

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)
бакалавра
(ступінь вищої освіти)

на тему АНТЕНА ДЛЯ РЕБ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи БК-211

Спеціальності _____

172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) _____

«Радіотехніка»

ПРОВАТОРОВ С.М.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник БУГРОВА Т.І.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інформаційної безпеки та електронних комунікацій
 Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти бакалавр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 Освітня програма (спеціалізація) «Радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри РТТ
 к.ф.-м.н., доц. Сергій САМОЙЛИК
 « » гчервня 2025 року



З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ПРОВАТОРОВА Станіслава Миколайовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Антенa для РЕБ колової поляризації

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент, БУГРОВА Т.І

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» квітня 2025 року № 189

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 червня 2025

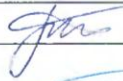
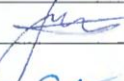


3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Спроекувати за допомогою системи автоматизованого проєктування 4пес2 турнікетну антену з екранами різної форми та розміру. Визначити характеристики спрямованості та параметри узгодження в діапазоні частот 1,3 – 1,4 ГГц

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд літератури та формування задач дослідження. Створення моделі антени. Результати чисельного аналізу. Результати проєктування. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Слайди презентації в Power Point

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	БУГРОВА Т.І., доцент кафедри РТТ		
нормо-контроль	МОРОЗ Г.В., ст. викладач кафедри РТТ		

7. Дата видачі завдання « 14 » квітня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

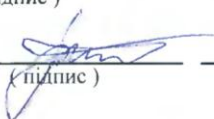
№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури та формування задач дослідження	1 тиждень	
2	Створення моделі антени і її аналіз	2 тижні	
3	Результати чисельного експерименту	2 тижні	
4	Оформлення пояснювальної записки та презентації	2 тижні	
5	Проходження нормконтролю, рецензування, антиплагіату	1 тиждень	

Студент


 (підпис)

 Станіслав ПРОВАТОРОВ
 (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)


 (підпис)

 Тетяна БУГРОВА
 (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до бакалаврської роботи: 47 с., 34 рис., 2 табл., 26 джерел.

ТУРНИКЕТНА АНТЕНА, ДРОН, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, ВІБРАТОР, ЕКРАН, ДІАГРАМА СМІТА.

Об'єктом дослідження є турнікетна антена для РЕБ.

Метою роботи є створення узгодженого антенного пристрою колової поляризації на основі турнікетної конструкції з ширококупольною діаграмою спрямованості.

Методи дослідження – методи електродинамічного 3D моделювання за допомогою системи автоматизованого проектування вільного доступу 4пес2 і методи моментів та кінцевих різниць.

Основні результати дослідження полягають у побудові різних конструкцій турнікетних антен та у дослідженні їх спрямованих властивостей та характеристик узгодження з лінією живлення в діапазоні частот.

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки	6
Вступ.....	7
1 Огляд літератури	10
1.1 Конструкції та призначення різновидів турнікетних антен	10
1.2 Спрямовані властивості турнікетних антен різних типів	13
1.3 Опис геометрії антени для дослідження та вибір засобів для цього	17
2 Створення та дослідження моделі турнікетної антени	18
2.1 Конструкція, розміри та живлення базової турнікетної антени з металевим екраном.....	18
2.2 Моделювання турнікетної антени в програмі 4nec2	21
2.3 Вплив форми екрану на спрямовані властивості турнікетних антен	24
3 Результати чисельних експериментів	27
3.1 Подвійний турнікет з круглим екраном.....	27
3.2 Одиночний турнікет з круглим екраном	34
3.3 Одиночний турнікет з прямокутним екраном.....	37
3.4 Порівняння турнікетних антен	42
Висновки	44
Перелік джерел посилань	46

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
ДС	–	діаграма спрямованості
ЕМХ	–	електромагнітна хвиля
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
КСД	–	коефіцієнт спрямованої дії
КСХ	–	коефіцієнт стоячої хвилі
РЕБ	–	радіоелектронна боротьба
ТА	–	турнікетна антена
4пес2	–	програма електродинамічного аналізу НВЧ пристроїв та антен

ВСТУП

FPV-дрони (від англ. First Person View) – це клас безпілотних літальних апаратів, які забезпечують пілотів реальне відео з борту дрона в режимі реального часу. Такі дрони активно застосовуються у спортивних змаганнях, а також у військовій сфері для розвідки, коригування вогню та атак. У будь-якому з цих сценаріїв критично важливим є надійний зв'язок між дроном і оператором, особливо коли дрон маневрує на великих відстанях або в складних умовах радіоелектронного середовища.

Одним із ключових елементів цієї системи є антена. FPV-дрони часто змінюють орієнтацію в просторі, тому антені доводиться працювати в умовах, коли напрямок на наземну станцію постійно змінюється. У таких умовах традиційні напрямні антени втрачають ефективність, і на перший план виходять всеспрямовані або майже всеспрямовані рішення.

З 2023 року спостерігається оснащення цим комплексом не тільки безпілотників, крилатих ракет, а й відносно дешевих керованих авіаційних бомб ФАБ-3000 та модулів керування для плануючих бомб (УМПБ, УМПК), які найбільше дошкуляють Силам Оборони на лінії бойового зіткнення і цивільному населенню та інфраструктурі населених пунктів у смузі 30-90 км від лінії фронту внаслідок їх надзвичайної руйнівної дії. Тому створення засобів РЕБ для здійснення невідворотних перешкод згаданому ворожому комплексу з метою втрати ним навігаційного сигналу є актуальною задачею.

Турнікетні антени (інша назва — вусаті або "бівейн" антени) є одним із найпоширеніших варіантів для FPV-дронів. Вони забезпечують кругову поляризацію сигналу, що дає змогу зменшити вплив перешкод, зокрема багатопроменевого поширення, і покращити стабільність прийому, навіть коли дрон нахилений або виконує фігури з великою зміною кута атаки. Завдяки малій вазі, компактності та простоті виготовлення, такі антени

широко застосовуються у бойових FPV-дронах, де на перший план виходить ефективність зв'язку в умовах бойових дій.

Розглянемо роль і переваги турнікетних антен в системах РЕБ. Окрім застосування на самих БПЛА, турнікетні антени також ефективно використовуються в системах радіоелектронної боротьби (РЕБ) для боротьби з ворожими дронами. У такому випадку антена є частиною передавального пристрою, який створює перешкоди в діапазоні частот управління або відеопередачі FPV-дронів (найчастіше 2.4 ГГц та 5.8 ГГц). Завдяки круговій діаграмі спрямованості та поляризації, турнікетна антена дозволяє більш рівномірно «засвічувати» простір навколо РЕБ-комплексу, не потребуючи точного наведення.

Це особливо актуально при протидії FPV-дронам-камікадзе, які швидко змінюють напрямок і висоту. Використання турнікетних антен у РЕБ дозволяє оперативно створювати зону придушення на небезпечних напрямках без складного механічного керування чи обертання антени. До того ж, кругова поляризація таких антен робить їх ефективними проти більшості FPV-дронів, які також використовують кругову або схожу поляризацію.

У цій роботі буде розглянуто принцип дії турнікетних антен, їх переваги в контексті FPV-дронів, а також застосування у системах протидії – зокрема в РЕБ, де важливим є не тільки прийом, а й ефективна передача сигналу для приглушення каналів зв'язку дрона. що використовуються паралельно на придушення сигналів різних типів. Це забезпечує їх гнучкість та ефективність у різних бойових умовах. В РЕБ проти дронів використовуються в основному такі типи антен, як всеспрямовані штирьові, конюшина, турнікети так і квадрифіляри.

