом .

– мінімум нерівномірності та абсолютного значення КСХ в діапазоні робочих частот при 50 Ом навантаженні;

– розміри $\varnothing \leq 1 \text{ м}$ для встановлення в приміщенні (приймаємо $0,6 \text{ м}$).

Рамкова приймальна антена є спрямованою, що є цінним для придушення атмосферних завад.

2.2 Діюча висота приймальної антени

За своїм фізичним змістом діюча висота приймальної антени - це коефіцієнт, який встановлює залежність величини напруги сигналу на вихідних контактах прийомної антени з інтенсивністю дії електромагнітної хвилі в точці прийому, яка зазвичай виражається через напруженість створюваного хвилею змінного електричного поля в цій точці:

$$U_{\text{вих}} = h_{\text{д}} \cdot E \quad (2.1)$$

де $U_{\text{вих}}$ — напруга сигналу на вихідних клеммах прийомної антени, В;

$h_{\text{д}}$ — діюча висота приймальної антени, м;

E — напруженість електричного поля, створюваного електромагнітної хвилею в точці прийому, В/м.

Таким чином, діюча висота стала параметром прийомних антен, за яким порівнюють їх ефективність щодо перетворення енергії радіохвилі в напругу сигналу.

При поширенні у вакуумі або в повітрі електромагнітна хвиля створює в точці прийому електромагнітне поле, електрична E і магнітна H складові якого пов'язані співвідношенням:

$$E\sqrt{\varepsilon_0} = H\sqrt{\mu_0}, \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – електрична постійна;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна постійна.

Тому діючої висотою можна характеризувати не тільки електричні, але і магнітні прийомні антени, порівнюючи їх по ефективності як один з одним, так і з електричними приймальними антенами, причому незалежно від їх виконання: активні вони (з вимагає електроживлення вбудованим антенним підсилювачем) або пасивні (електроживлення не вимагають). Адже призначення будь-якій приймальній антені - це перетворення енергії електромагнітної хвилі в електричний сигнал, що подається на вхід радіоприймача [17].

2.2.1 Одновиткова рамка в електромагнітному полі

Візьмемо в якості найпростішої приймальної магнітної антени одновиткового дротяну рамку (рис.2.1) і розглянемо вплив на неї електромагнітної хвилі, довжина якої багато більше лінійних розмірів рамки. В цьому випадку фаза струму, наведеного в рамці магнітної складової створеного електромагнітної хвилею електромагнітного поля, завжди практично одна і та ж по всій довжині дроту рамки і розподіл струму по дроту рамки не має хвильового характеру. Тобто миттєве значення змінного струму в проводі рамки однаково на всіх його ділянках, тому при визначенні

ЕРС. на вихідних клеммах такої рамкової антени можна користуватися найпростішими законами електромагнітної індукції [16].

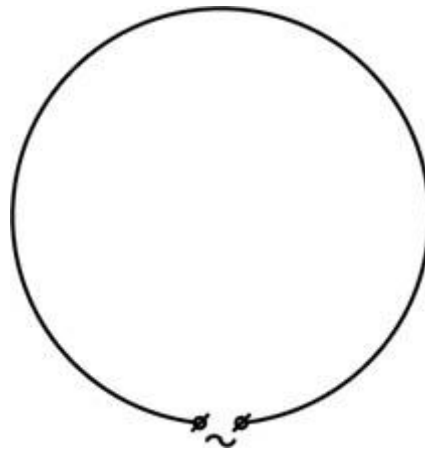


Рисунок 2.1 – Одновиткова дротова рамка

Відповідно до закону електромагнітної індукції ЕРС в дротяній рамці, що наводиться в ній змінним магнітним полем, дорівнює швидкості зміни потоку магнітного поля крізь поверхню, охоплену цією рамкою:

$$e_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (2.3)$$

Потік магнітного поля через поверхню S , охоплену рамкою, дорівнює скалярному добутку вектора магнітної індукції $\vec{B}$ і вектора, модуль якого дорівнює площі поверхні S , охопленої рамкою, і спрямованого перпендикулярно цієї поверхні:

$$\vec{\Phi} = \vec{B} \cdot \vec{S} = \mu_0 \vec{H} \cdot \vec{S} , \quad (2.4)$$

де $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ — магнітна індукція, створювана електромагнітною хвилею в точці прийому, Тл.

Щоб уникнути зайвих вправ в тригонометрії, приймемо, що наша рамка розташована в площині, що збігається з напрямком поширення електромагнітної хвилі, тобто повернута в напрямку максимального рівня сигналу. У цьому випадку вектор $\vec{H}$ магнітної складової електромагнітного

поля в будь-який момент часу розташований в площині, перпендикулярній площині рамки. Нехай його проекція на нормаль до площини рамки змінюється за гармонійним законом:

$$H = H_a \cdot \cos \omega_0 t . \quad (2.5)$$

де H_a — амплітуда зміни напруженості магнітного поля, А / м;

1 $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ — кругова частота сигналу, рад / с.

Тоді потік магнітного поля через поверхню S , охоплену рамкою, буде змінюватися з тією ж закономірністю:

$$\Phi = \mu_0 H_a \cdot S \cdot \cos \omega_0 t . \quad (2.6)$$

Визначимо миттєве значення ЕРС, що наводиться в дротяної рамці змінним магнітним полем:

$$\begin{aligned} e_{\text{інд}} &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 H_a \cdot S \cdot \frac{d\cos \omega_0 t}{dt} = -\mu_0 H_a \cdot S \cdot \omega_0 \cdot (-\sin \omega_0 t) = \\ &= \mu_0 H_a \cdot S \cdot \omega_0 \cdot \sin \omega_0 t . \end{aligned} \quad (2.7)$$

Таким чином, під дією гармонійно змінної напруженості магнітного поля (2.5), що створюється електромагнітною хвилею в точці прийому, напруга сигналу на вихідних контактах ненавантаженої одновіткової рамкової антени, рівне за величиною наведеної в рамці ЕРС, буде також змінюватися за гармонійним законом (2.7), з тією ж частотою і амплітудою:

$$U_{\text{вих},a} = e_a = \mu_0 H_a \cdot S \cdot \omega_0 . \quad (2.8)$$

Оскільки величина напруги сигналу на вихідних контактах прийомної антени це ще й добуток (2.1) діючої висоти антени на напруженість електричного поля, створюваного електромагнітною хвилею в точці прийому, то можна прирівняти один до одного праві частини виразів (2.1) і (2.8):

$$h_{\text{Д}} \cdot E_a = \mu_0 H_a \cdot S \cdot \omega_0, \quad (2.9)$$

де E_a – амплітуда зміни напруженості електричного поля в точці прийому, В/м

Беручи до уваги зв'язок електричного і магнітного полів в точці прийому (2.2), звідки випливає що:

$$\frac{H_a}{E_a} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\mu_0}}, \quad (2.10)$$

а також зв'язок електричної ε_0 і магнітної μ_0 сталих:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (2.11)$$

звідки випливає що:

$$\sqrt{\varepsilon_0} = \frac{1}{c \sqrt{\mu_0}}, \quad (2.12)$$

де $c = 299\,792\,458 \text{ м/с}$ — швидкість світла у вакуумі/

Знаходимо вираз для діючої висоти одновиткової рамкової антени:

$$h_{\text{Д}} = \mu_0 \frac{H_a}{E_a} S \omega_0 = \mu_0 \frac{\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\mu_0}} S \omega_0 = \mu_0 \frac{1}{c \sqrt{\mu_0}} S \omega_0 = \mu_0 \frac{1}{c \cdot \mu_0} S \omega_0 = \frac{S \cdot \omega_0}{c}. \quad (2.13)$$

Отже, діюча висота одновиткової рамкової антени пропорційна площі охоплюваної рамкою поверхні і частоті сигналу:

$$h_{\text{Д}} = \frac{S \cdot \omega_0}{c}. \quad (2.14)$$

2.2.2 Діюча висота багатовиткової рамкової антени

Якщо рамкова антена виконана у вигляді декількох витків дроту, розташованих в безпосередній близькості один від одного, то ЕРС, наведена

в такій прийомній антені, буде дорівнює сумі ЕРС, наведених в кожному з витків:

$$e_{\text{інд}} = \sum_{i=1}^n e_i = E \cdot \frac{\omega_0}{c} \cdot \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.15)$$

де S_i — площа поверхні, охопленої кожним витком;

n — кількість витків.

З виразу (2.15) випливає, що діюча висота багатовиткової рамкової антени дорівнює:

$$h_{\text{Д}} = \frac{\omega_0}{c} \cdot \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.16)$$

У більшості випадків форма і розміри всіх витків багатовиткової рамкової антени однакові, а значить і значення площі поверхні, охопленої кожним з витків, є рівними. У цьому випадку справедливо записати:

$$\sum_{i=1}^n S_i = n \cdot S, \quad S = S_1 = S_2 = \dots = S_n. \quad (2.17)$$

Тоді діюча висота багатовиткової рамкової антени визначається виразом:

$$h_{\text{Д}} = \frac{n \cdot S \cdot \omega_0}{c}. \quad (2.18)$$

Отже, діюча висота багатовиткової рамкової антени, що складається з n однакових витків дроту, в n раз більше одновиткової рамки таких же розмірів.

Знаючи, що швидкість світла можна розписати $c = \lambda \cdot f_0$, а кругова частота $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, можна виразити діючу висоту наступною формулою

$$h_d = \frac{2\pi \cdot n \cdot S}{\lambda}. \quad (2.19)$$

Діюча висота рамки з феромагнетика рівна:

$$h_d = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mu_c \cdot n \cdot S, \quad (2.20)$$

де μ_c – магнітна проникність ($\mu_c(\text{залізо}) = 5 \cdot 10^3$, $\mu_c(\text{алюміній.}) = 1,000022$).

При збільшенні довжини хвилі h_d та відповідно коефіцієнт спрямованої дії антени $D_{\max} = 2 \cdot h_d / \lambda$ зменшуються.

2.3 Вхідний опір рамкової антени

Вхідний опір антени визначається в загальному випадку відношенням напруги до струму на її вхідних клеммах і характеризує антену як навантаження для генератора. Більшість використовуваних радіоаматорами антен мають вхідний опір в межах 36-100 Ом. Це зручно з наступних причин: опір загальноновживаних коаксіальних кабелів складає 50, 75 і 100 Ом, що дає можливість жити антени безпосередньо кабелем або за допомогою нескладних пристроїв, що погоджують; значення струму і напруги високої частоти відносно невеликі, що дає можливість використовувати недорогі коаксіальні кабелю. Як тільки опір антени різко відрізняється від 50-100 Ом, доводиться застосовувати ті, що погоджують пристрої. У випадку, якщо опір значно вищий, скажімо, 300-600 Ом, використовують трансформатори і відкриті лінії[20].

Але у випадку, якщо опір значно нижче - 1-5 Ом - виникають серйозні проблеми. Використання трансформаторів скрутно, що погоджують пристрої на L і C мають при таких значеннях трансформації низький ККД зважаючи на розсіювання енергії на них самих [22] .

Приведемо формулу для розрахунку вхідного опору магнітної рамки :

$$R_{\text{вх}} = 800 \cdot h_{\text{д}} / \lambda^2 \quad (2.21)$$

2.4 Розрахунок антени

1. Діюча висота для

$$\lambda = 100 \text{ мм}: \quad h_{\text{д}} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mu_{\text{с}} \cdot n \cdot S = \frac{2\pi}{0,1} \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,09 \cdot \pi = 177,65 \text{ м},$$

$$\lambda = 1000 \text{ мм}: \quad h_{\text{д}} = \frac{2\pi}{1} \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,09 \cdot \pi = 17,77 \text{ м}.$$

2. Коефіцієнт спрямованої дії антени: $D_{\text{max}} = 2 \cdot h_{\text{д}} / \lambda$

$$\lambda = 100 \text{ мм}: \quad D_{\text{max}} = 2 \cdot h_{\text{д}} / \lambda = 2 \cdot 177,65 / 0,1 = 3553 = 35,5 \text{ дБ},$$

$$\lambda = 1000 \text{ мм}: \quad D_{\text{max}} = 2 \cdot h_{\text{д}} / \lambda = 2 \cdot 17,77 / 1 = 35,53 = 15,5 \text{ дБ}.$$

3. Активний вхідний опір:

$$\lambda = 100 \text{ мм}: \quad R_{\text{вх}} = 800 \cdot h_{\text{д}} / \lambda^2 = 800 \cdot 177,65 / 0,1^2 = 14,212 \text{ МОм}$$

$$\lambda = 1000 \text{ мм}: \quad R_{\text{вх}} = 800 \cdot h_{\text{д}} / \lambda^2 = 800 \cdot 17,77 / 1^2 = 14,212 \text{ кОм}.$$

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАМКОВОЇ АНТЕНИ

За допомогою програми MMANA-GAL проведемо моделювання характеристик рамкових антен [23]. Із наявних у списку програми антен було обрано дві рамкові антени: двовиткову дельтаподібну та типу «подвійна петля». Кожен із антен досліджено на граничні та середню частоти, а також на частоту заданою самою програмою. Для кожної частоти із шириною смуги розглянуто три типи розташування антени: real, perfect, free space.

3.1 Моделювання двовиткової дельтаподібної рамкової антени

На рис.3.1 зображена об'ємна модель антени із характерними розмірами у правій нижній частині.

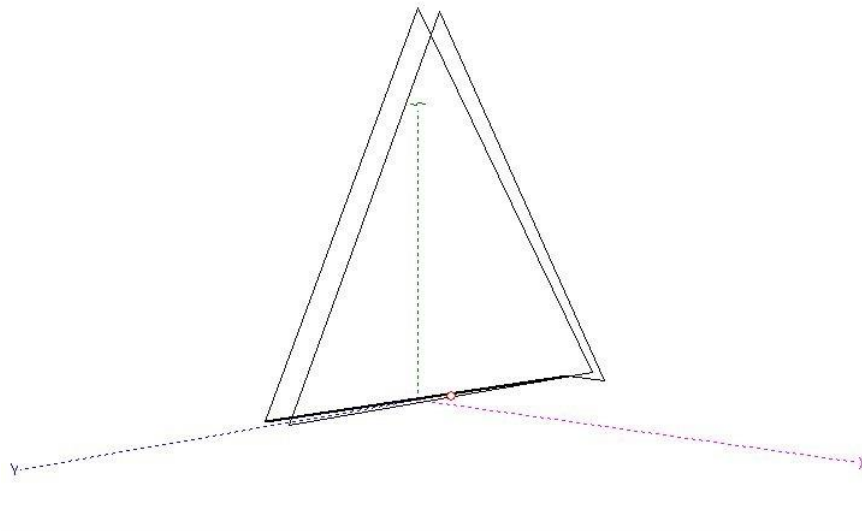


Рисунок 3.1 – Програмна модель двовиткової дельтаподібної рамкової антени

Промодельовані характеристики антени мають на різних частотах наступні результати:

1. Для частоти 470 МГц:
- Real

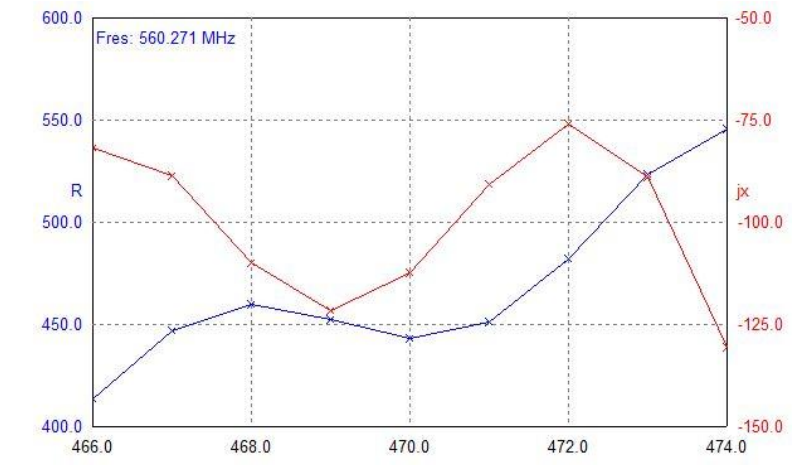


Рисунок 3.2 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

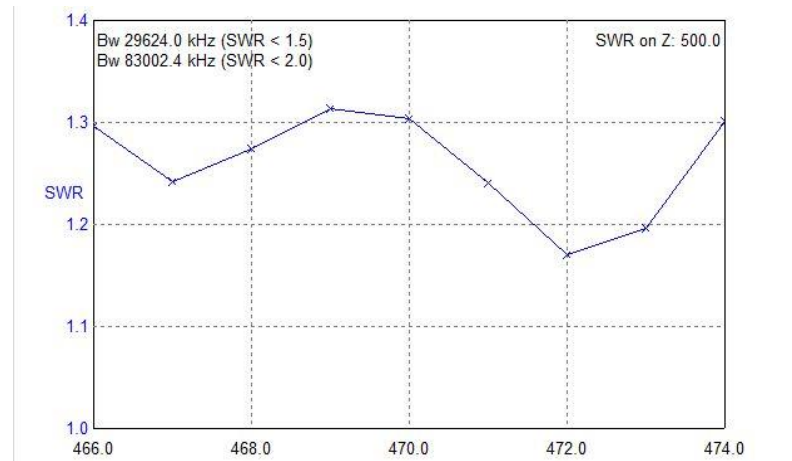


Рисунок 3.3 – КСХ антени

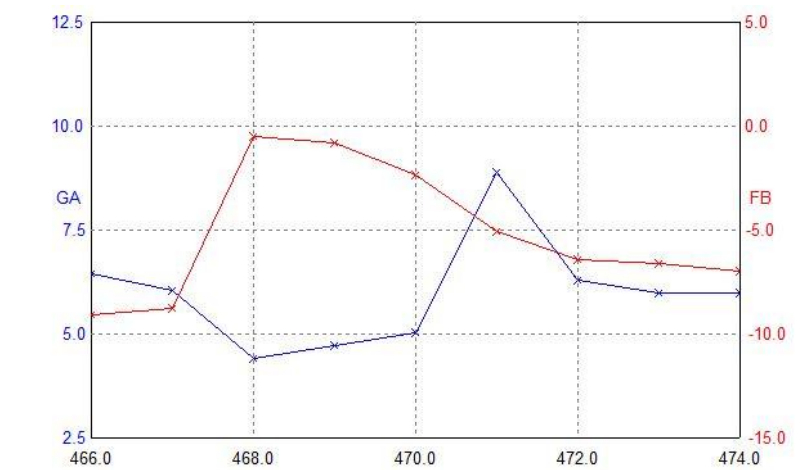


Рисунок 3.4 – Підсилення антени

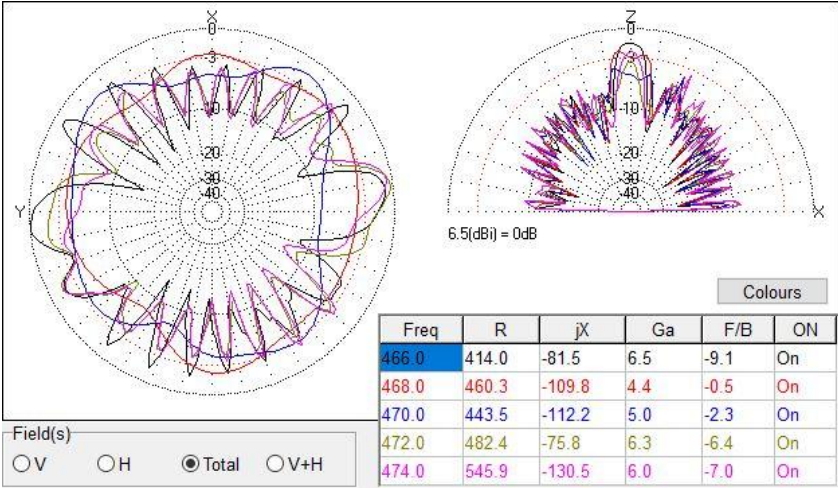


Рисунок 3.5 – ДС антени

- Perfect:

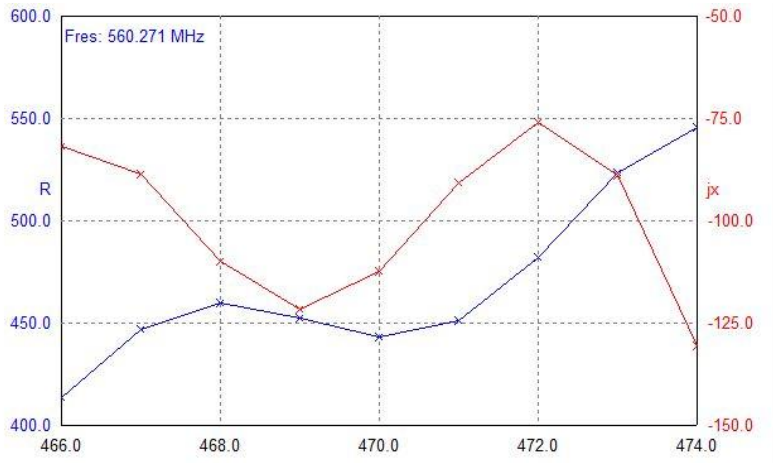


Рисунок 3.6 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

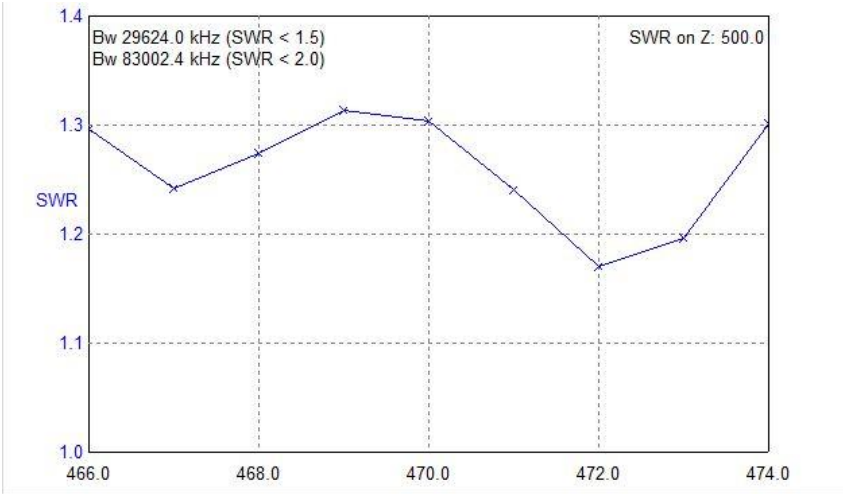


Рисунок 3.7 – КСХ антени

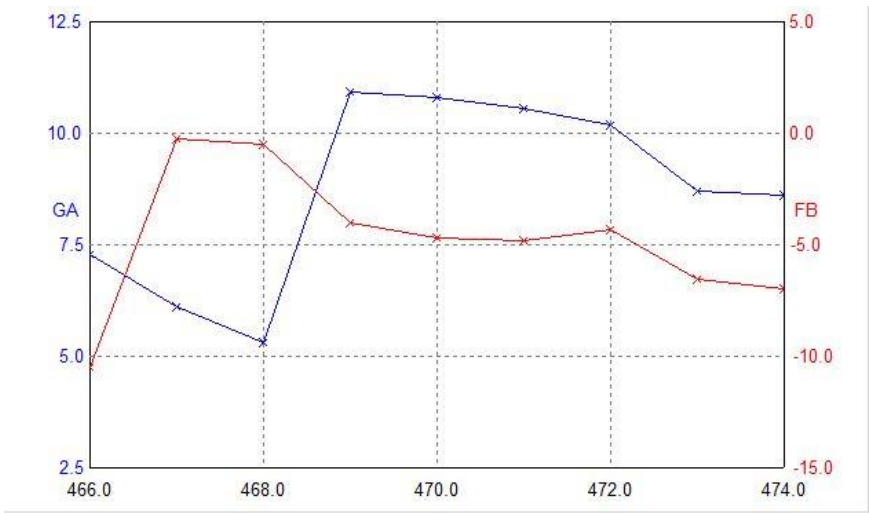


Рисунок 3.8 – Підсилення антени

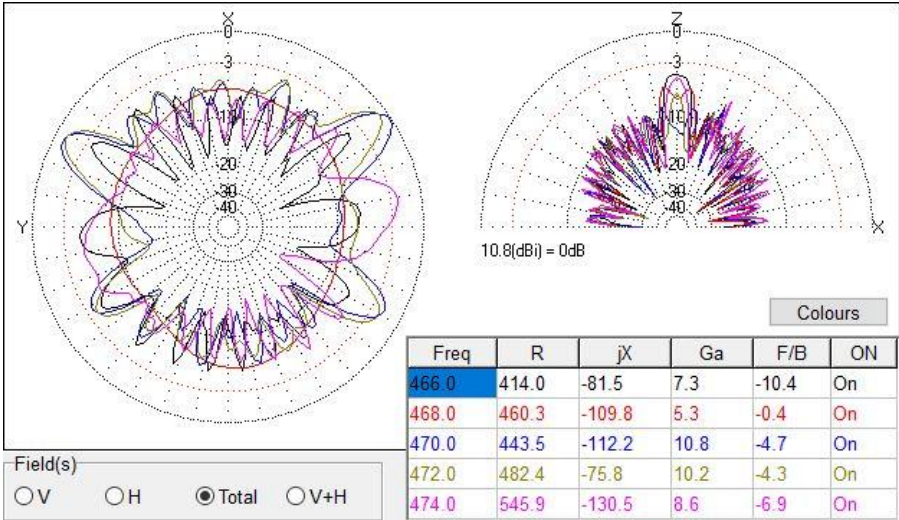


Рисунок 3.9 – ДС антени

- Free space:

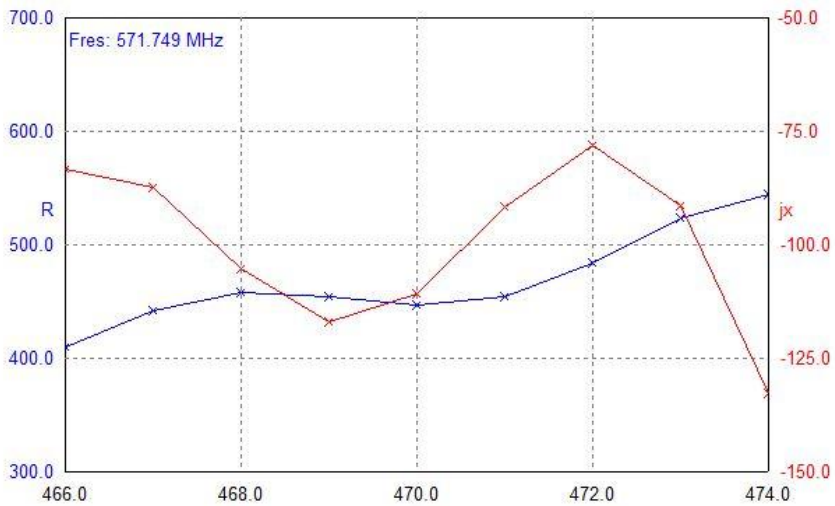


Рисунок 3.10 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

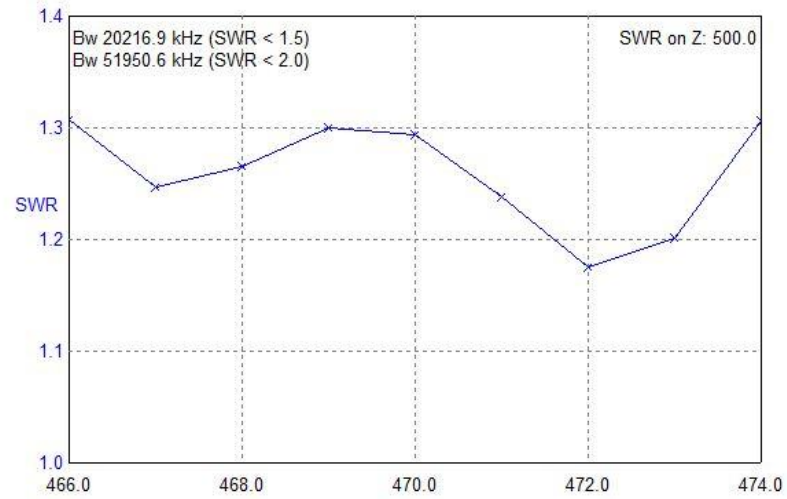


Рисунок 3.11 – КСХ антени

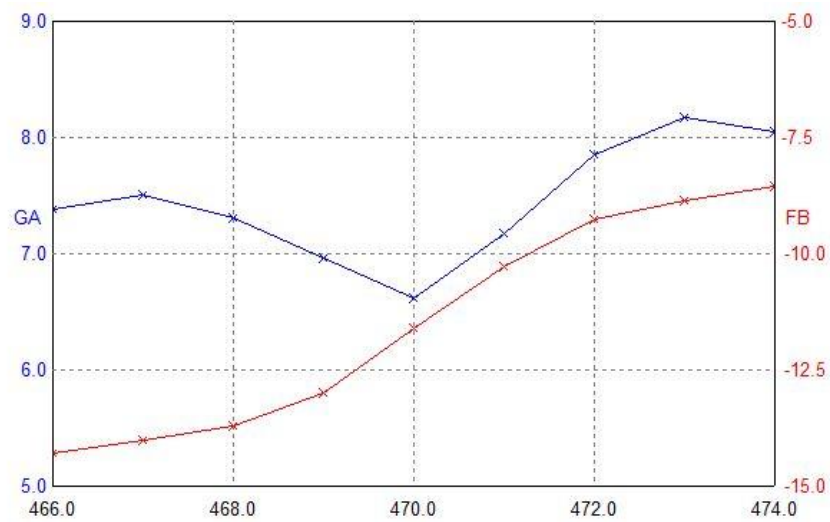


Рисунок 3.12 – Підсилення антени

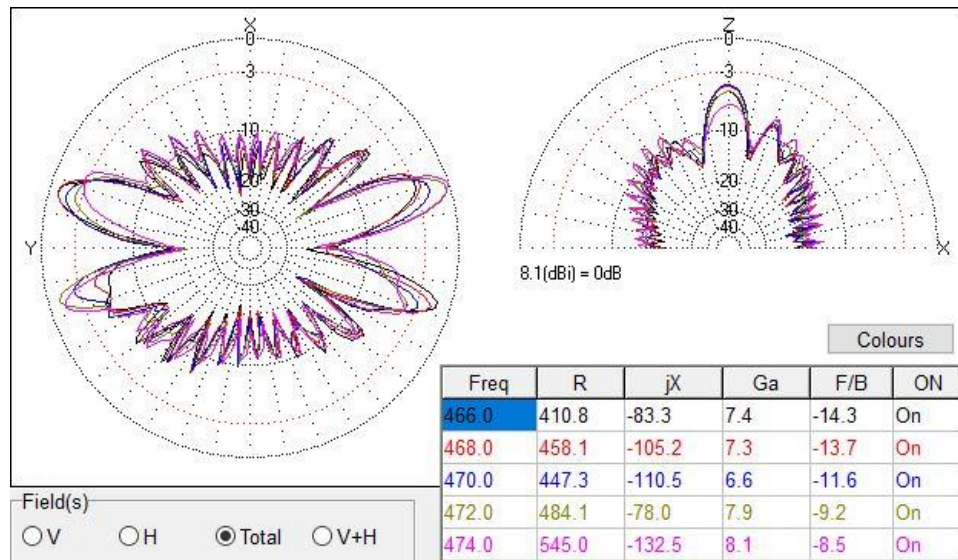


Рисунок 3.13 – ДС антени

2. Для частоти 630 МГц:
- Real

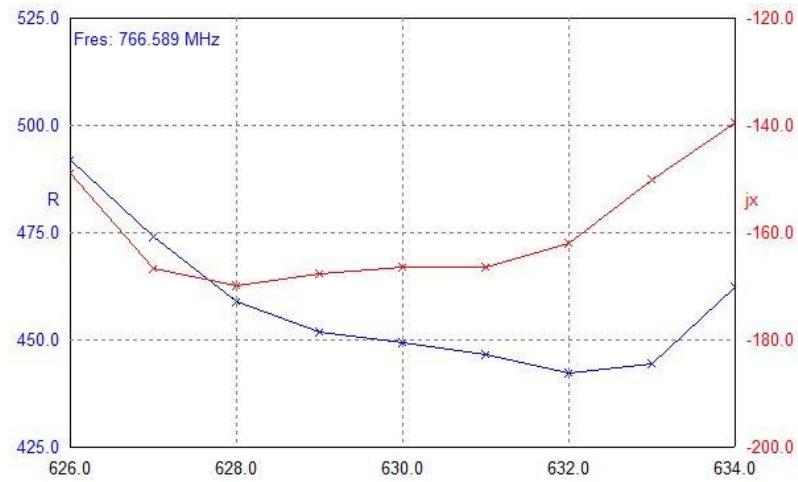


Рисунок 3.14 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

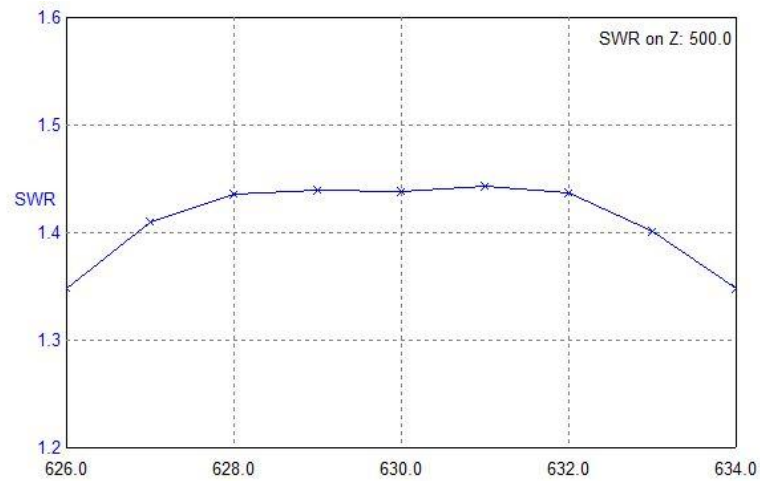


Рисунок 3.15 – КСХ антени

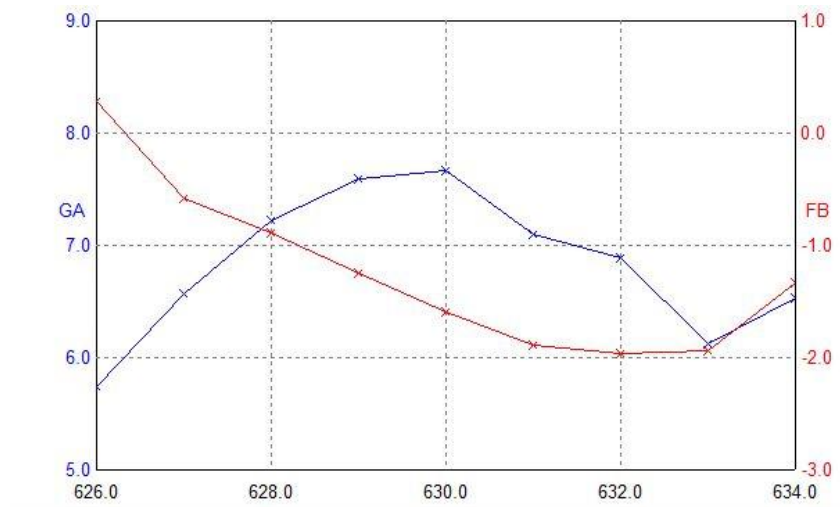


Рисунок 3.16 – Підсилення антени

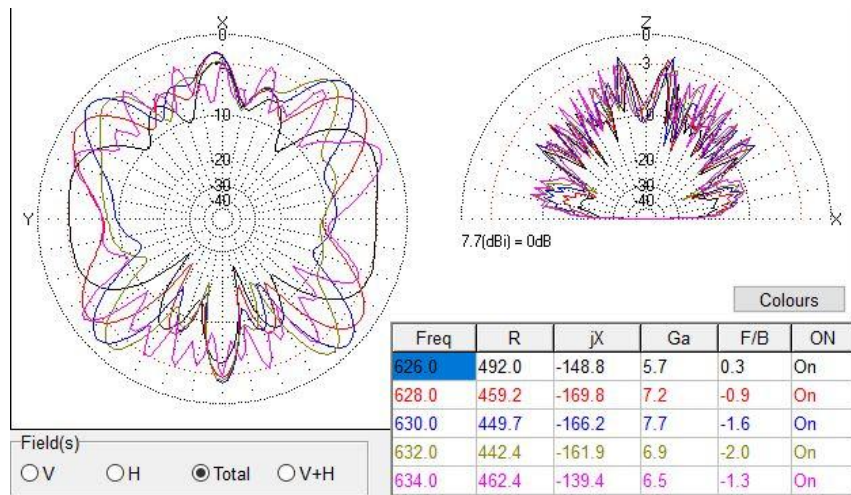


Рисунок 3.17 – ДС антени

- Perfect:

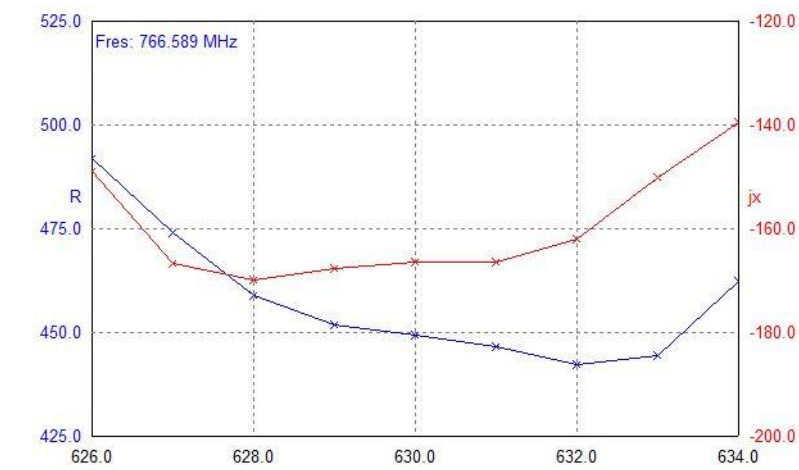


Рисунок 3.18 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

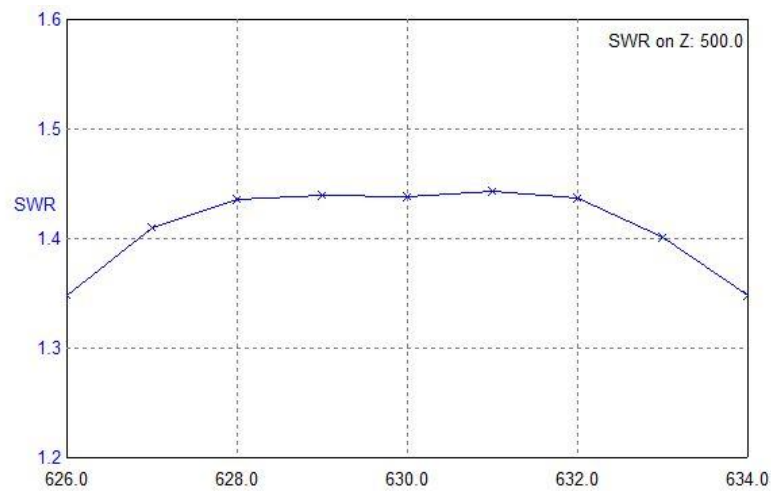


Рисунок 3.19 – КСХ антени

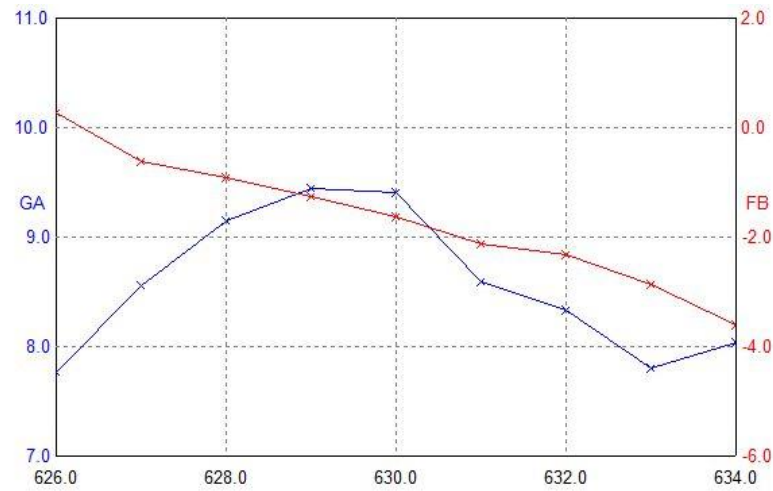


Рисунок 3.20 – Підсилення антени

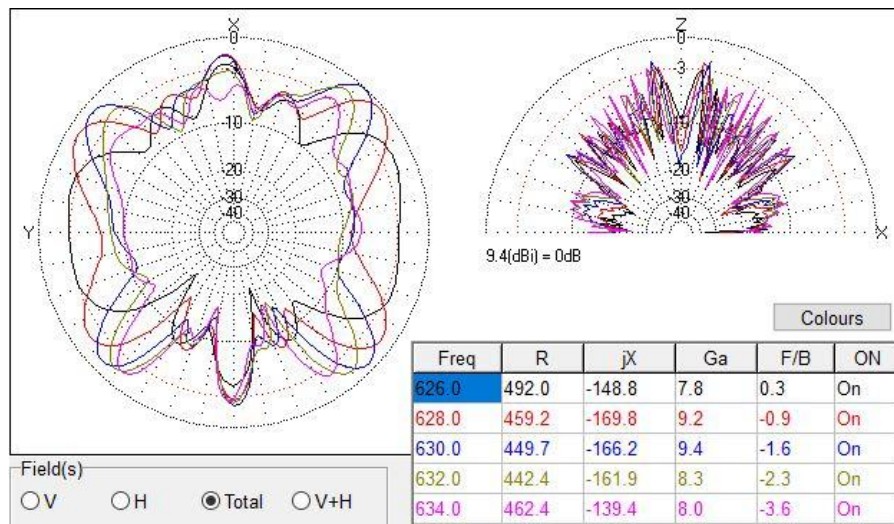


Рисунок 3.21 – ДС антени

- Free space:

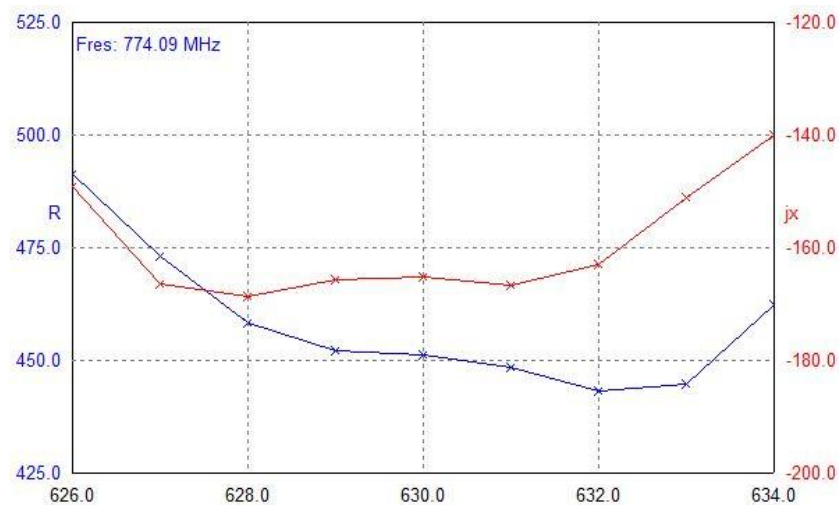


Рисунок 3.22 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

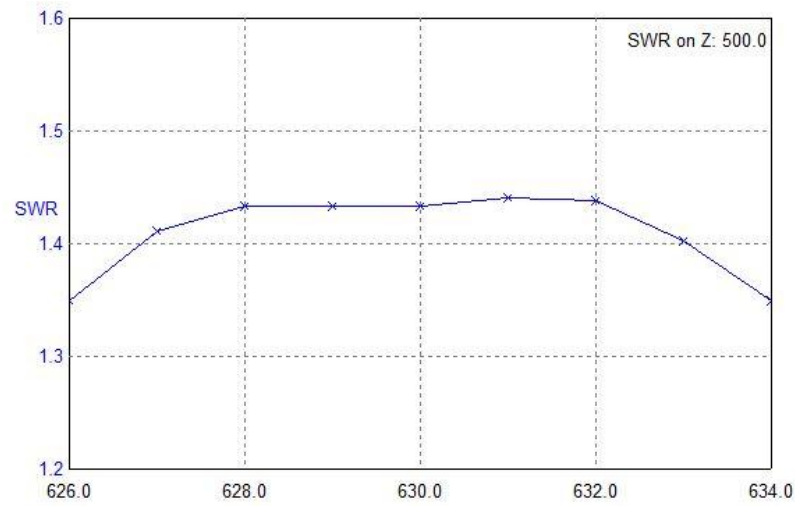


Рисунок 3.23 – КСХ антени

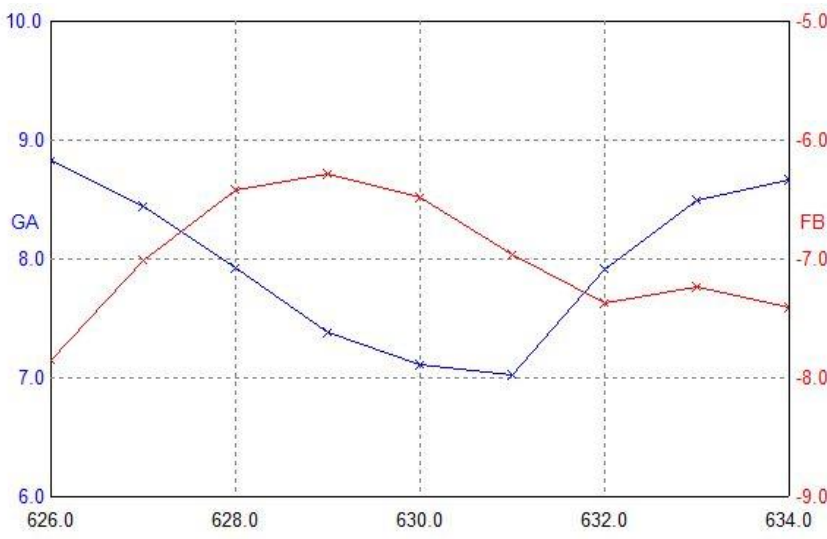


Рисунок 3.24 – Підсилення антени

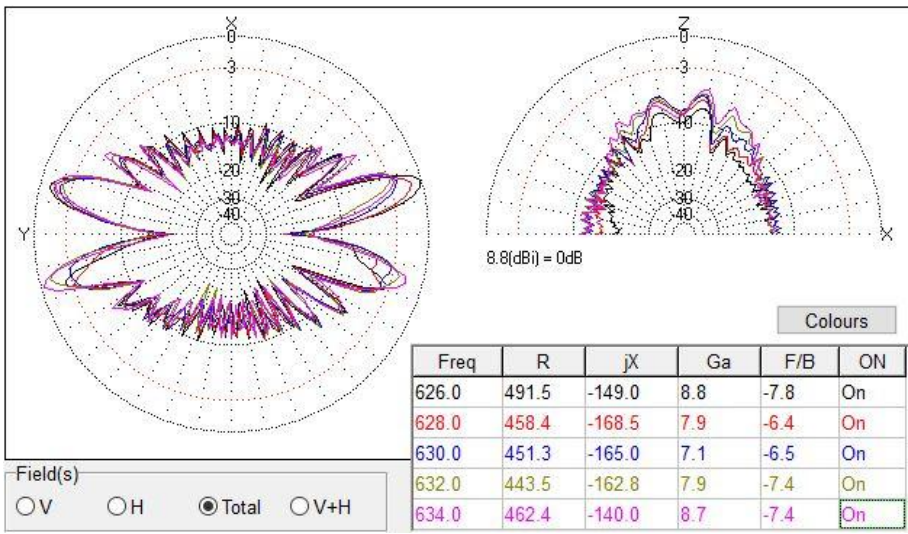


Рисунок 3.25 – ДС антени

3. Для частоти 790 МГц:
- Real

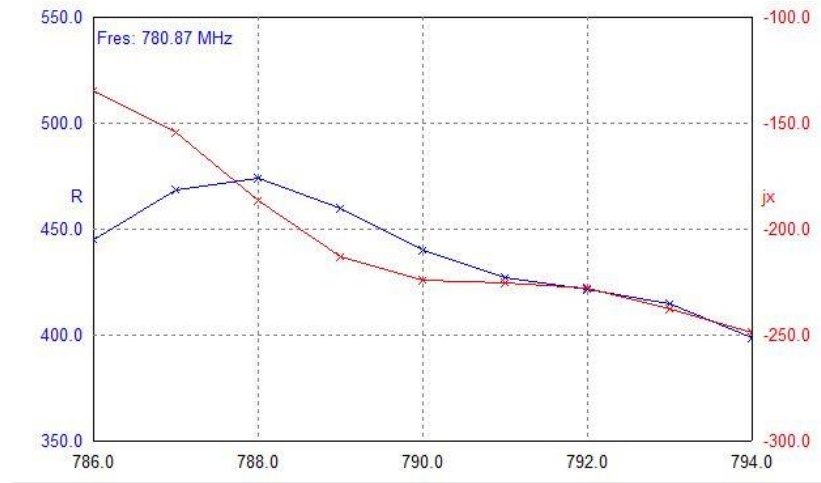


Рисунок 3.27 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

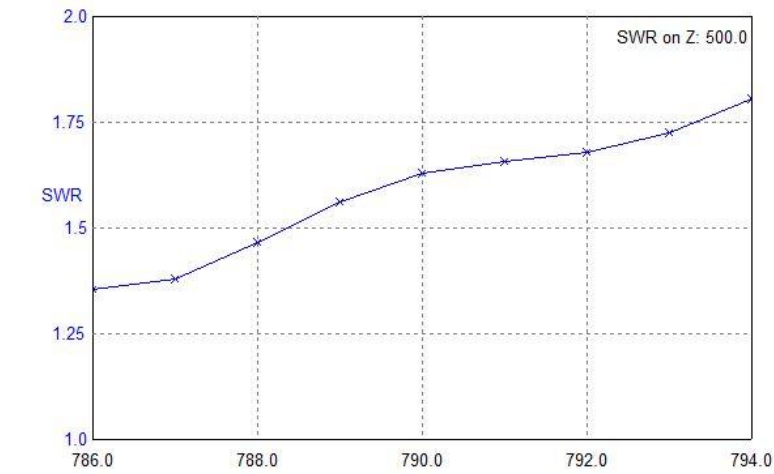


Рисунок 3.28 – КСХ антени

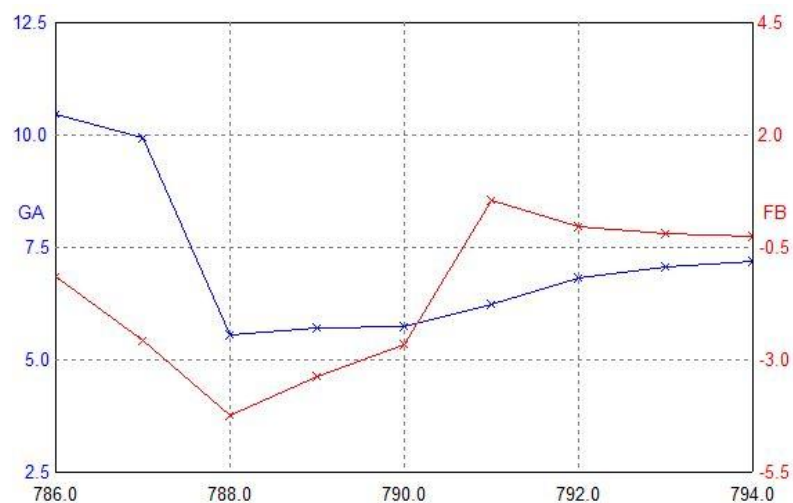


Рисунок 3.29 – Підсилення антени

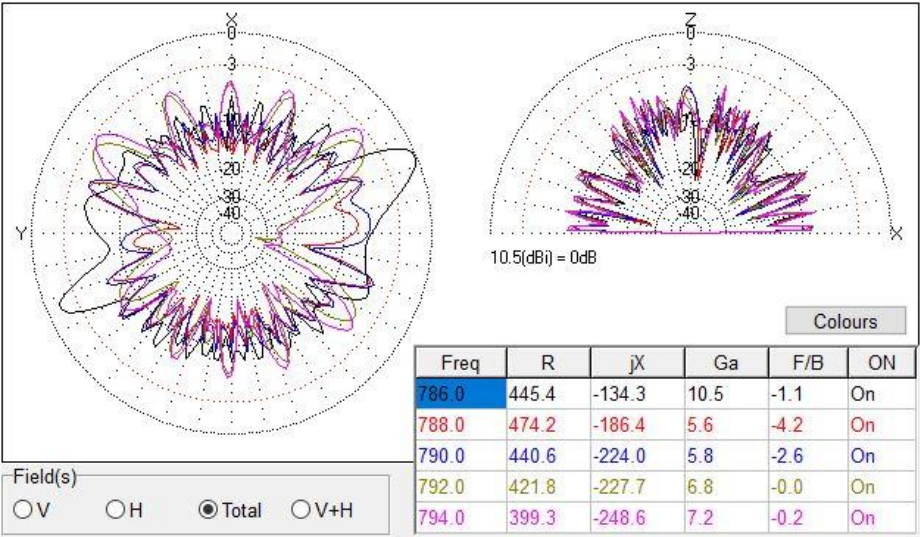


Рисунок 3.30 – ДС антени

- Perfect:

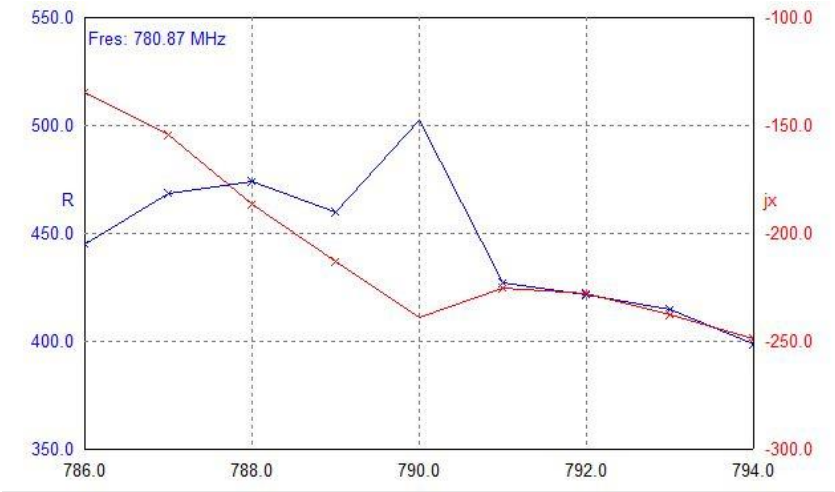


Рисунок 3.31 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

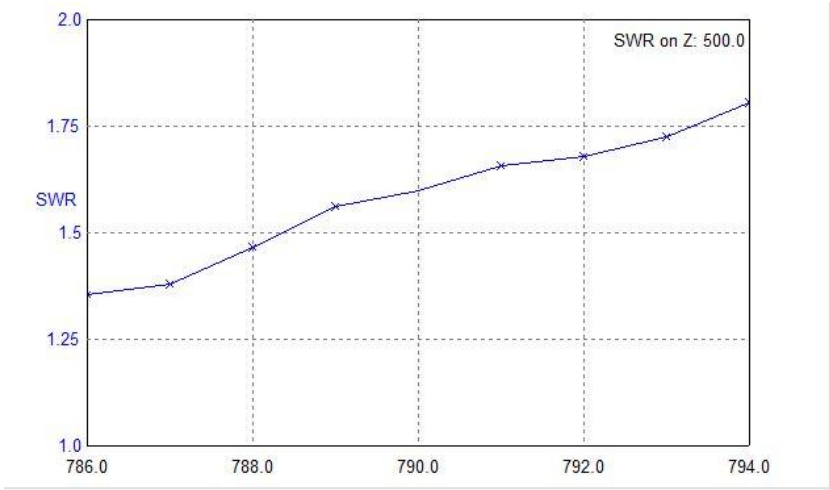


Рисунок 3.32 – КСХ антени

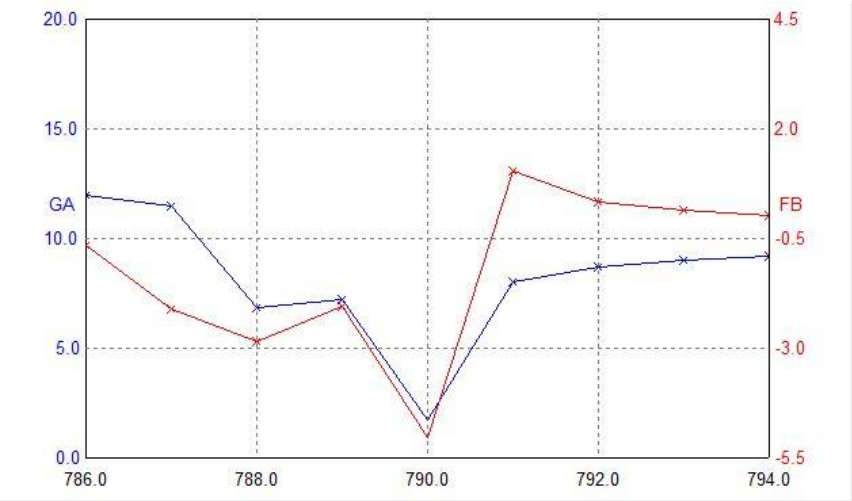


Рисунок 3.33 – Підсилення антени

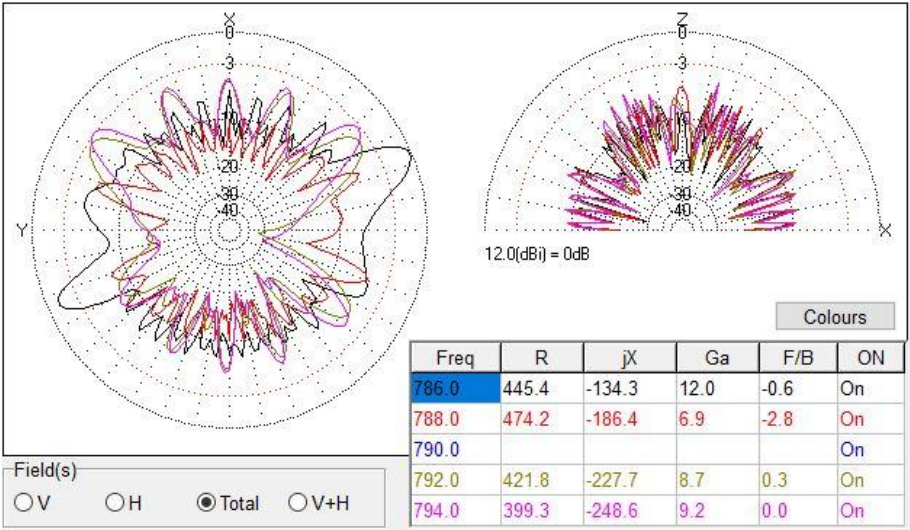


Рисунок 3.34 – ДС антени

- Free space:

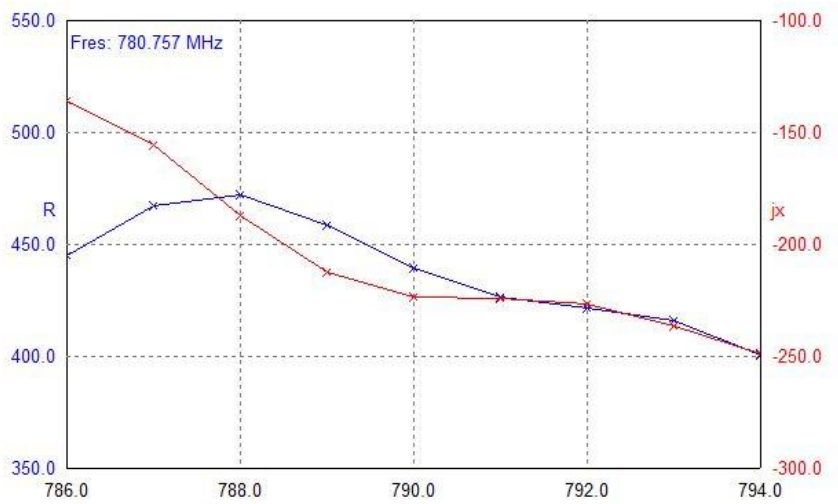


Рисунок 3.35 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

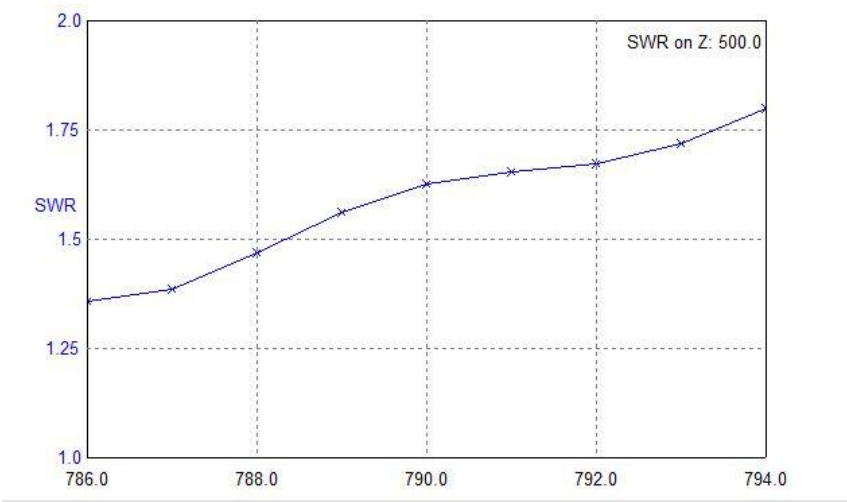


Рисунок 3.36 – КСХ антени

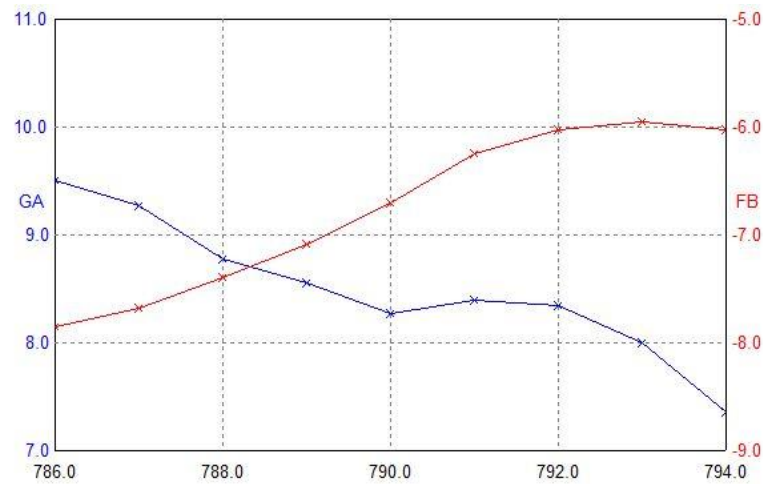


Рисунок 3.37 – Підсилення антени

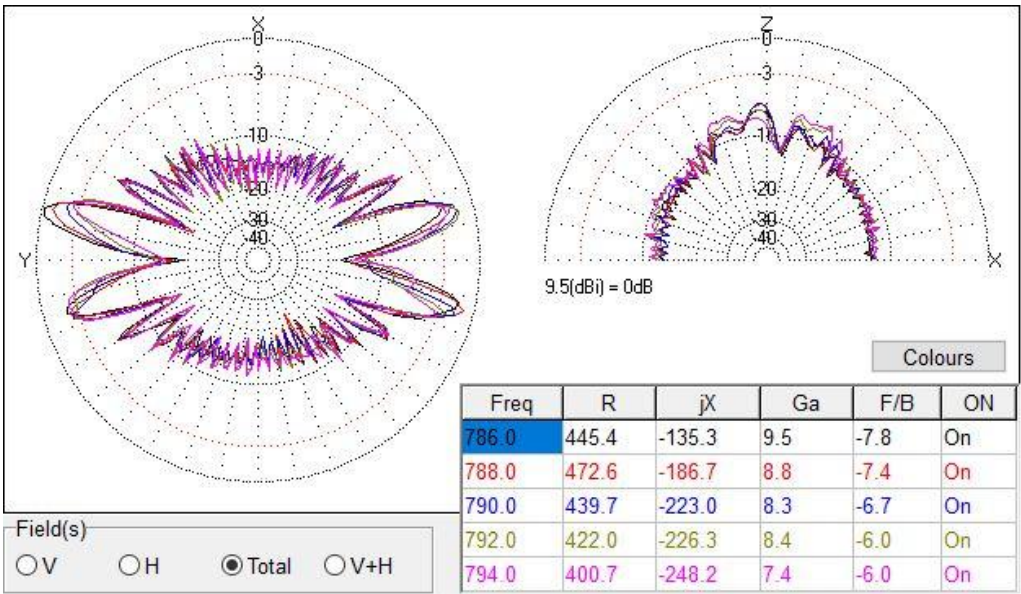


Рисунок 3.38 – ДС антени

4. Для частоти 14,05 МГц:
- Real

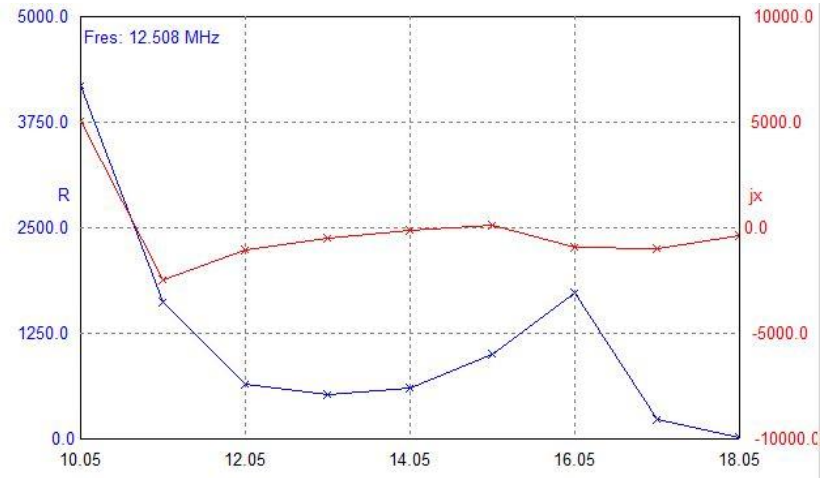


Рисунок 3.39 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

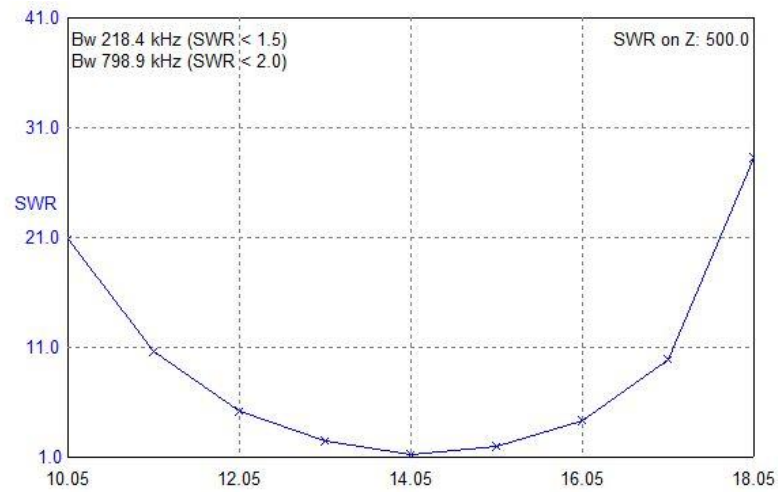


Рисунок 3.40 – КСХ антени

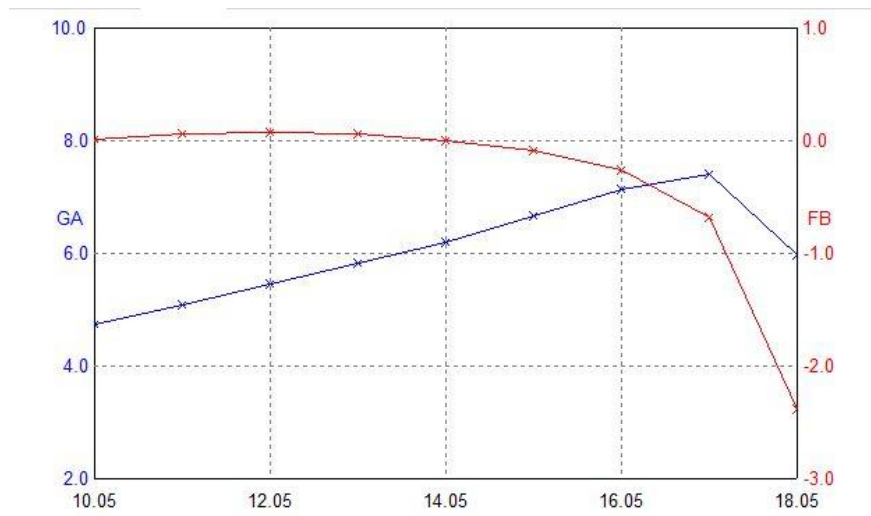


Рисунок 3.41 – Підсилення антени

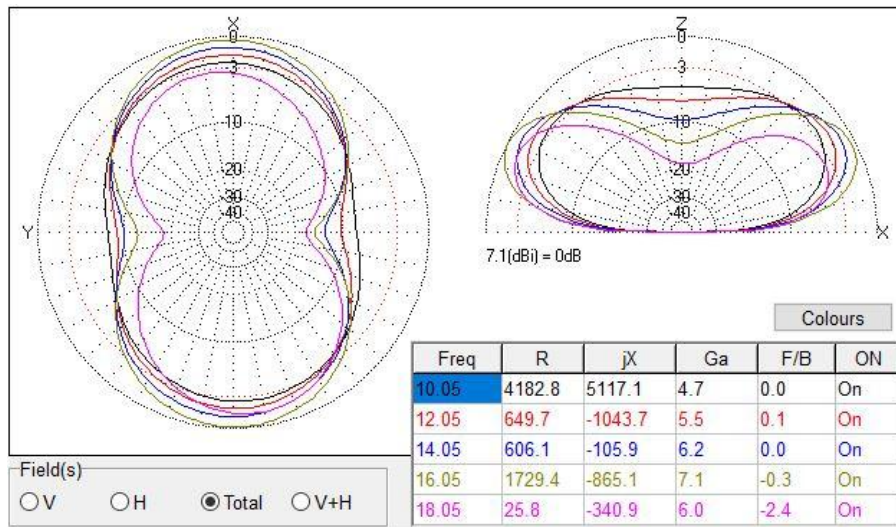


Рисунок 3.42 – ДС антени

- Perfect:

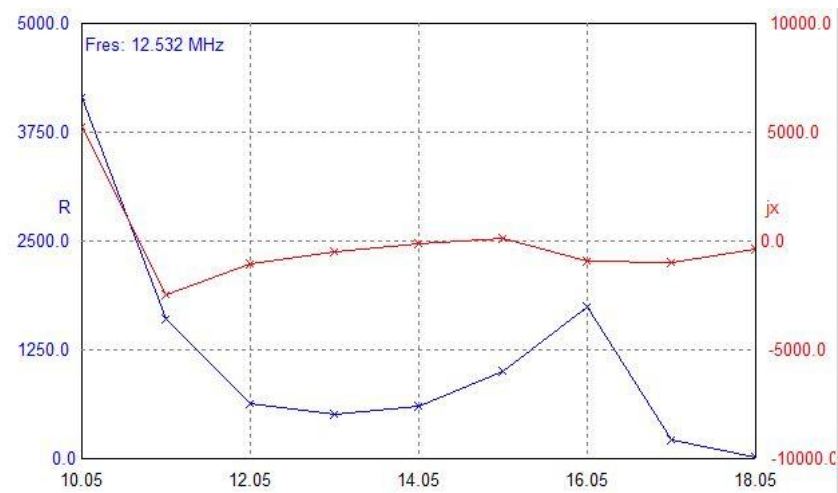


Рисунок 3.43 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

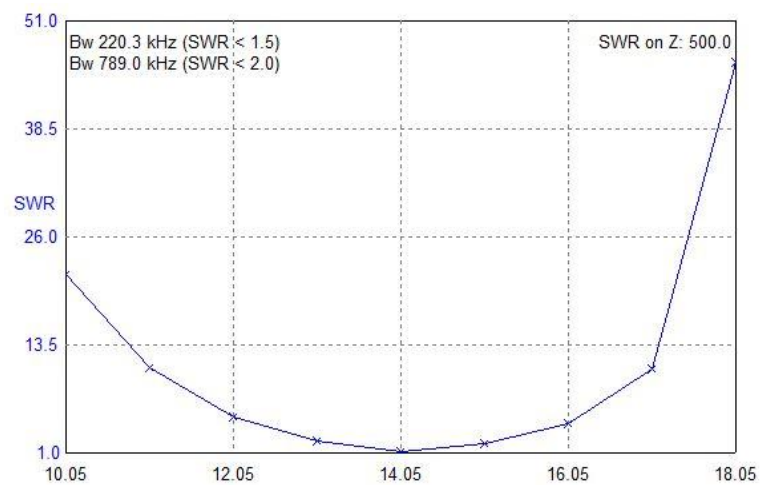


Рисунок 3.44 – КСХ антени

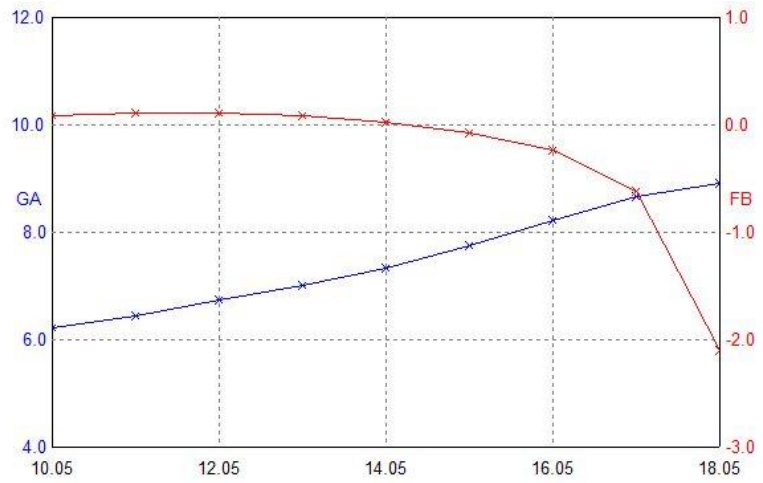


Рисунок 3.45 – Підсилення антени

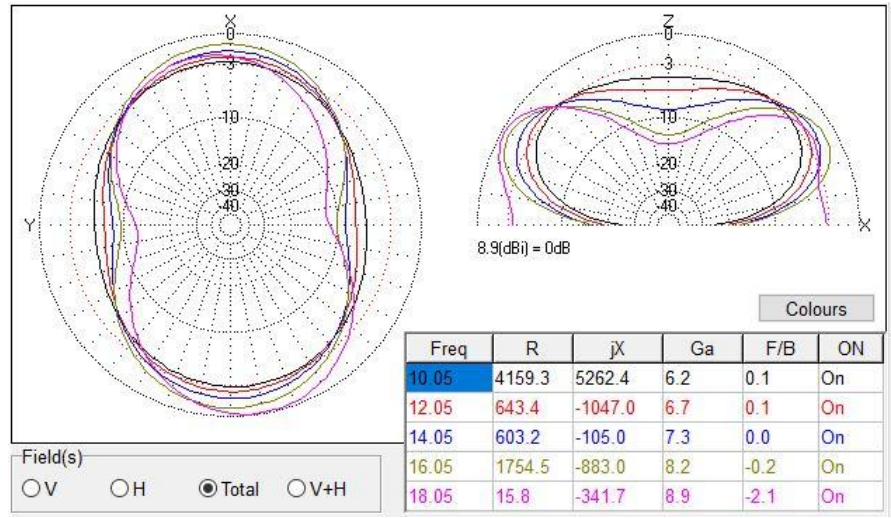


Рисунок 3.46 – ДС антени

- Free space:

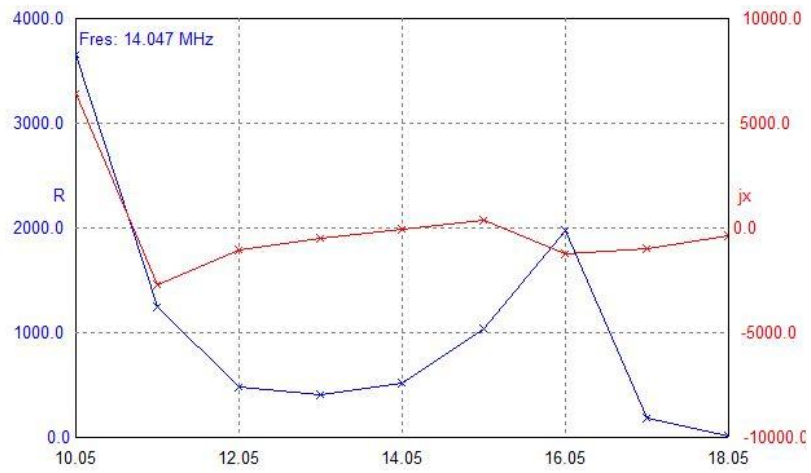


Рисунок 3.47 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

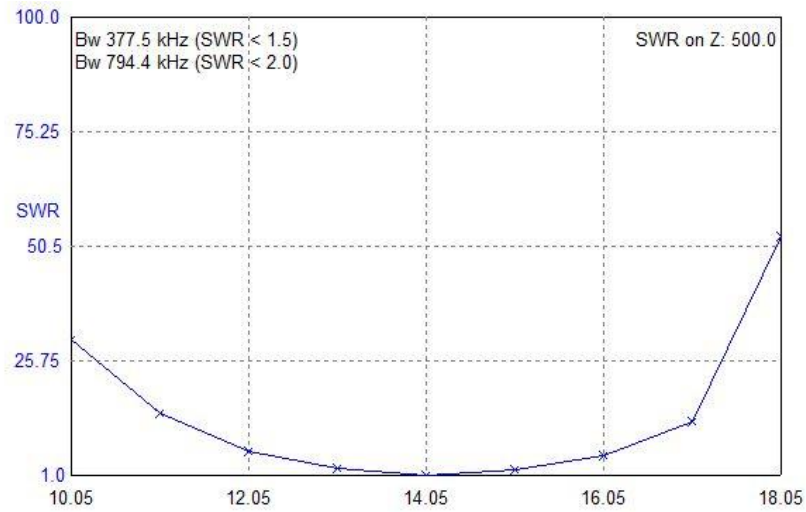


Рисунок 3.48 – КСХ антени

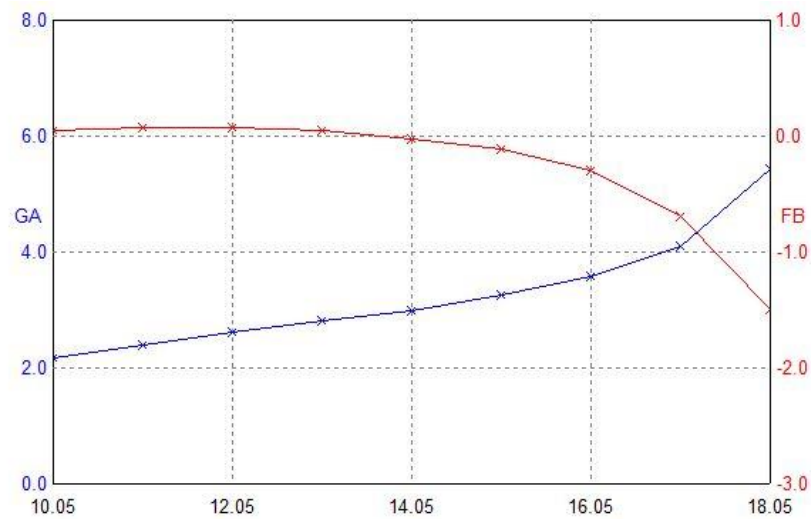


Рисунок 3.49 – Підсилення антени

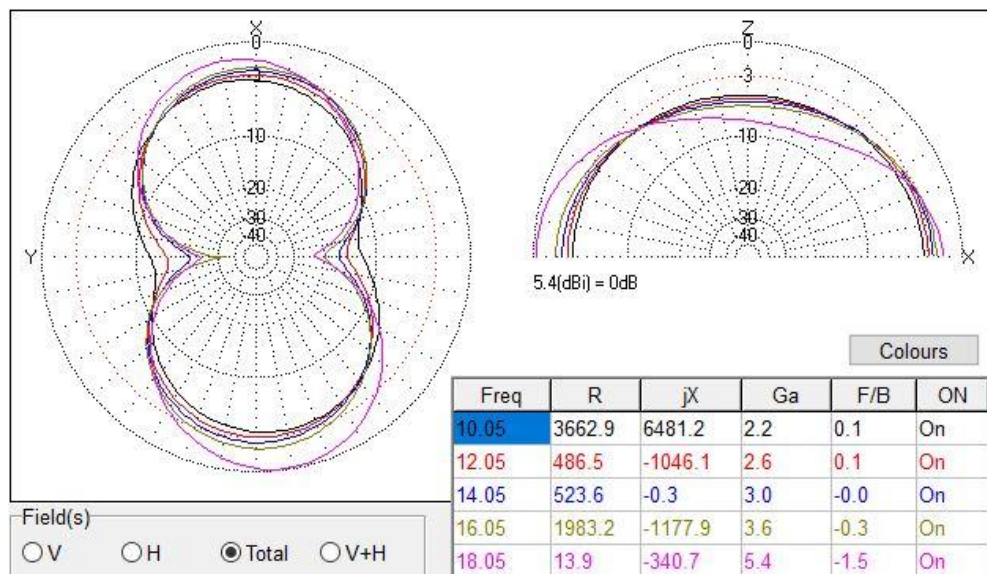


Рисунок 3.50 – ДС антени

Як видно всі графіки не мають лінійності на заданій ширині смуги, тобто є відсутність локальної лінійності. В ідеалі, щоб не було спотворень спектра, КСХ (SWR) повинна бути лінійна в межах ширини спектра. Всі значення КСХ для DVB-T2 діапазону були менше 1,5, що є гарним результатом, оскільки значення КСХ повинно бути < 3 для отримання допустимого коефіцієнту відбиття. Вагомим недоліком даного типу рамкової антени є ДС, оскільки тільки при частоті 14,05МГц, яка була задана програмою, було отримано прийнятний результат.

3.2 Моделювання рамкової антени типу «подвійна петля»

На рис.3.51 зображена об'ємна модель антени із характерними розмірами у правій нижній частині.

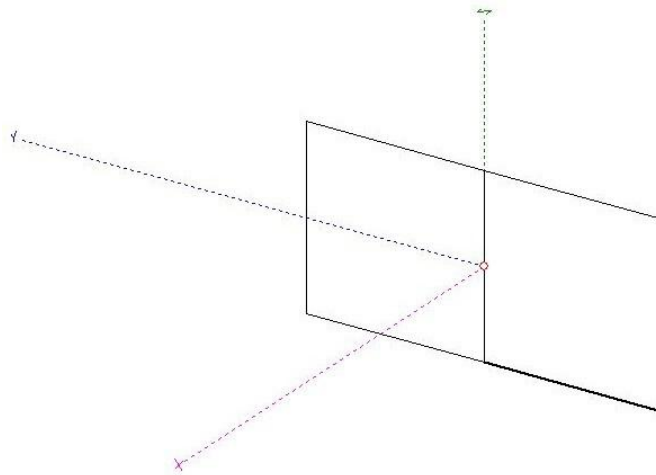


Рисунок 3.51 – Програмна модель двовиткової дельтаподібної рамкової антени

Промодельовані характеристики антени мають на різних частотах наступні результати:

1. Для частоти 470 МГц:
- Real

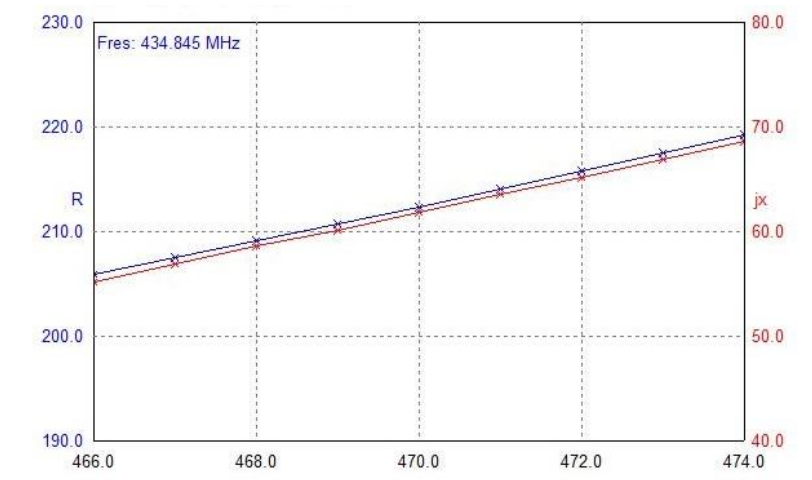


Рисунок 3.52 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

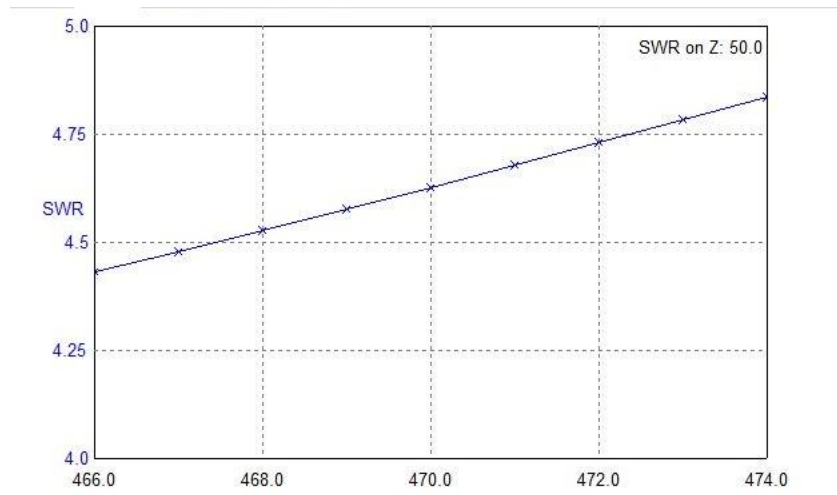


Рисунок 3.53 – КСХ антени

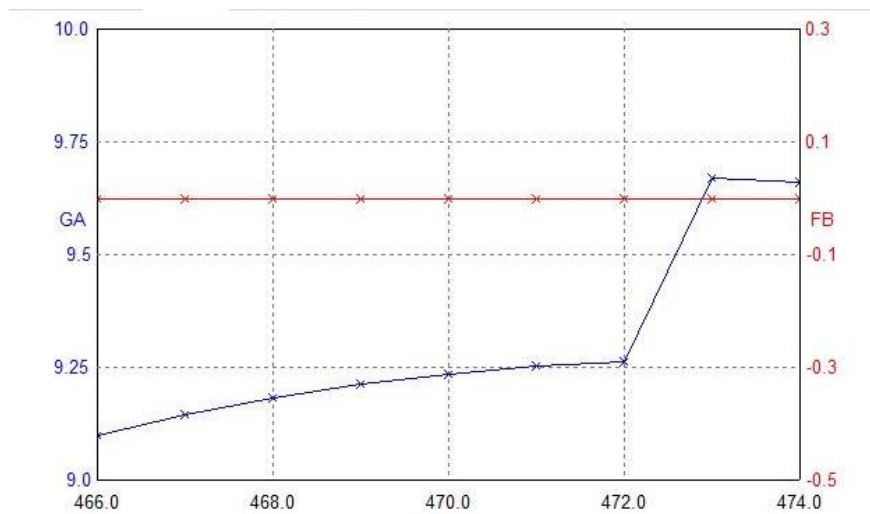


Рисунок 3.54 – Підсилення антени

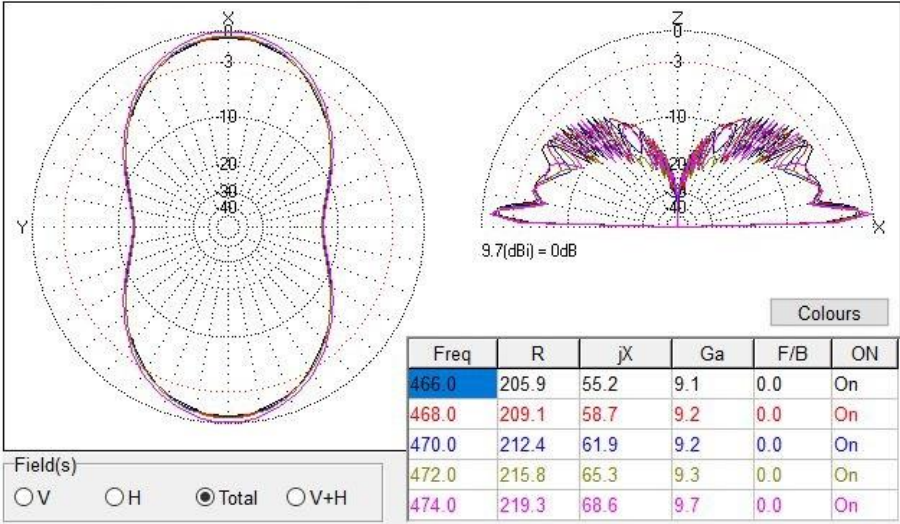


Рисунок 3.55 – ДС антени

- Perfect:

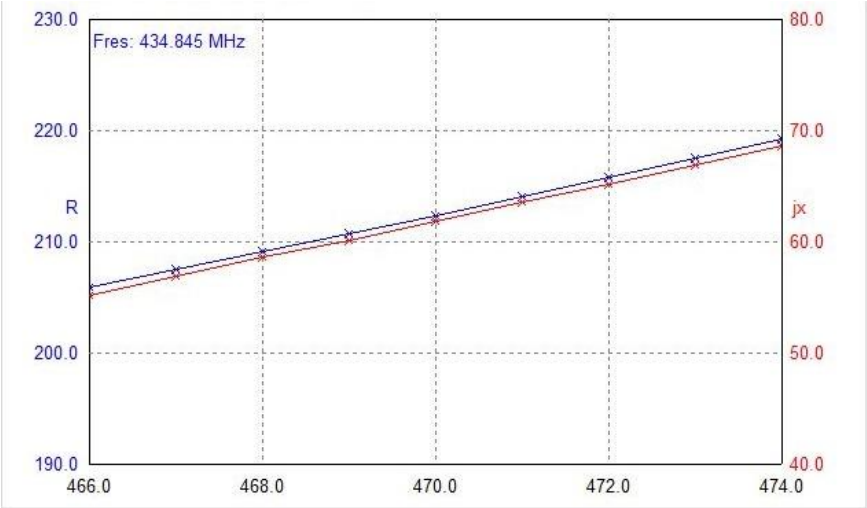


Рисунок 3.56 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

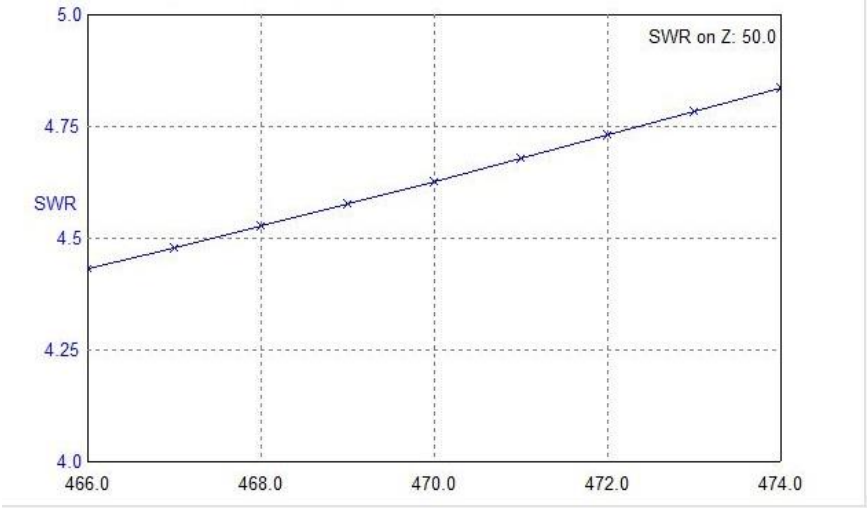


Рисунок 3.57 – КСХ антени

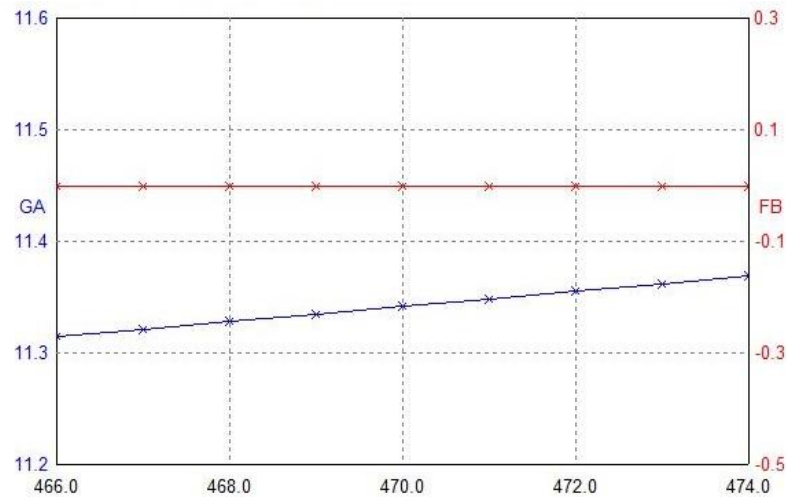


Рисунок 3.58 – Підсилення антени

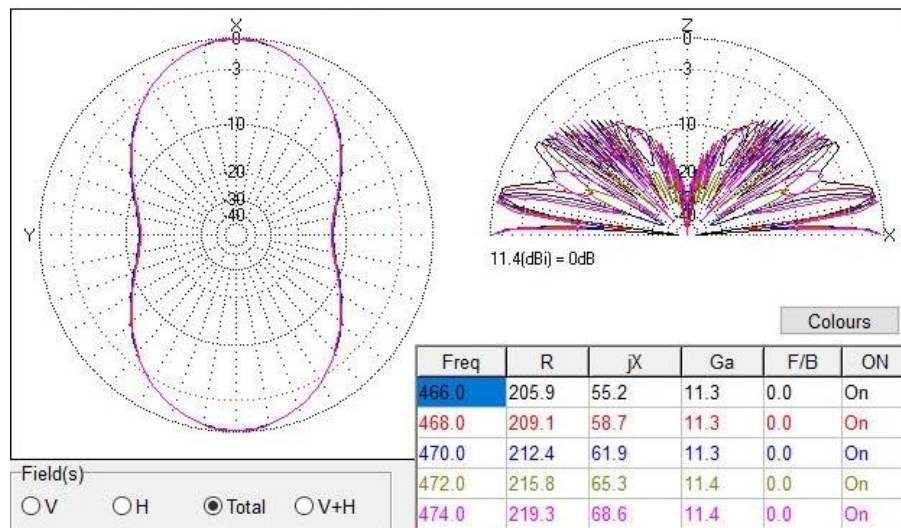


Рисунок 3.59 – ДС антени

- Free space:

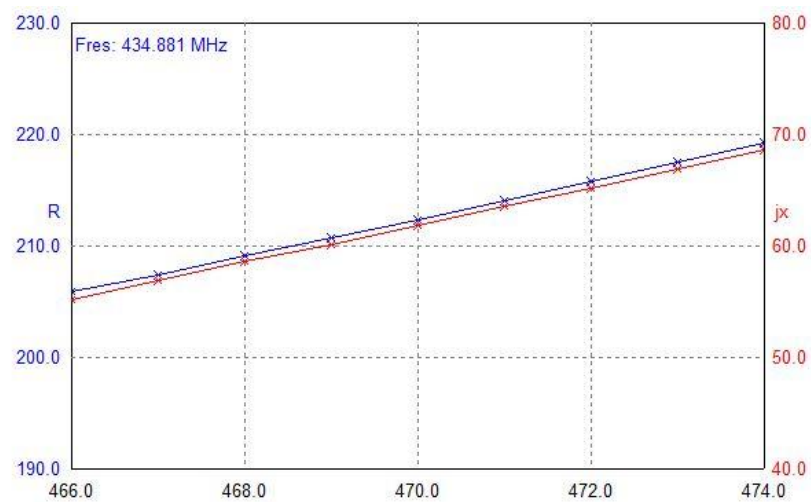


Рисунок 3.60 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

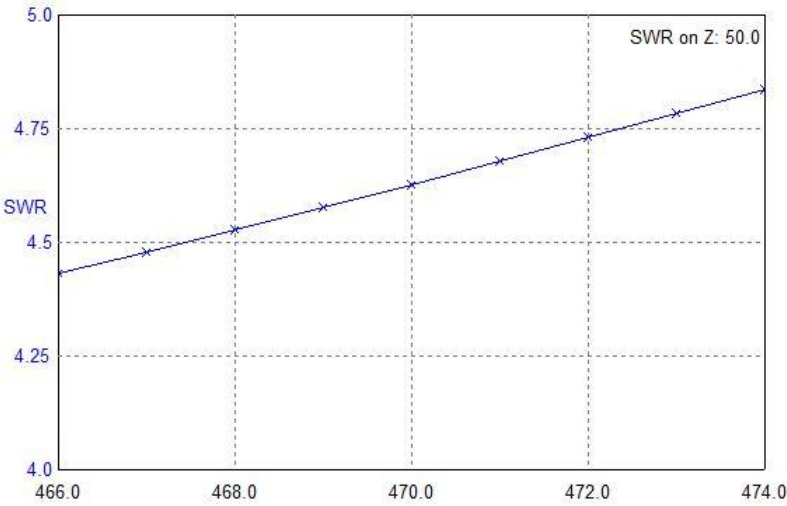


Рисунок 3.61 – КСХ антени

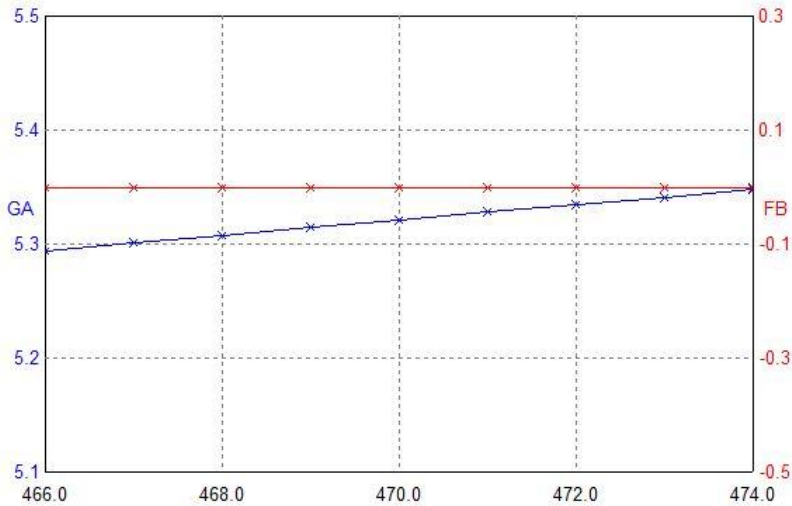


Рисунок 3.62 – Підсилення антени

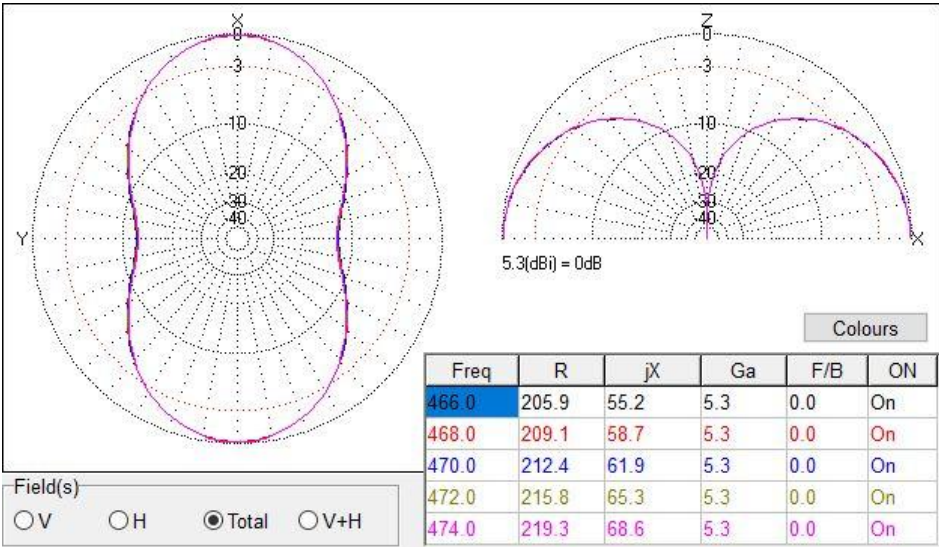


Рисунок 3.63 – ДС антени

2. Для частоти 630 МГц:
- Real

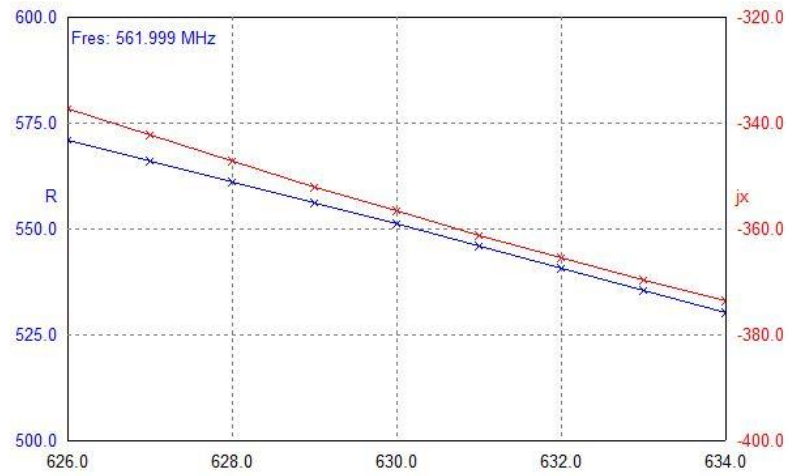


Рисунок 3.64 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

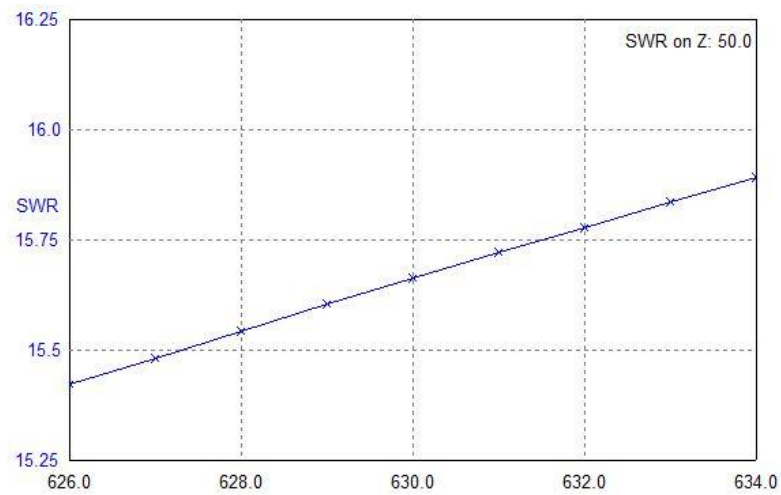


Рисунок 3.65 – КСХ антени

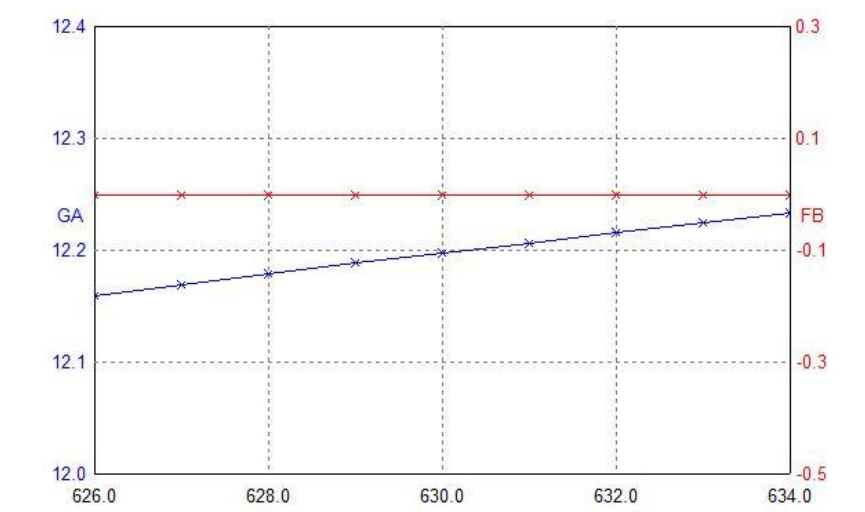


Рисунок 3.66 – Підсилення антени

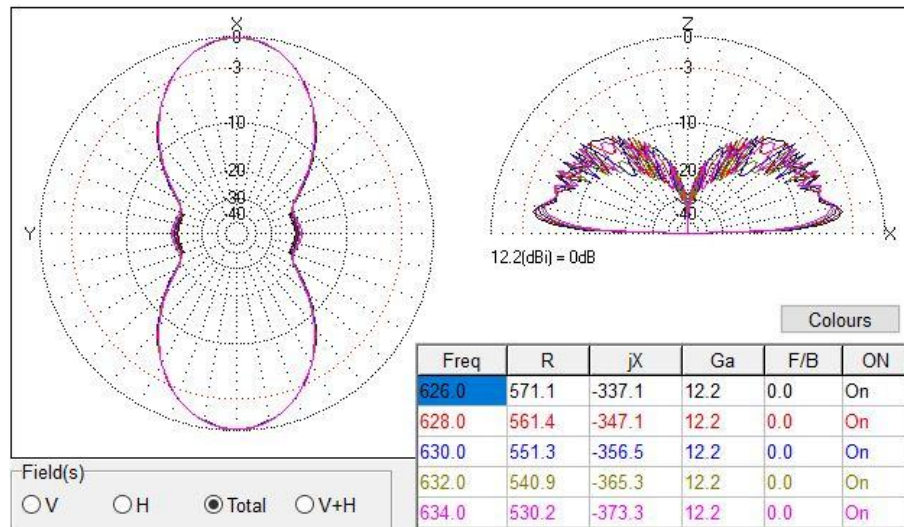


Рисунок 3.67 – ДС антени

- Perfect:

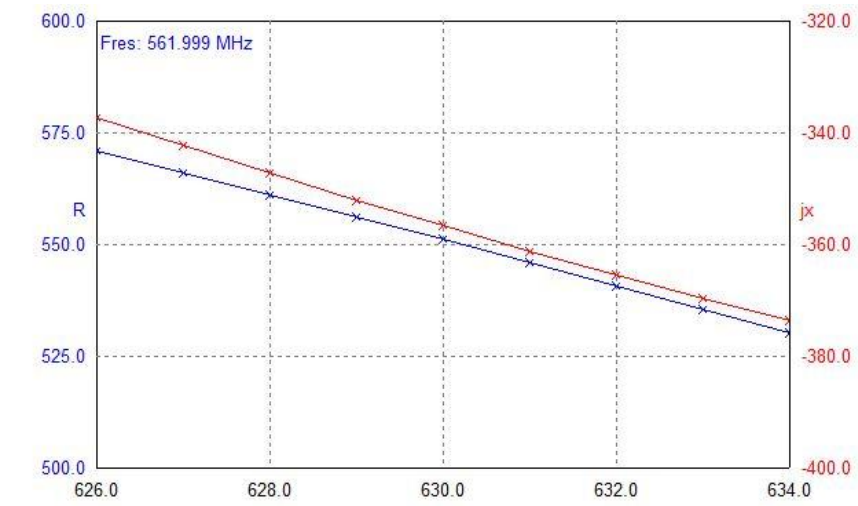


Рисунок 3.68 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

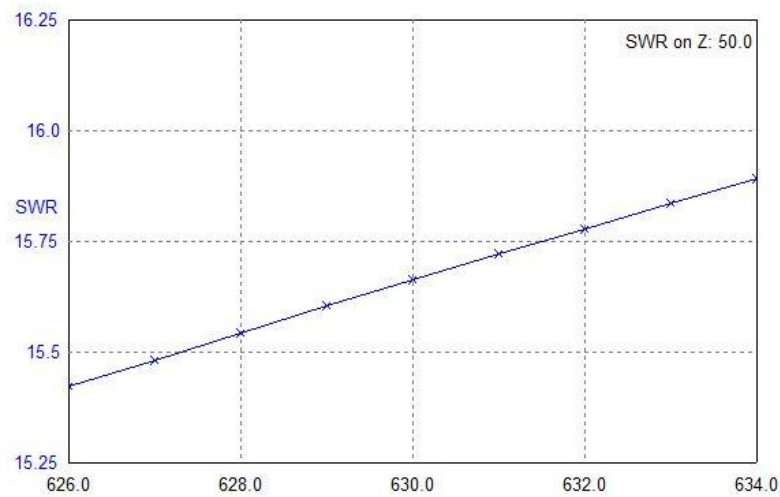


Рисунок 3.69 – КСХ антени

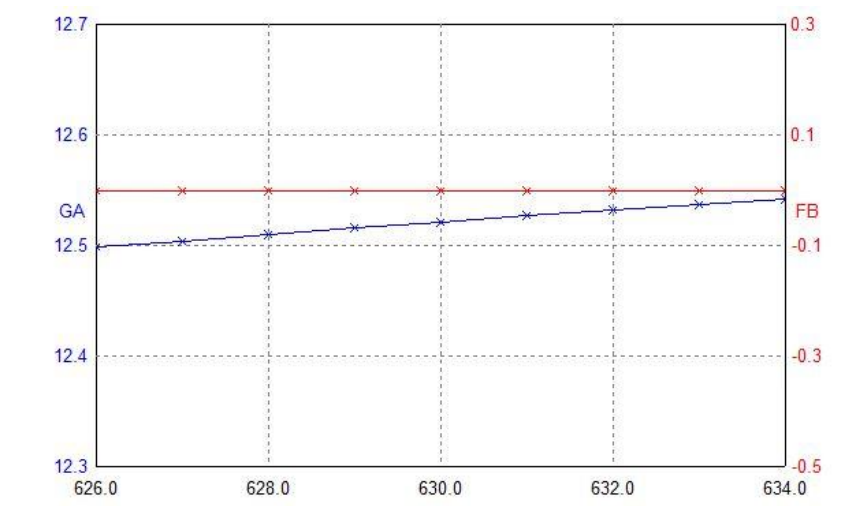


Рисунок 3.70 – Підсилення антени

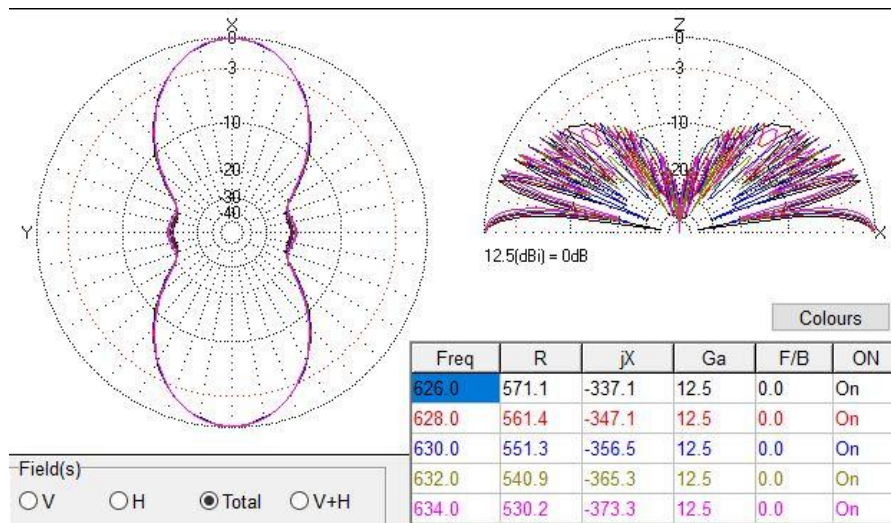


Рисунок 3.71 – ДС антени

- Free space:

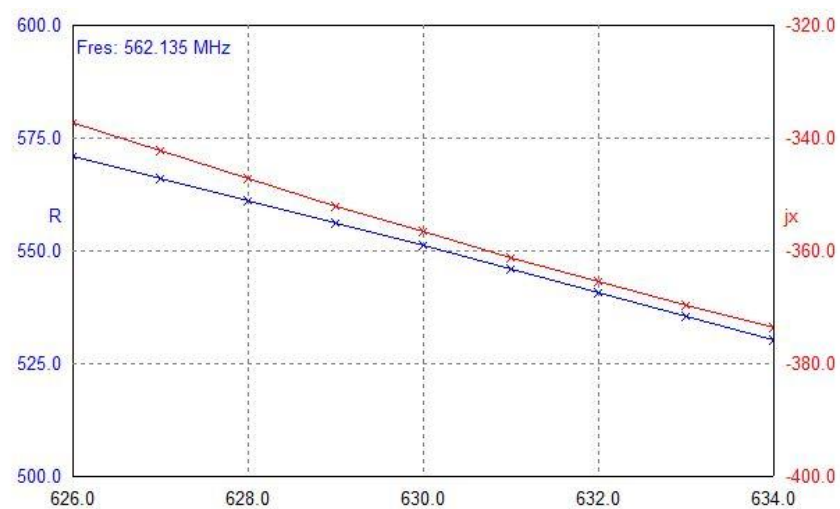


Рисунок 3.72 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

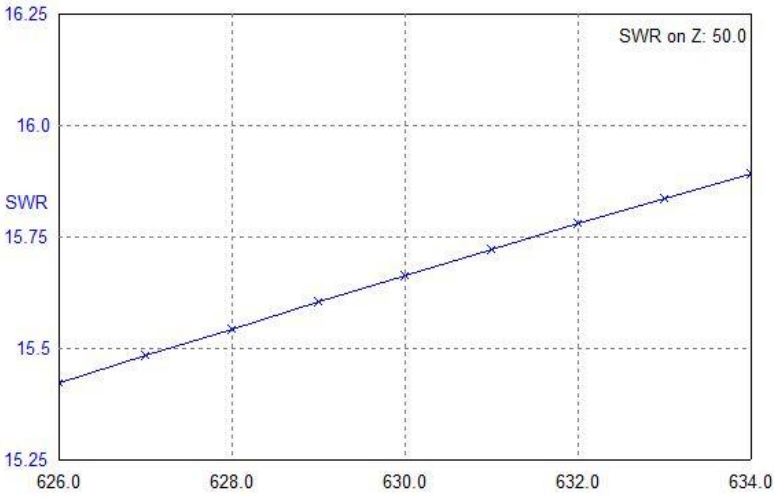


Рисунок 3.73 – КСХ антени

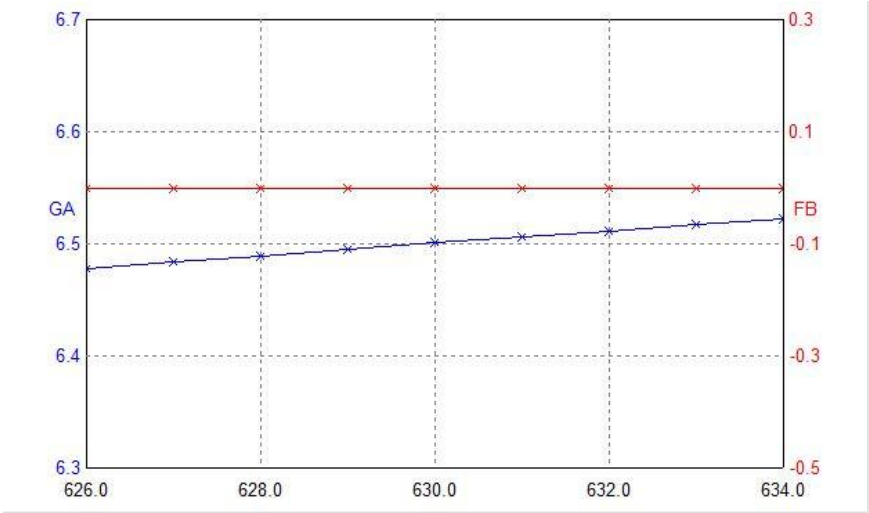


Рисунок 3.74 – Підсилення антени

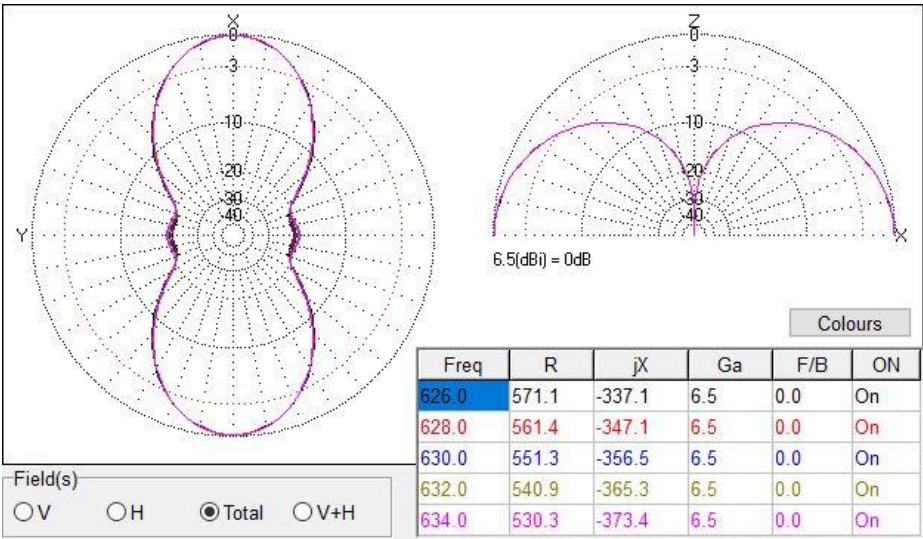


Рисунок 3.75 – ДС антени

3. Для частоти 790 МГц:
- Real

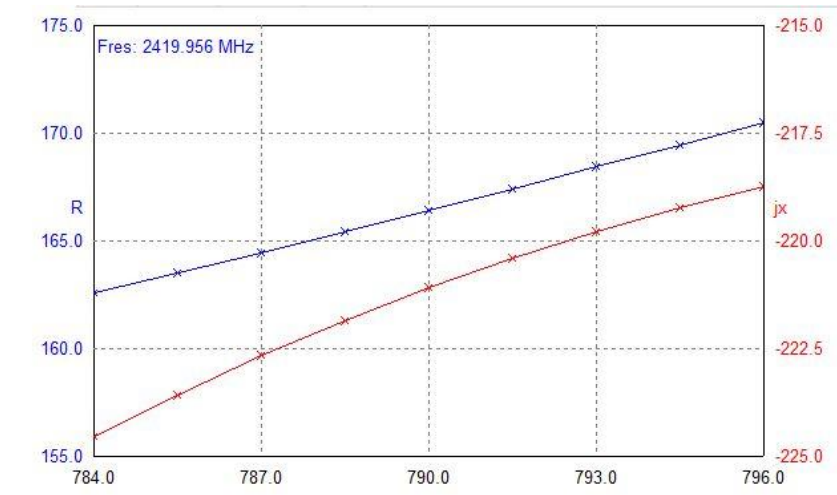


Рисунок 3.76 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

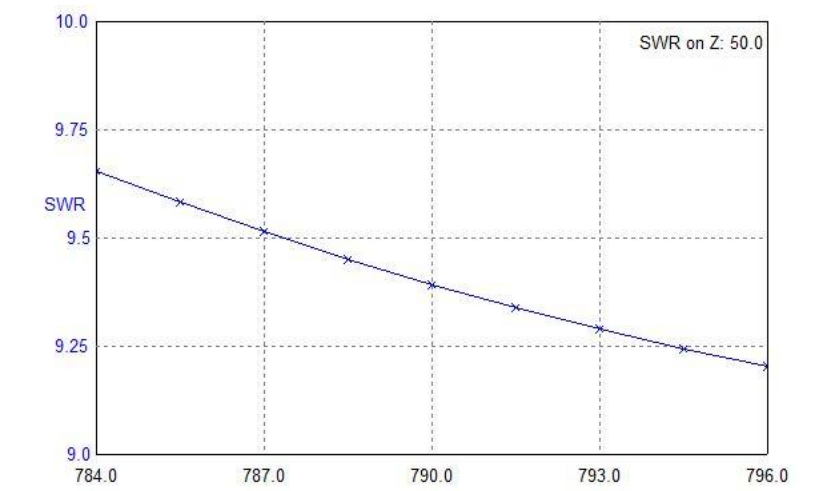


Рисунок 3.77 – КСХ антени

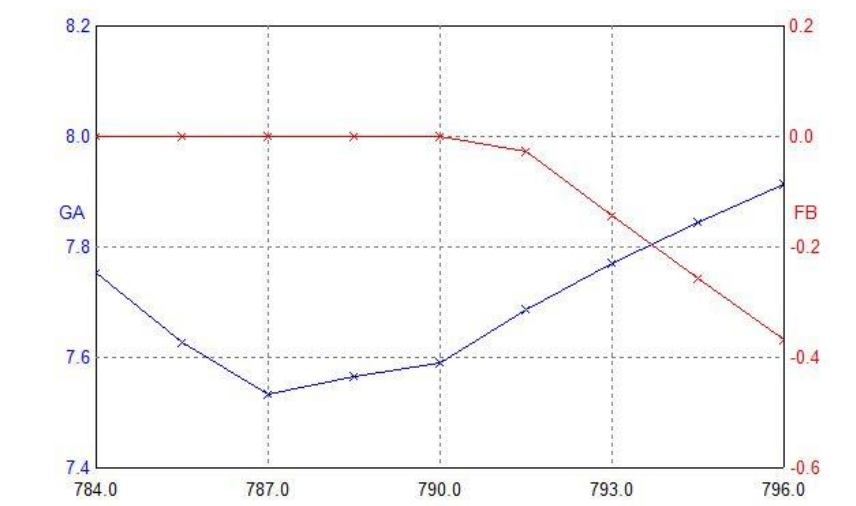


Рисунок 3.78 – Підсилення антени

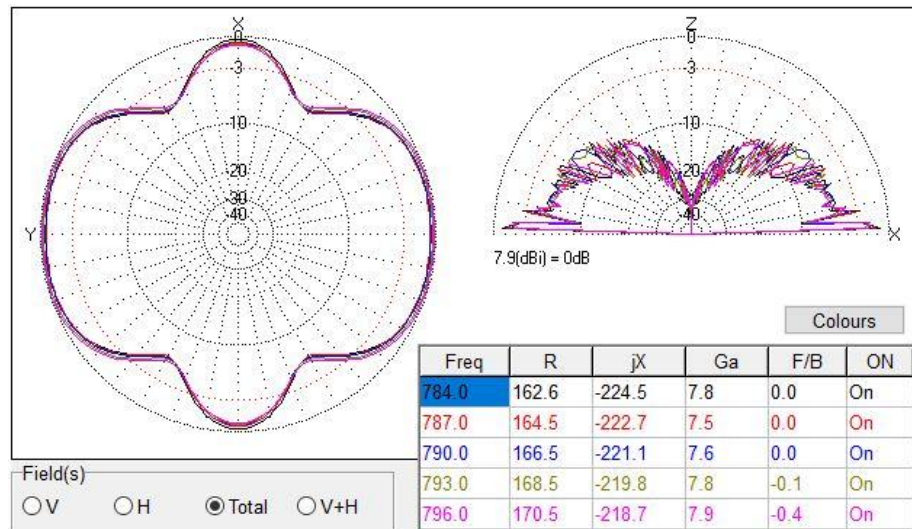


Рисунок 3.79 – ДС антени

- Perfect:

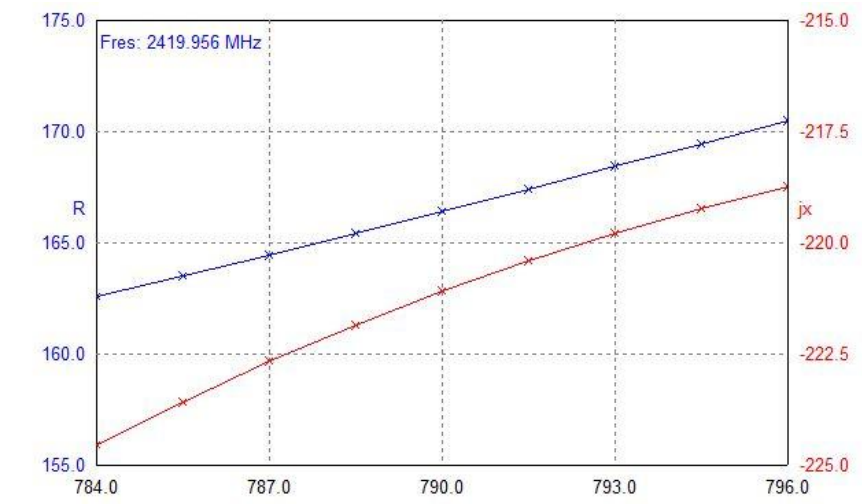


Рисунок 3.80 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

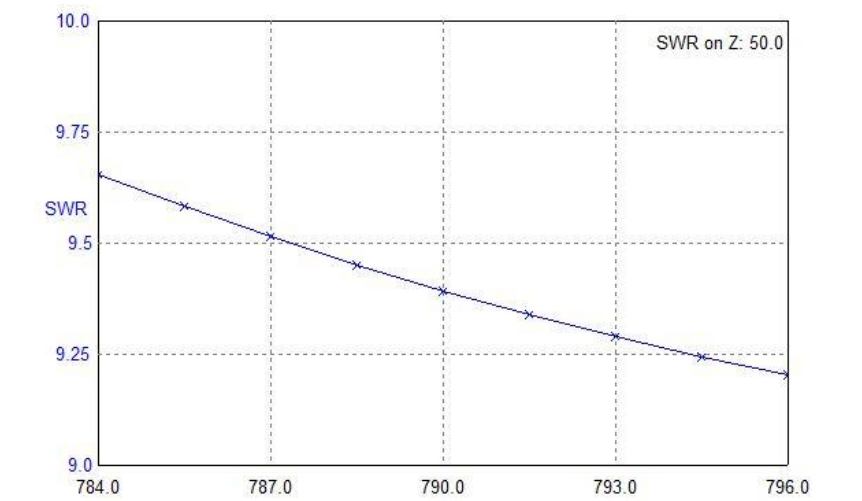


Рисунок 3.81 – КСХ антени

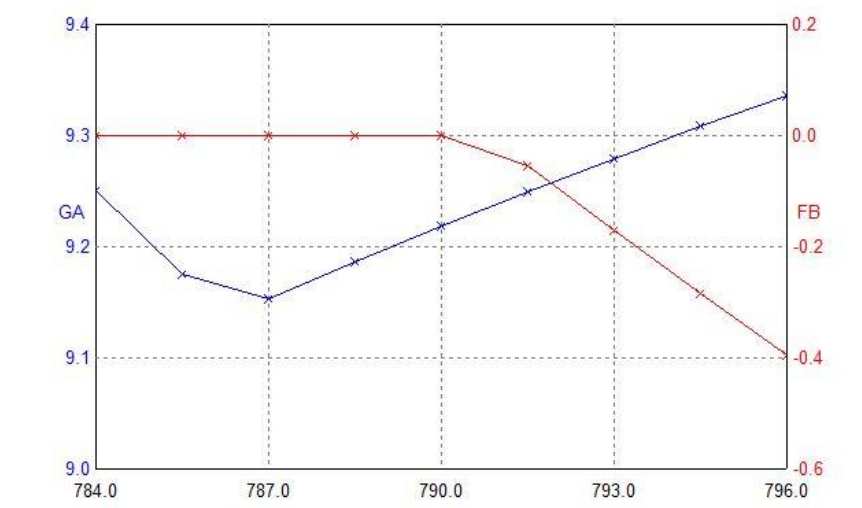


Рисунок 3.82 – Підсилення антени

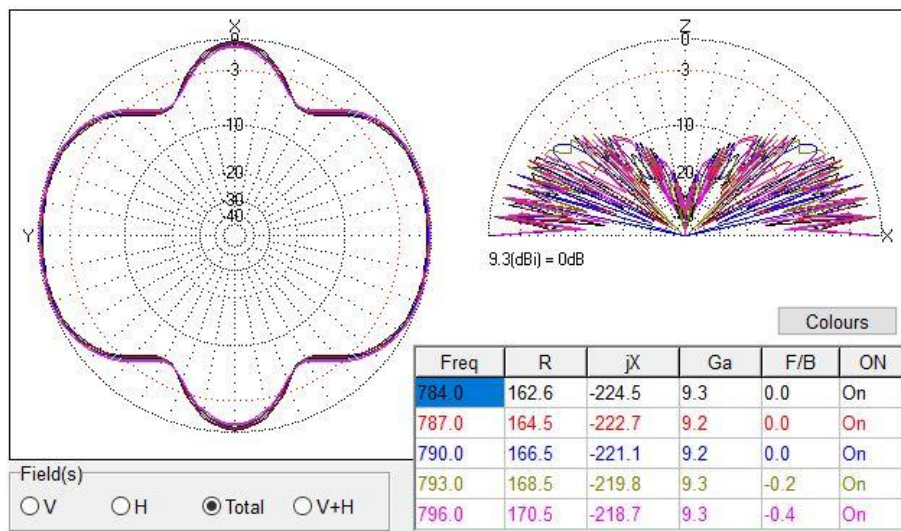


Рисунок 3.83 – ДС антени

- Free space:

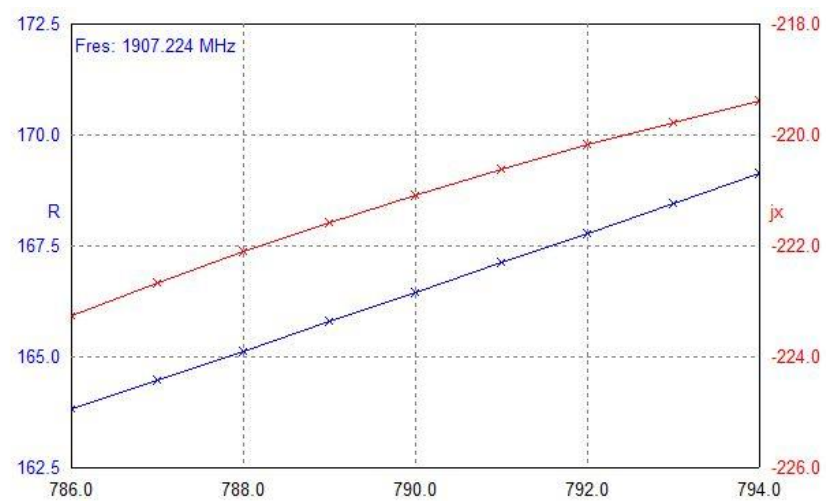


Рисунок 3.84 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

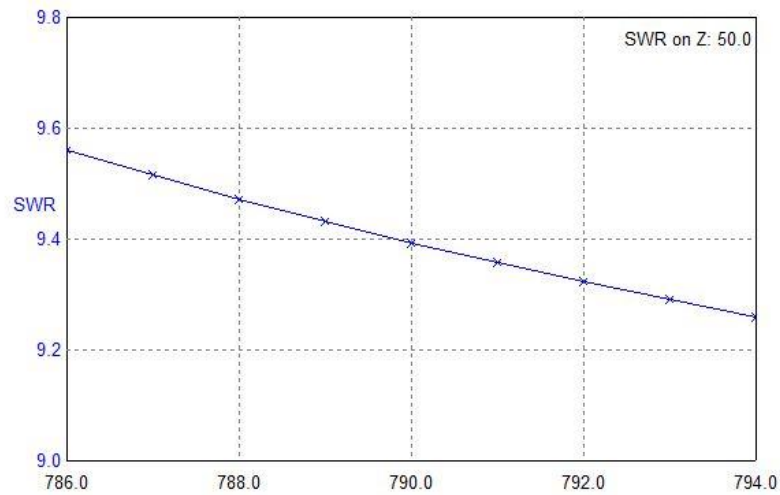


Рисунок 3.85 – КСХ антени

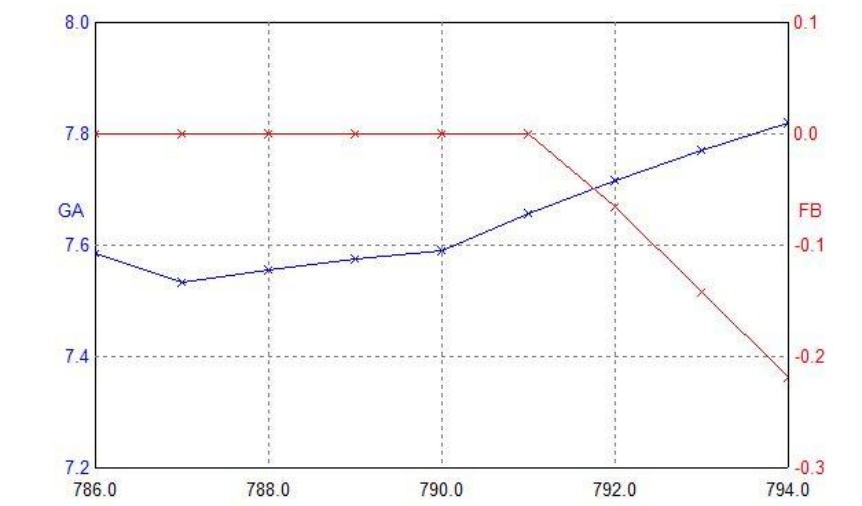


Рисунок 3.86 – Підсилення антени

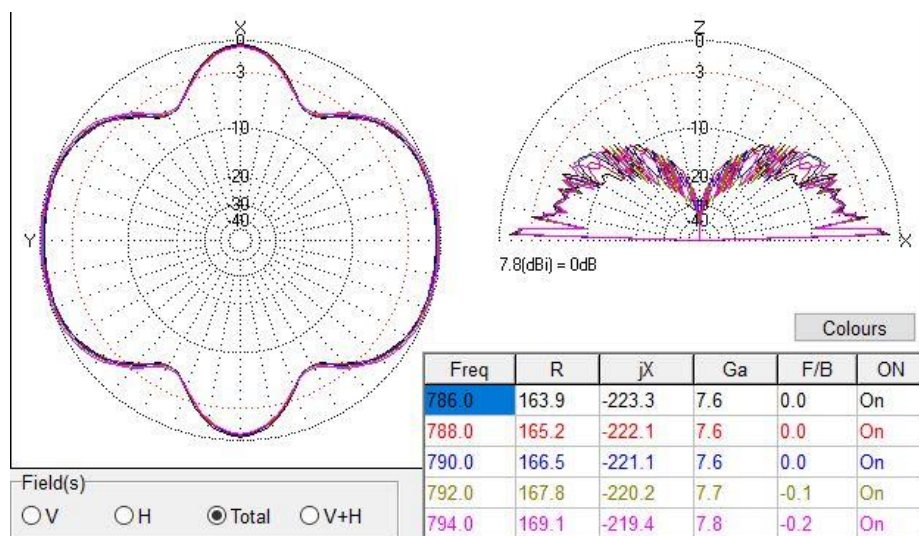


Рисунок 3.87 – ДС антени

4. Для частоти 435 МГц:
- Real

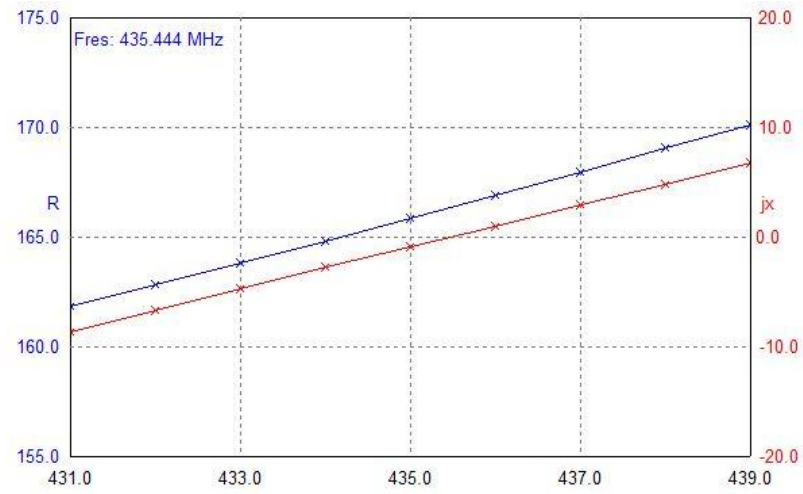


Рисунок 3.88 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

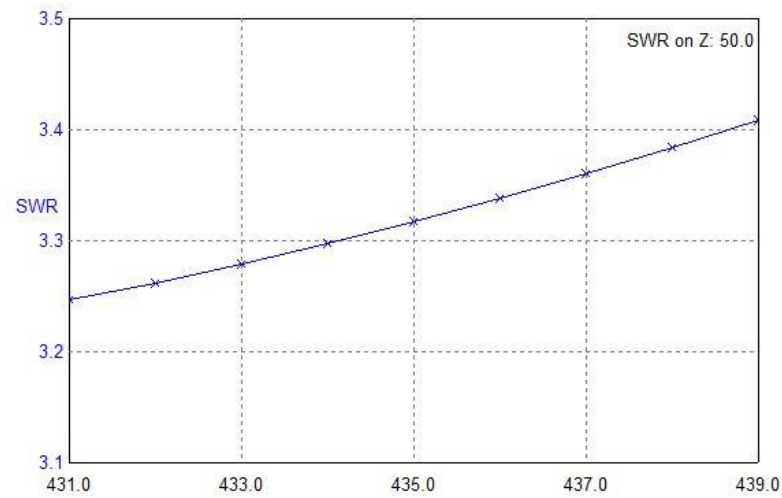


Рисунок 3.89 – КСХ антени

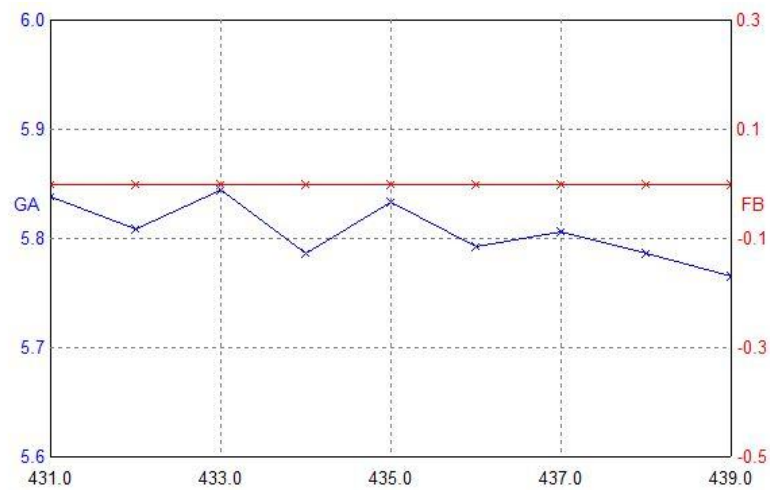


Рисунок 3.91 – Підсилення антени

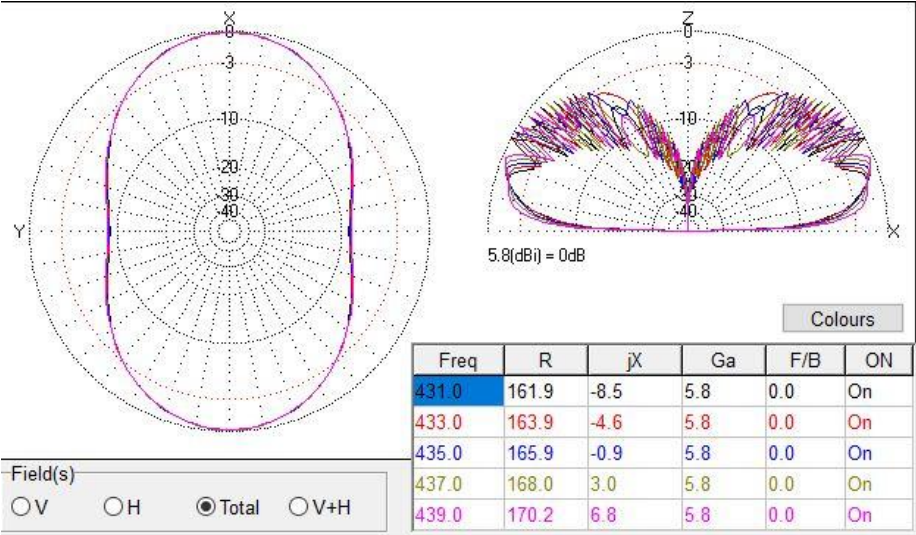


Рисунок 3.92 – ДС антени

- Perfect:

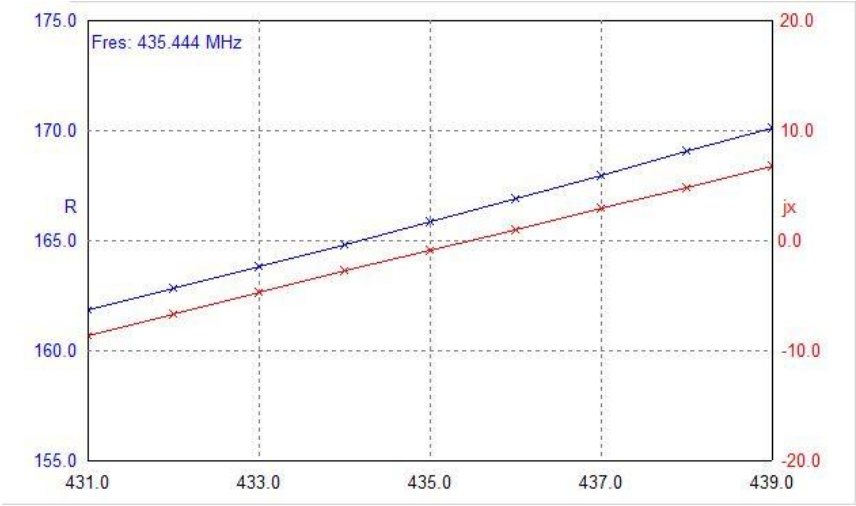


Рисунок 3.93 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

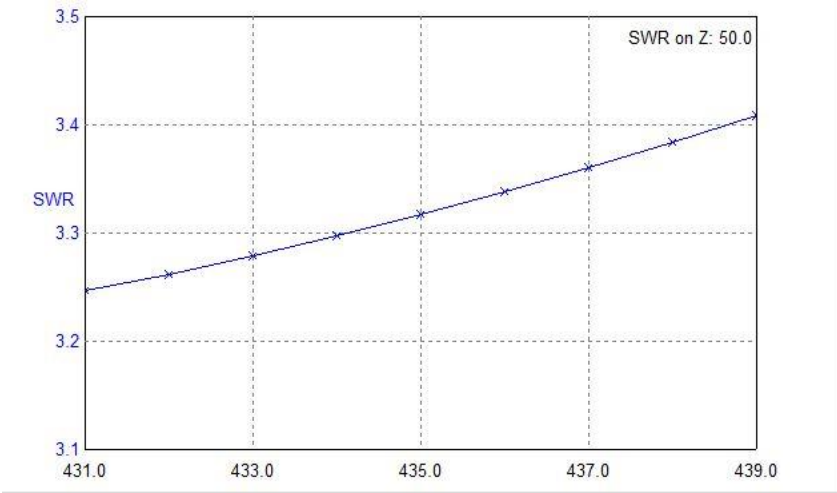


Рисунок 3.94 – КСХ антени

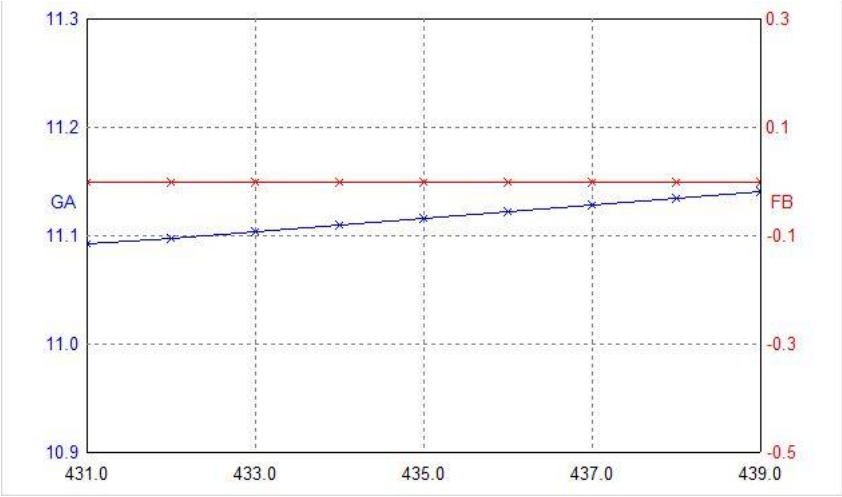


Рисунок 3.95 – Підсилення антени

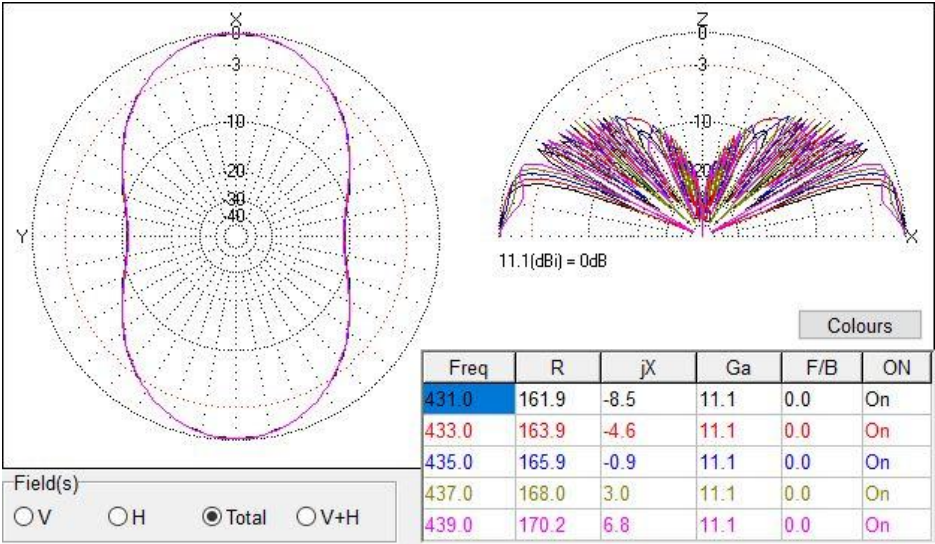


Рисунок 3.96 – ДС антени

- Free space:

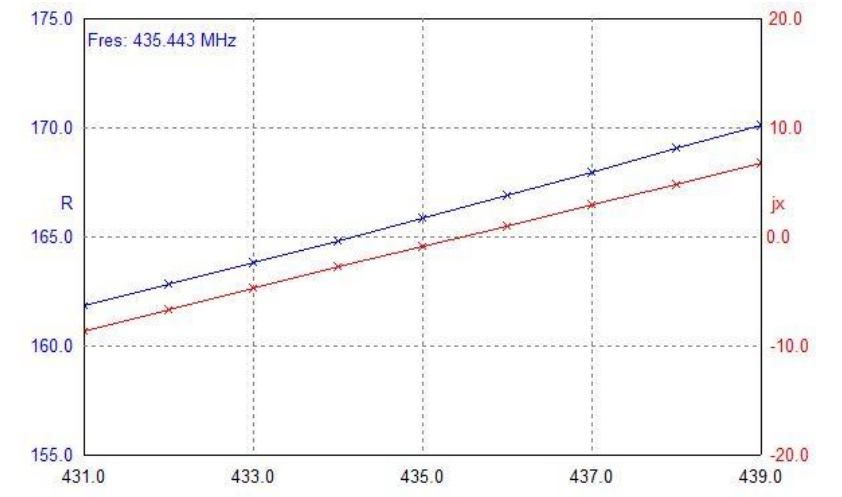


Рисунок 3.97 – Залежність активного та реактивного опору від частоти

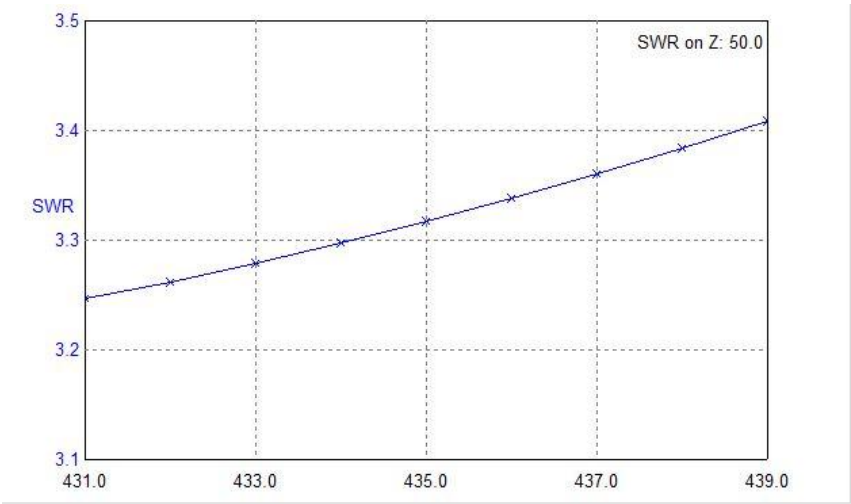


Рисунок 3.98 – КСХ антени

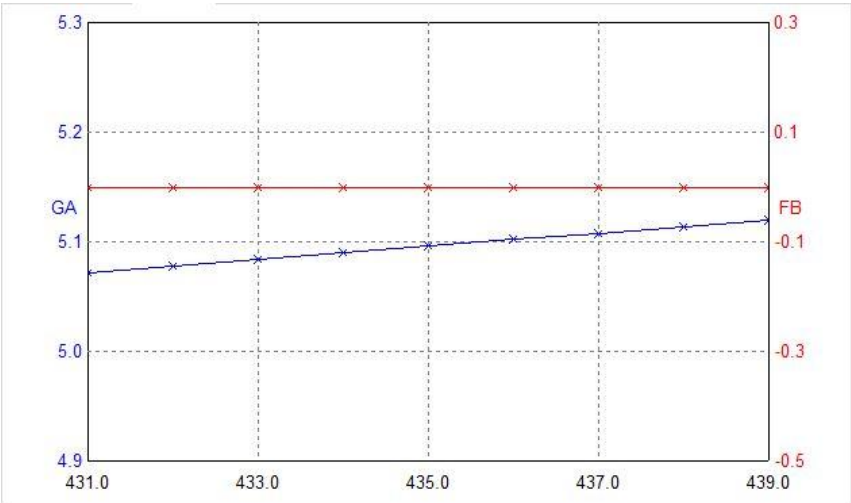


Рисунок 3.99 – Підсилення антени

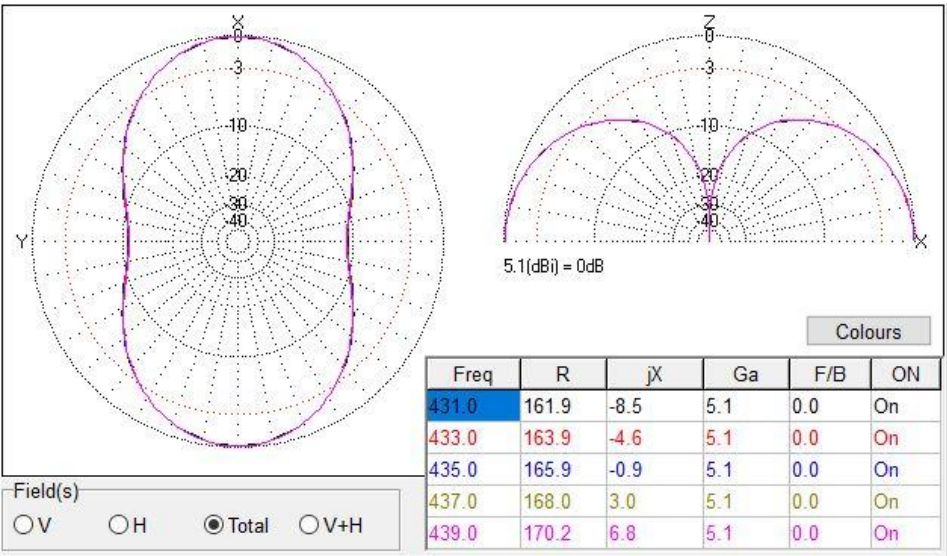


Рисунок 3.100 – ДС антени

Даний тип рамкової антени має лінійні графіки, що дає можливість для відсутності спотворення спектра. На частоті 435МГц, яка була задана самою програмою, для всіх типів розміщення антени КСХ було рівне 3,32, що є неприйнятним значенням, і із збільшенням частоти значення КСХ тільки зростало. Всі значення КСХ для DVB-T2 діапазону були звичайно більше 3, що є недоцільним застосуванням даної антени. На відміну від першого варіанту, дана рамкова антена отримала гарні результати ДС особливо для розташування free space і perfect.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було розраховано основні параметри та дослідження характеристик багатовиткових рамкових антен на частотах 470...790 МГц, що відповідають частотам європейського стандарту ефірного цифрового мовлення DVB-T2, на пропускній смузі 8000 кГц.

В процесі виконання було розглянуто та проаналізовано рамкові антени з подальшим оглядом програмних моделей рамкових антен для проведення експериментальних досліджень.

Як показали програмні розрахунки, розглянуті антени мають свої переваги і недоліки. Там де один тип антени має доцільний результат, інший мав недоцільний. Об'єднавши всі переваги антен можна отримати підходящу для використання DVB-T2 антену, тому для отримання оптимізованого варіанту треба комбінувати обидва варіанти рамкових антен.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). – DVB Document A122, June 2008
2. Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)– DVB Document A133, February 2009.
3. Гриб А. Системи супутникового та цифрового телебачення / А. Гриб. – Харків: СВІТ, 2017. – 350 с..
4. Середа М. Технічні основи телебачення / М. Середа. – Київ: Політехніка, 2019. – 300 с.
5. Соколов В. Цифрові антенні системи / В. Соколов. – Дніпро: Університет, 2017. – 350 с.
6. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design / C. A. Balanis. – John Wiley & Sons, 2016. – 1104 p.
7. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook / J. L. Volakis. – McGraw-Hill, 2018. – 1696 p.
8. Петренко В. В. Дослідження багатовиткових антен для прийому сигналів DVB-T2 / В. В. Петренко, О. С. Іванов // Радіоелектроніка і телекомунікації. – 2019. – № 2. – С. 45-55.
9. Савченко О. Дослідження ефективності антенних систем для цифрового телебачення / О. Савченко, В. Мельник // Техніка і технології в радіоелектроніці. – 2019. – № 3. – С. 88-95.
11. Федоров А. Аналіз багатовиткових рамкових антен для прийому DVB-T2 / А. Федоров // Журнал електроніки та зв'язку. – 2019. – № 4. – С. 102-110.
12. Пономаренко І. Антенні системи для цифрового телебачення: огляд та перспективи / І. Пономаренко, О. Кравчук // Телекомунікації та радіозв'язок. – 2019. – № 5. – С. 74-83
13. Ковальчук В. Аналіз ефективності багатовиткових антен для прийому DVB-T2 / В. Ковальчук // Вісник ВНТУ. – 2019. – № 2. – С. 61-70.
14. Zhou G., Smith G. A new model for the half-loop antenna and its application to multiturn structures // Journal of Antenna and Propagation. – 2019. – Vol. 17, No. 3. – P. 210-219.

15. Johnson D. Multiturn Antennas for DVB-T2: A Comparative Study // Radio Science Bulletin. – 2019. – Vol. 67, No. 2. – P. 305-318.
16. Patel S. Compact Multiturn Loop Antenna Designs for DVB-T2 Reception // Progress in Electromagnetics Research. – 2019. – Vol. 62. – P. 15-25.
17. Li, Hongyan, et al. Optimization of Multiple-Antenna Systems for DVB-T2 Reception. IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 65, no. 2, 2019, pp. 328–335.
18. Lai, Chuan, et al. Optimized Antenna Design for Portable DVB-T2 Devices. Progress in Electromagnetics Research, vol. 79, 2019.
19. Ortega, Angel L., et al. Analysis of the Reception of DVB-T2 in Urban and Suburban Areas with Different Antenna Configurations. Journal of Broadcasting and Electronic Media, vol. 63, no. 2, 2019.
20. Saraf, Sandeep, et al. Field Strength and Modulation Error Ratio (MER) Measurement for DVB-T2 Antenna Optimization. IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 65, no. 4, 2019, pp. 356-364.
21. Aldrin, A. & Manish, P., "Design and Analysis of a Multi-turn Loop Antenna for DVB-T2 Reception," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, Vol. 25, Issue 7, pp. 957-971.
22. Fischer, J., "An Investigation of Planar Loop Antennas for DVB-T2 Reception," Progress in Electromagnetics Research Letters, 2010, Vol. 17, pp. 153-161.
23. Kaur, S., "Dual-band Antennas for DVB-T2 and LTE Applications," Microwave and Optical Technology Letters, 2015, Vol. 57, Issue 2, pp. 387-393.