При розробці систем зв'язку в наш час турнікетні антени завдяки їх можливостям, внаслідок колової поляризації, використовуються в галузі зв'язку, медицини та у військових цілях. Вони компактні, мало важать, і це

підвищує їх мобільність, що є беззаперечною перевагою для застосування їх в складі РЕБ.

У турнікетних антен низький рівень бічних та задньої пелюсток діаграми спрямованості (ДС).

Метою роботи є створення конструкції турнікетної антени та дослідження спрямованих властивостей, а також характеристик її узгодження в діапазоні 1,3-1,4 ГГц.

Наукова новизна полягає як в особливій конструкції самої антени, а також форми і розмірів екранів, так і в принципах побудови математичної моделі. Новими також є результати дослідження спрямованих властивостей і ступеню узгодження з лінією живлення на різних частотах для цих антен.

Практичною цінністю результатів дослідження є можливість досягнення основної мети – використання турнікетної антени в системах РЕБ проти ударних та розвідувальних дронів.

Турнікетні антени є нескладними, стійкими до пошкоджень та з невеликою вагою випромінювачами. Зручною властивістю цих антен є наступне: вони випромінюють над собою рівномірний в широкому просторовому куті купол, який ефективно глушить сигнали

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Конструкції та призначення різновидів турнікетних антен

Турнікетні антени (англ. *turnstile antennas*) – це тип слабоспрямованих антен, які складаються з двох взаємно перпендикулярних вібраторів (зазвичай півхвильових), збуджених у протифазі з різницею фаз 90° . Така конструкція дозволяє створити кругову поляризацію (в ідеалі – кругову, на практиці – еліптичну), що забезпечує стабільний прийом/передачу сигналів незалежно від орієнтації пристроїв у просторі.

Розрізняють кілька основних типів турнікетних антен, що відрізняються конструкцією, діаграмою спрямованості та сферою застосування [1-12].

1.1.1 Класичні турнікетні антени з горизонтальним монтажем

Конструкція – два перехресні диполі, розташовані горизонтально. Зазвичай монтуються над відбивачем.

Поляризація – кругова (в напрямку вниз або вгору, залежно від конфігурації).

Призначення – використовуються у наземних станціях або РЕБ для створення зони всеспрямованого покриття. Ефективні для одночасного зв'язку з кількома рухомими об'єктами.

1.1.2 Вусаті (Bi-Quad або Biquad Cloverleaf) антени для FPV

Конструкція – провідники, вигнуті у форму пелюстків або "вусів", розташовані під кутом до основи. Часто мають 3 або 4 "вуса" (лопаті).

Поляризація – право – або лівополяризована кругова (RHCP або LHCP).

Призначення – основний варіант для FPV-дронів. Забезпечують стабільний відеозв'язок навіть при активному маневруванні. Компактні, легкі, мають стійкість до відбитих сигналів [13].

1.1.3 Турнікетні антени з вертикальним диполем

Конструкція – один вертикальний вібратор і один горизонтальний, збуджені зі зсувом фази.

Поляризація – еліптична, часто змішана.

Призначення – використовуються для специфічних задач, де потрібно покрити простір з різними напрямками хвиль. Іноді застосовуються у транспортних рішеннях або дронах з нестандартною формою фюзеляжу [14].

1.1.4 Турнікетні антени з відбивачем (Ground-plane Turnstile)

Конструкція – перехресні вібратори над металевою пластиною (відбивачем).

Поляризація – кругова, спрямована в один бік (найчастіше вниз).

Призначення – наземні станції, базові РЕБ-платформи. Добре підходить для створення куполоподібного покриття над антенним блоком.

1.1.5 Внутрішні турнікетні антени (Embedded Turnstile)

Конструкція – мініатюризовані версії класичних турнікетів, інтегровані в корпус пристрою.

Поляризація – еліптична або кругова.

Призначення – застосовуються у компактних дронах, GPS-обладнанні, засобах зв'язку, де розміри критично обмежені. В табл. 1.1 зведено основні властивості турнікетних антен [15].

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика турнікетних антен

Тип антени	Поляризація	Спрямованість	Використання	Особливості
1	2	3	4	5
Класичний турнікет	Кругова	Вгору/вниз	Наземні РЕБ, ретрансляція	Проста, ефективна, громіздка
Cloverleaf / Вусата	RHCP/LHCP	Всеспрямована	FPV-дрони	Легка, стійка до багатопромінності
З вертикальним диполем	Еліптична	Нерівномірна	Спеціальні задачі	Складніша конструкція
Турнікет з відбивачем	Кругова	В одну півсферу	РЕБ, базові станції	Посилене випромінення в один бік
Вбудована турнікетна антена	Еліптична	Обмежена	GPS, дрони малого класу	Дуже компактна, низький коефіцієнт ККД

Конструкції деяких з розглянутих вище основних різновидів турнікетних антен показано на рисунках 1.1 – 1.4 [16].

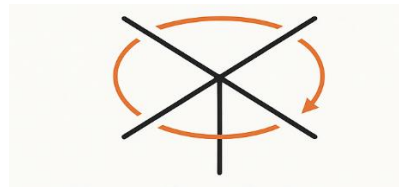


Рисунок 1.1 – Класичний турнікет

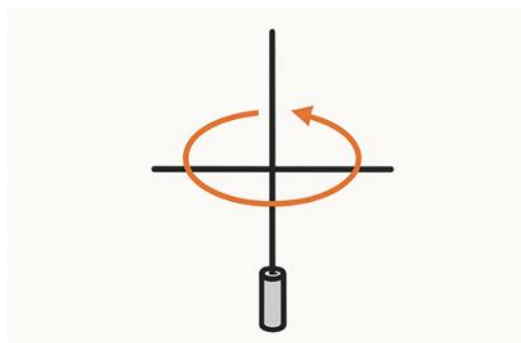


Рисунок 1.2 – Турнікет на основі вертикально поляризованого диполю

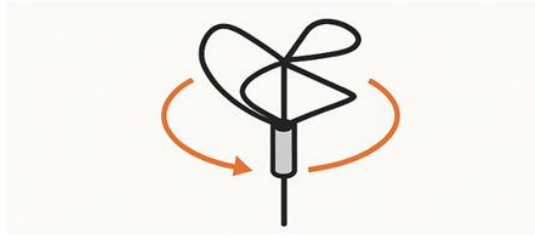


Рисунок 1.3 – Антена конюшина

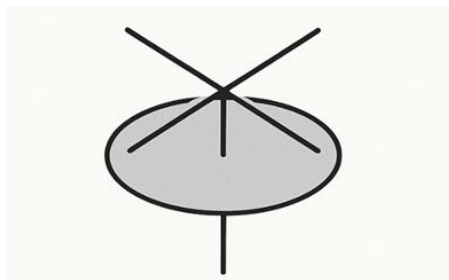


Рисунок 1.4 –Турнікет з заземленим екраном

1.2 Спрямовані властивості турнікетних антен різних типів

Діаграма спрямованості класичного одиночного турнікету без екрану є двоспрямованою і зображена на рисунку 1.5.

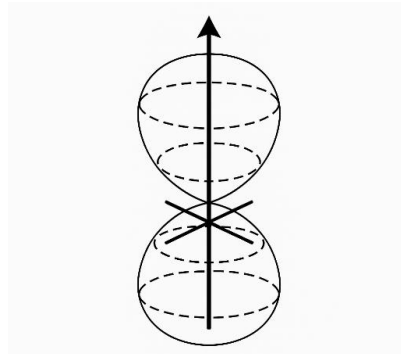


Рисунок 1.5 – ДС класичного турнікету

Турнікетна антена, яка складається з двох напівхвильових диполів, розташованих під прямим кутом один до одного, причому струми в диполях мають однакову величину та зсунуті по фазі на 90° , випромінює в осьовому режимі (рис. 1.6). Антена підтримується щоглою (так званим балуном). Діаграма спрямованості є всеспрямованою з нулем вздовж осі X. Для подальшого покращення форми діаграми спрямованості в горизонтальній додаткові елементи розміщуються у вертикальній площині; за допомогою цього типу антени можна розширити смугу пропускання, покращити коефіцієнт підсилення та контролювати тип поляризації; крім того, вона легка в установці та налагодженні. На рисунку 1.6 зображено її діаграму спрямованості. Синя крива – ліва поляризація, червона – права оберտальна поляризація [17].

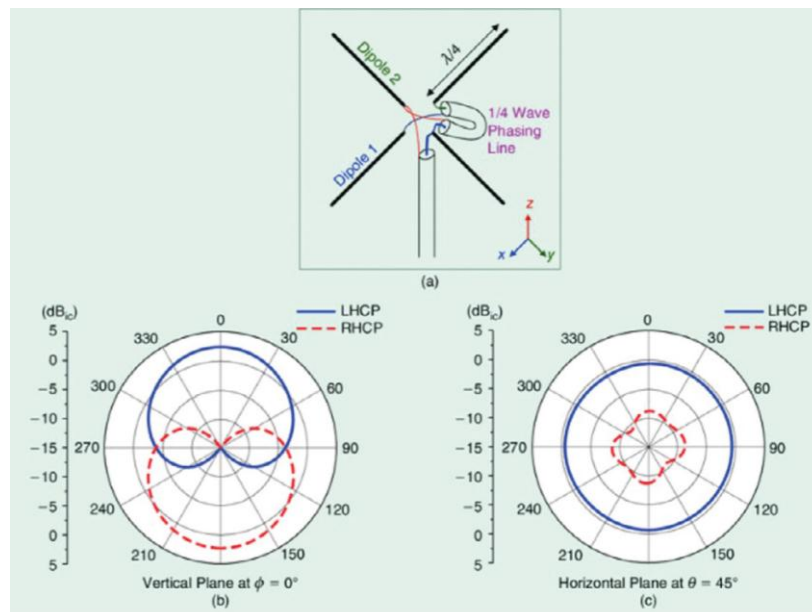


Рисунок 1.6 – ДС турнікету на основі вертикально поляризованого диполю

Подвійна хрестова антена складається з двох наборів диполів півхвильової довжини, розташованих під прямим кутом один до одного.

Всенаправлена діаграма спрямованості, яку можна побачити на рисунку 9, має характеристики кругово-симетричного випромінювання (майже ізотропного: 0 дБі підтримується майже у всіх напрямках у всьому тривимірному просторі) та з більшою горизонтальною спрямованістю. Така поведінка пояснюється тим, що два диполі кожного хреста виконують всенаправлену діаграму спрямованості в горизонтальній площині; тоді як набір двох хрестів призводить до діаграми спрямованості, розширеної до вертикальної площини, через їх розділення на чверть довжини хвилі. Польові випробування цієї антени показують, що вона створює дуже незначне занулення діаграми спрямованості в межах півсфери.

На рисунку 1.7 показана ДС подвійного турнікету.

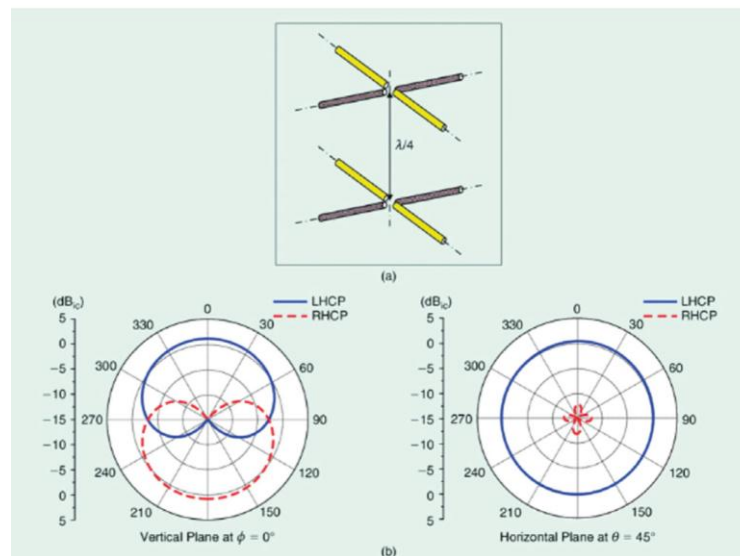


Рисунок 1.7 – ДС антени у вигляді подвійного турнікету

Антенна Моксона складається з двох квадратів, схрещених під прямим кутом та електрично фазованих на 90° для отримання кругової поляризації. Ця антена відрізняється від турнікета формою пелюстки випромінювання; загалом, показано, що для кутів місця від 90° до 70° турнікет перевершує Моксона, між 70° та 40° вони працюють аналогічно, а для кутів місця менше

40° антена Моксона перевершує турнікет. Конструкція одного квадрату зображена на рисунку 1.8, а діаграму спрямованості антени Моксона можна побачити на рисунку 1.9 [19-21].

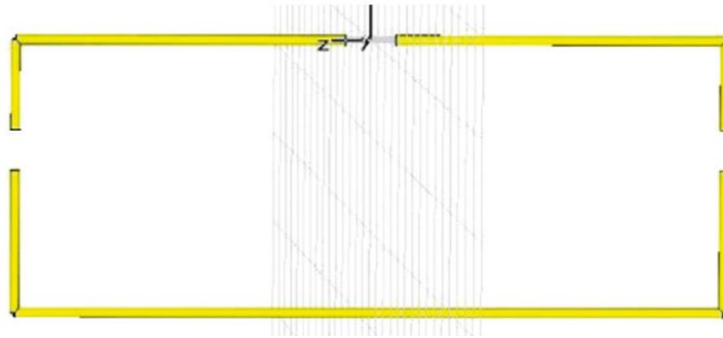


Рисунок 1.8 – Конструкція одного прямокутника антени Моксона

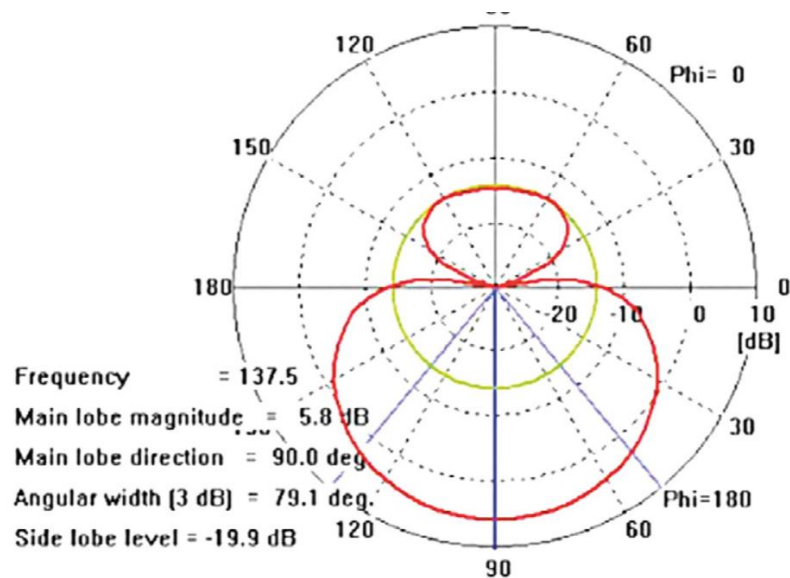


Рисунок 1.9 – ДС антени Моксона

Антенa Моксона набагато спрямованіша, ніж турнікет.

1.3 Опис геометрії антени для дослідження та вибір засобів для цього

Згідно ТЗ необхідно спроектувати та дослідити основні параметри та характеристики турнікетної антени в якості навантаження шумового генератора, що створює перешкоди для ударних ворожих дронів. Розглянемо частоти навколо $1,4 \text{ ГГц} \pm 10\%$. Для електродинамічного 3D моделювання спробуємо застосувати вільне програмне забезпечення 4nes2, що є зручним інструментом аналізу для будь-яких антен на основі дротів зі струмом. Розрахунок ЕМП здійснюється інтегральними методами. Це дає перевагу ду визначенні характеристик поверхневих струмів по складних конструкціях, подібних до турнікетних антен.

Дослідження квадрифілярних антен включає вивчення впливу конструкції живлення спіралей, розмірів та розташування металевого екрану та додаткової пластини із поглинального матеріалу і вплив цих елементів на спрямовані властивості антен та на ступінь їх узгодження із лінією живлення через оцінку величини КСХ та коефіцієнта відбиття в зазначеному вище діапазоні.

На рисунку 1.10 зображено базову конструкцію турнікетної антени, яку ми будемо в подальшому моделювати в даній роботі.

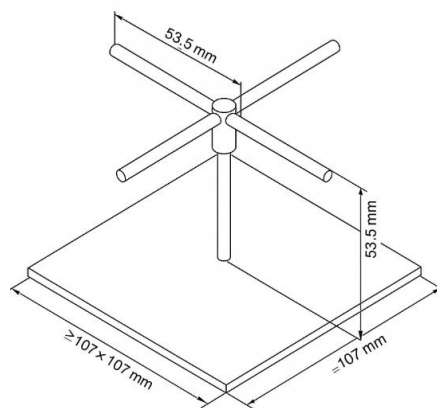


Рисунок 1.10 – Турнікетна антена для дослідження

2 СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТУРНИКЕТНОЇ АНТЕНИ

2.1 Конструкція, розміри та живлення базової турнікетної антени з металевим екраном

Розрахуємо основну геометрію турнікета з екраном (рис.1.10) на частоті 1,4 ГГц. Турнікетна антена (Turnstile Antenna) складається з двох ортогональних диполів з фазовим зсувом 90° між ними, що створює кругову поляризацію [22].

Довжина хвилі (λ):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1.4 \times 10^9} = 0.214 \text{ м (214 мм)}$$

Основні розміри турнікетної антени зведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Розміри турнікетної антени з металевим екраном

Параметр	Розмір
Довжина плеча диполя (L)	$\lambda/4 = 53.5 \text{ мм}$
Відстань між диполями	$\approx 3\text{-}5 \text{ мм}$ (ізолятори)
Діаметр провідника	1-3 мм (залежно від конструкції)
Розмір рефлектора (екрана)	$\geq 0.5\lambda \times 0.5\lambda = 107 \times 107 \text{ мм}$
Відстань до рефлектора (h)	$\approx \lambda/4 = 53.5 \text{ мм}$

Далі опишемо особливості конструкції. Живлення – кожен диполь зсувається за фазою на 90° для забезпечення кругової поляризації.

Екран покращує напрямленість та зменшує заднє випромінювання.

Матеріали – будемо використовувати алюміній або мідь для провідників та тефлонові ізолятори як такі, що найменше вносять дисипативні втрати в конструкцію антени. Цю модель показано на рис.2.2, причому екран виконано у вигляді дротової мілкокоміркової сітки. Модель побудовано в середовищі 4пес2. Сторона комірки дорівнює 1/16 довжини хвилі. На рисунку 2.1 також побудовано тривимірну ДС антени з прив'язкою до орієнтації цієї антени в просторі.

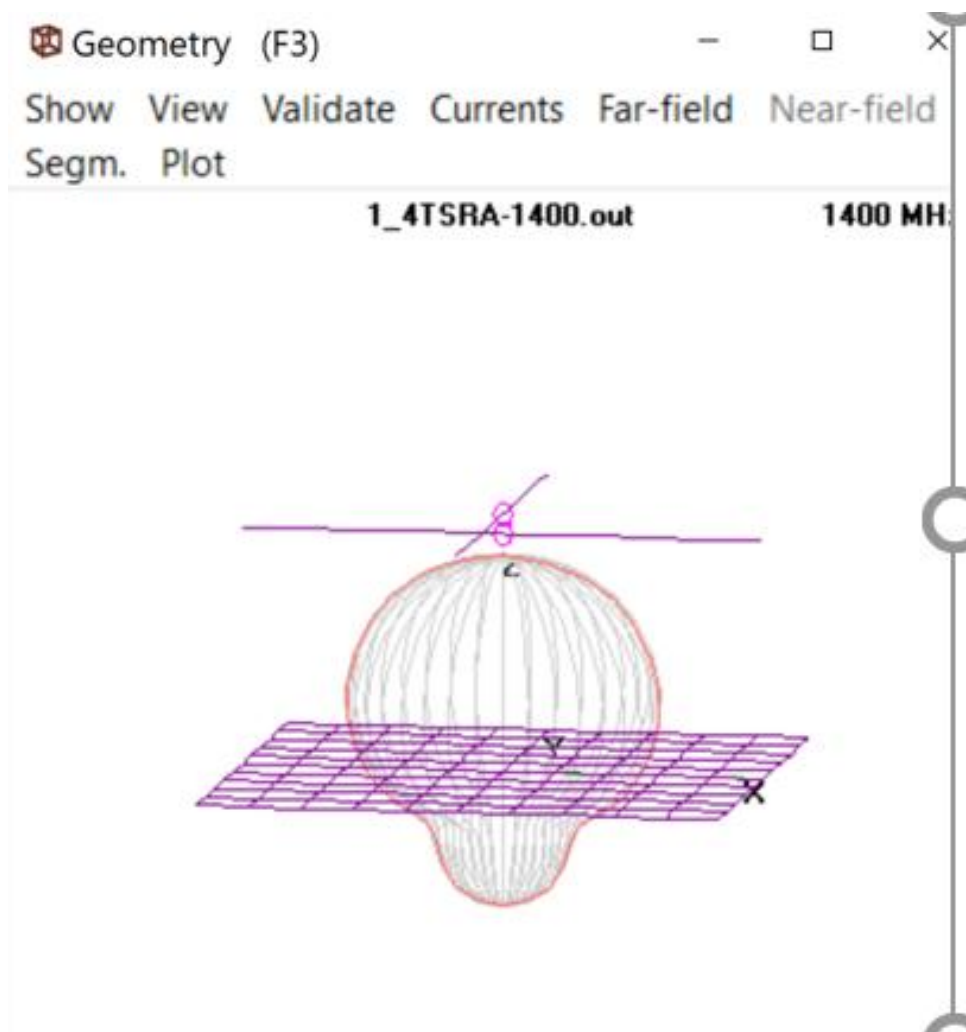


Рисунок 2.1 – Моделювання турнікетної антени з квадратним екраном в середовищі 4пес2

На рисунку 2.2 показано модель турнікетної антени типу «кажан».

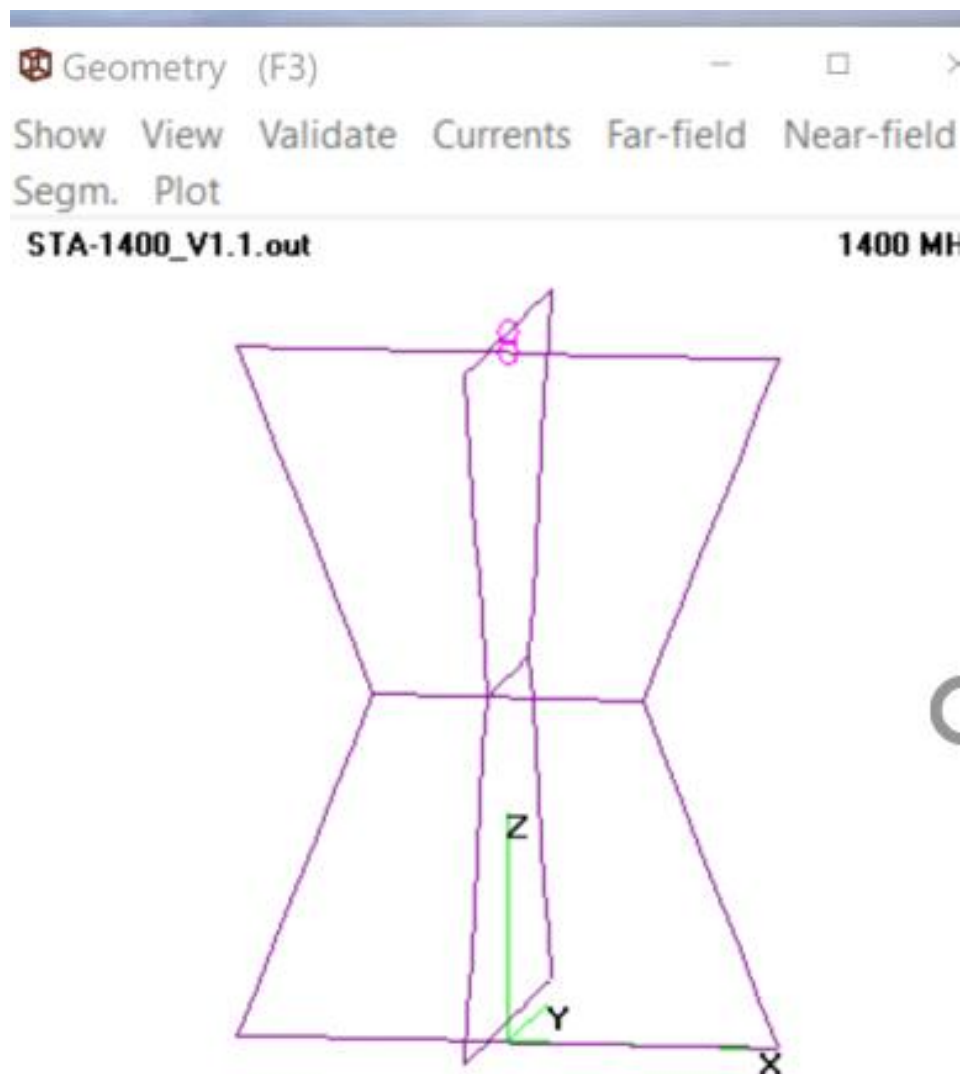


Рисунок 2.2 – Головний екран програми 4nec2 для турнікетної антени типу «кажан»

Турнікетна антена з екраном має напівсферичну ДС, випромінює кругову поляризацію (з малим коефіцієнтом еліптичності $< 1,5\text{дБ}$ в межах просторового кута у 115°), і ширині робочої смуги близько 3–4%, при цьому вона має підсилення в межах 5 dBi.

2.2 Моделювання турнікетної антени в програмі 4пес2

З 2022 року ворог використовує комплекс «Комета», який є великою проблемою для вітчизняних засобів РЕБ. Комплекс включає антену з контрольованою спрямованістю прийому (CRPA), навігаційний приймач сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) у L-діапазоні і встановлюється на ударні (Shahed-136, Герань-2), розвідувальні дрони (Орлан-10, Орлан-30, Грифон-41 для нанесення ударів по території України в зоні активних радіоперешкод від власних та українських засобів РЕБ. Стійкість комплексу до перешкод J/S надзвичайно велика і дорівнює 90 дБ, а відтак, великою є і захищеність навігаційної супутникової системи носіїв.

З 2023 року спостерігається оснащення цим комплексом не тільки безпілотників, крилатих ракет, а й відносно дешевих керованих авіаційних бомб ФАБ-3000 та модулів керування для плануючих бомб (УМПБ, УМПК), які найбільше дошкуляють Силам Оборони на лінії бойового зіткнення і цивільному населенню та інфраструктурі населених пунктів у смузі 30-90 км від лінії фронту внаслідок їх надзвичайної руйнівної дії. Тому створення засобів РЕБ для здійснення невідворотних перешкод згаданому ворожому комплексу з метою втрати ним навігаційного сигналу є актуальною задачею. В галузі антенних систем одним із можливих технічних рішень є застосування турнікетних антен (рис.1) в складі розподіленого в просторі комплексу РЕБ. Ключовим моментом їх успішного застосування є якомога більша кількість комплексів РЕБ.

На рисунках 2.4 – 2.7 показано конструкцію і розміри антени «кажан» разом із її 3D і 2D діаграмами спрямованості на частоті 1,4 ГГц, отриманими в програмі симулювання антен 4пес2. З рис. 2.6, 2.7 видно, що антена добре справляється зі своєю основною задачею створення потужної перешкоди в широкому секторі просторових кутів [22-26].

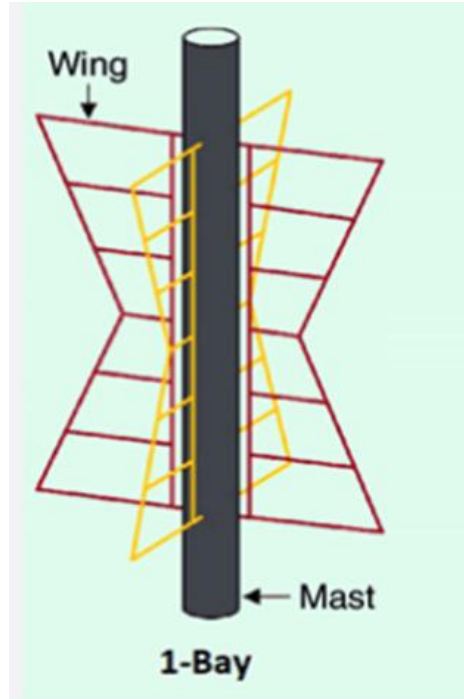


Рисунок 2.4 – Конструкція антени типу супер-«кажан»

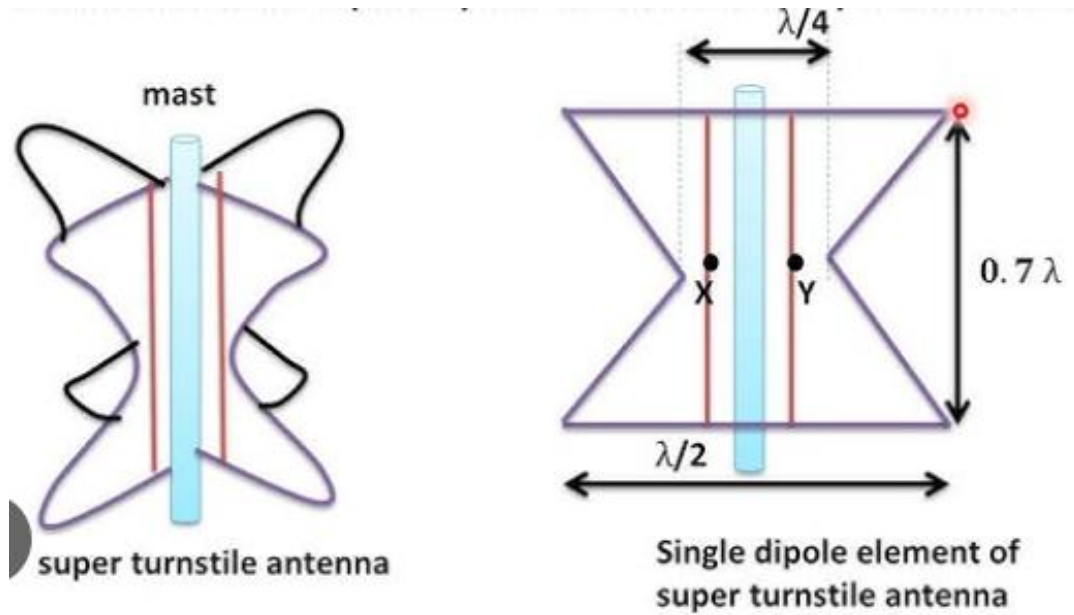


Рисунок 2.5 – Розміри турнікетної антени супер-кажан

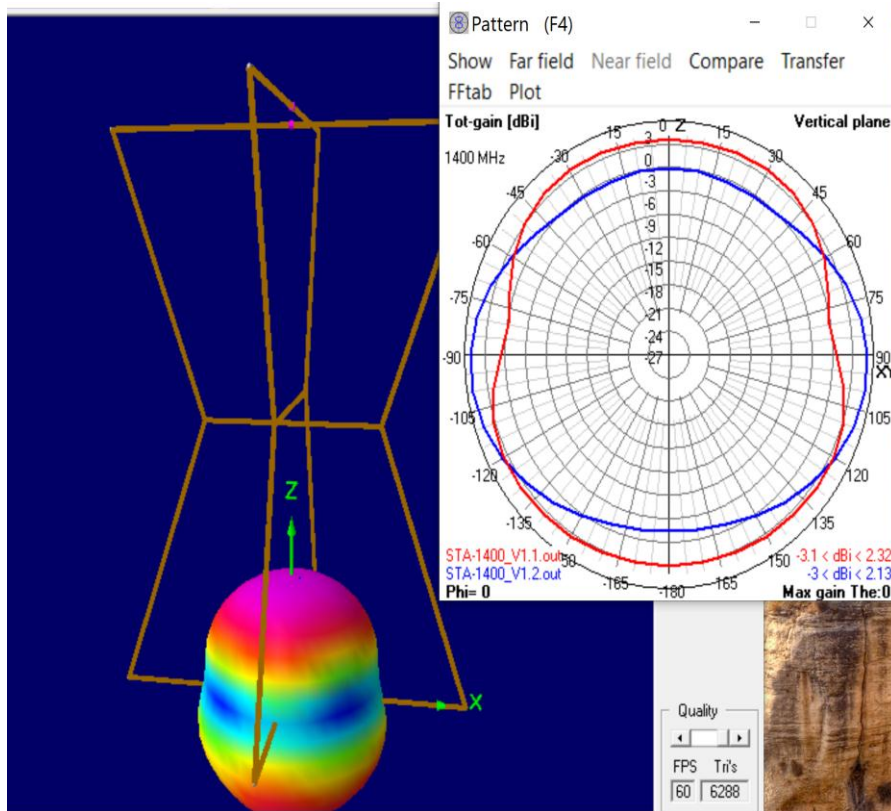


Рисунок 2.6 – ДС турнікетної антени супер-кажан в середовищі 4nec2

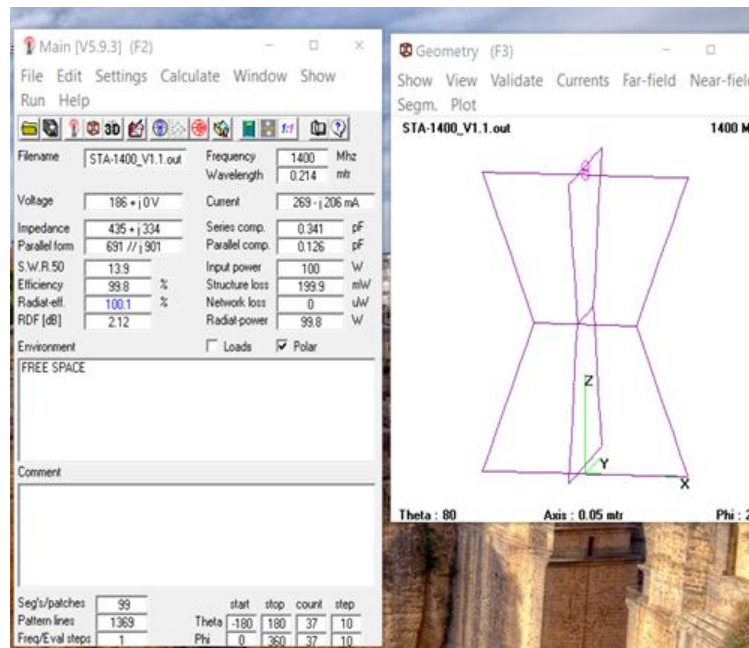


Рисунок 2.7 – Моделювання турнікетної антени супер-кажан в середовищі 4nec2

2.3 Вплив форми екрану на спрямовані властивості турнікетних антен

В середовищі 4nes2 було створено декілька варіантів інших турнікетних антен. Результат моделювання одного з різновидів хрестоподібного турнікету з екраном на частоті 1,4 ГГц ми бачимо на рисунку 2.8, 2.9. Антена споряджена металевим екраном на відстані у чверть довжини хвилі від турнікету для забезпечення перевипромінення потужності у бік цілі. Розглядалися екрани двох форм - квадратної та округлої. На рисунку 2.8 наведено порівняння діаграм спрямованості у вертикальному перерізі антен з квадратним (червона крива) та округлим (синя крива) екранами. Очевидно, що квадратний екран ефективніше відбиває випромінення в бік цілі.

Таким чином, встановлено, що турнікет з квадратним екраном має більшу ефективність спрямованого випромінювання у вигляді 6,95 dBi підсилення, тоді як підсилення турнікету з круглим екраном дорівнює 6,87 dBi, а у антени типу «кажан» цей показник не підіймається вище 2,32 dBi.

Водночас, надзвичайно велику роль в будь-яких антенах відіграє ступінь узгодження їх із системою живлення. У випадку турнікетів до задачі їх імпедансного узгодження додається ще проблема взаємного фазування елементів турнікету.

Справа в тім, що, по-перше, лінія живлення є несиметричним типом прямої системи, а кожен з ортогональних один до одного у просторі випромінюючих елементів потребує симетричного живлення.

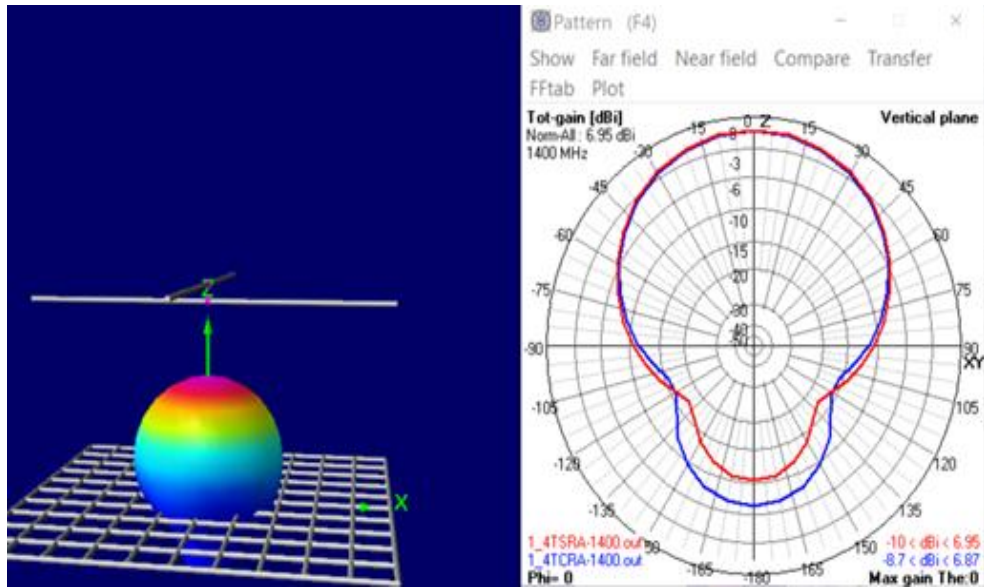


Рисунок 2.8 – Порівняння діаграм спрямованості у вертикальному перерізі антен з квадратним (червона крива) та округлим (синя крива) екранами

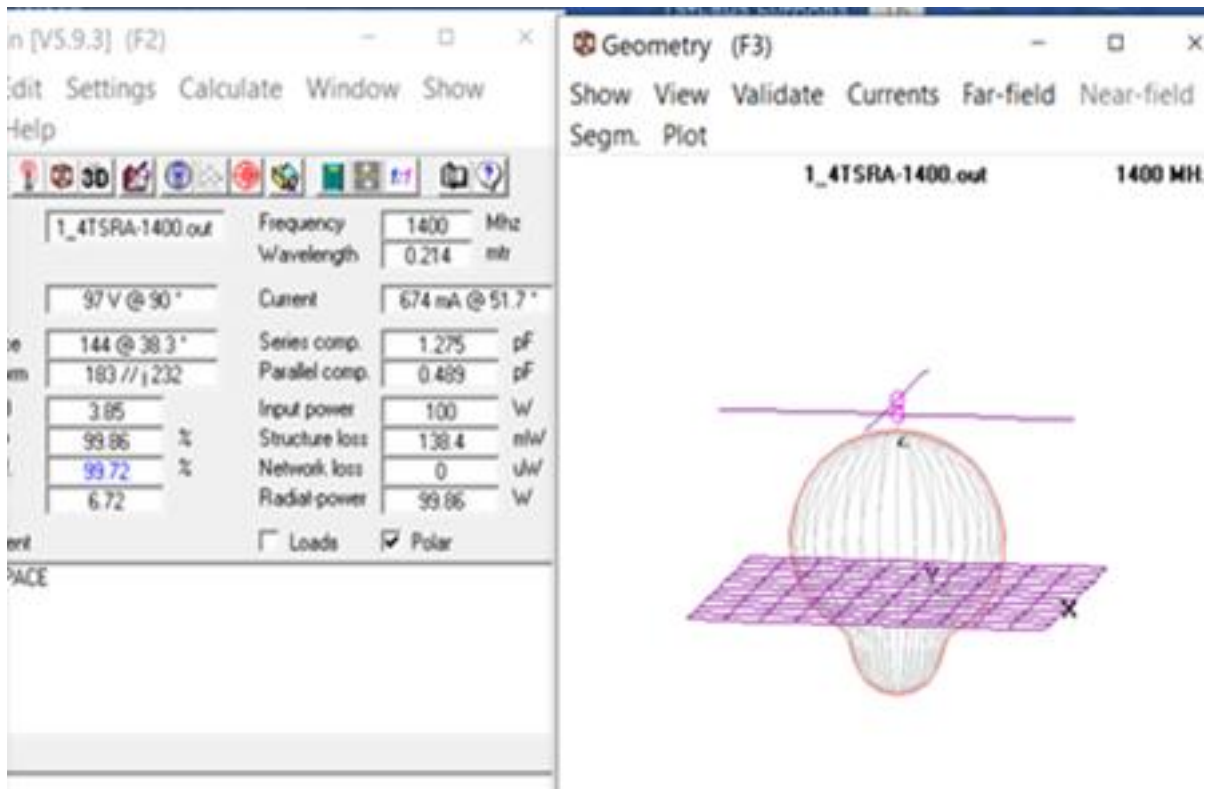


Рисунок 2.9 – Турнікет з квадратним екраном

По-друге, для створення поля випромінення колової поляризації між першим і другим вібраторами треба забезпечити фазовий зсув між джерелами живлення у 90° . На одній частоті виконання цих умов не є проблемою. А от із розширенням діапазону робочих частот фазове та амплітудне узгодження всає на повний зріст майже як невіршувана проблема, що обмежує 5% смугу робочих частот цього типу антен, як і, власне, бiьшості різновидів дротових антен.

Аналіз ДС та коефіцієнта еліптичності здійснювалося в середині діапазону, на частоті 1,4 ГГц. Коефіцієнт відбиття трохи спадав по мірі збільшення відстані між турнікетом та екраном, а смуга пропускання, визначена по критерію виходу коефіцієнта відбиття за межі вище -10 дБ, звужується на 3–6% зі зростанням відстані між турнікетом та екраном від $\lambda/8$ до $\lambda/4$. Максимальне значення коефіцієнту підсилення сягає величини 5,1 дБі і наступає при віддаленні турнікету від екрану на $\lambda/4$, що досить очікувано, оскільки поле турнікету та екрану синфазно інтерферують між собою.

В межах просторового кута від 80 до 110 градусів коефіцієнт еліптичності, який відповідає за поляризаційні втрати потужності, є меншеим за -3 дБ, що цілком прийнятно для цього типу антен.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Подвійний турнікет з круглим екраном

Здійснимо дослідження конструкції турнікетної антени, показаної на рисунку 3.1. Її відмінність від класичного турнікету полягає в наявності другого турнікету та металевого сітчастого екрану круглої форми. Будемо досліджувати спрямовані властивості на узгодження за допомогою діаграми Сміта.

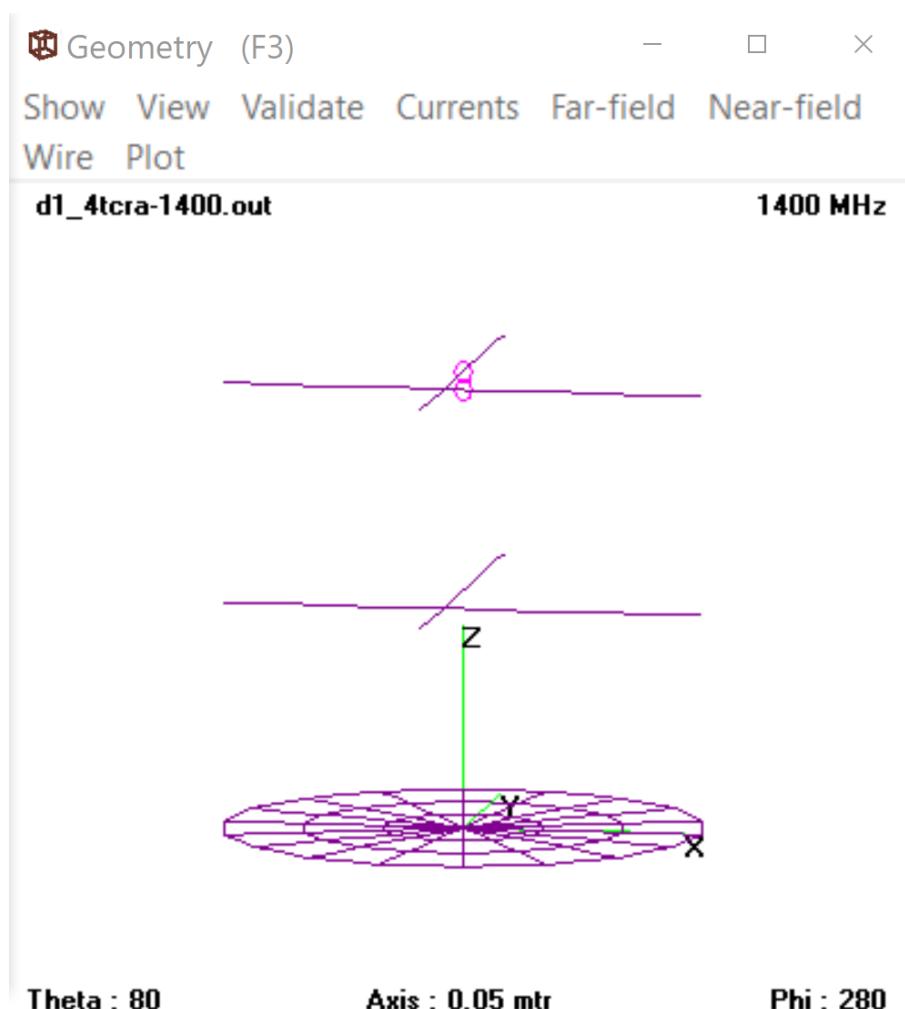


Рисунок 3.1 – Геометрія подвійного турнікету з круглим екраном

Далі, на рисунку 3.2, зображено діаграму Сміта, з якої випливає, що створена конструкція антени має великий потенціал для покращення характеристик узгодження. Справа в тому, що необхідно максимально наблизити вхідний опір антени до хвильового опору коаксіальної лінії живлення 50 Ом, змінізувавши по можливості при цьому реактивну частину вхідного опору антени. Індикатором узгодження є значення коефіцієнта відбиття поблизу нуля і відповідно КСХ якомога ближчі до одиниці. Це означає високу ефективність перетворення потужності передавача у випромінюване в навколишній простір поле, що важливо для застосування антени в таких пристроях, як РЕБ. Ефективна антена підвищує дальність дії РЕБ.

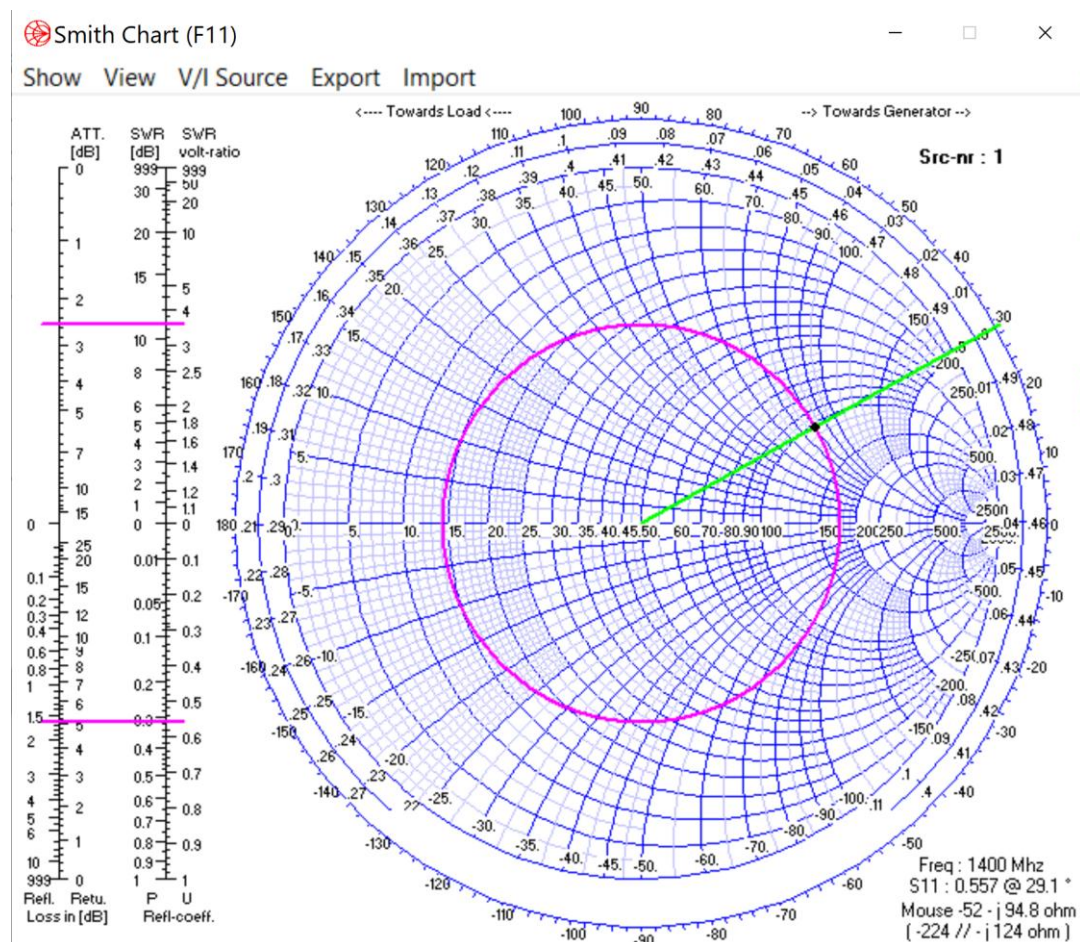


Рисунок 3.2 – Діаграма Сміта подвійного турнікету з круглим екраном

З рисунку 3.3 добре видно, що коефіцієнт підсилення такої антени на частоті 1,4 ГГц дорівнює 5,31 dBi, тобто, є доволі великим. При цьому ширина ДС по половинній потужності дорівнює 120 градусів, тобто, антена має потрібну для РЕБ купольну форму діаграми спрямованості.

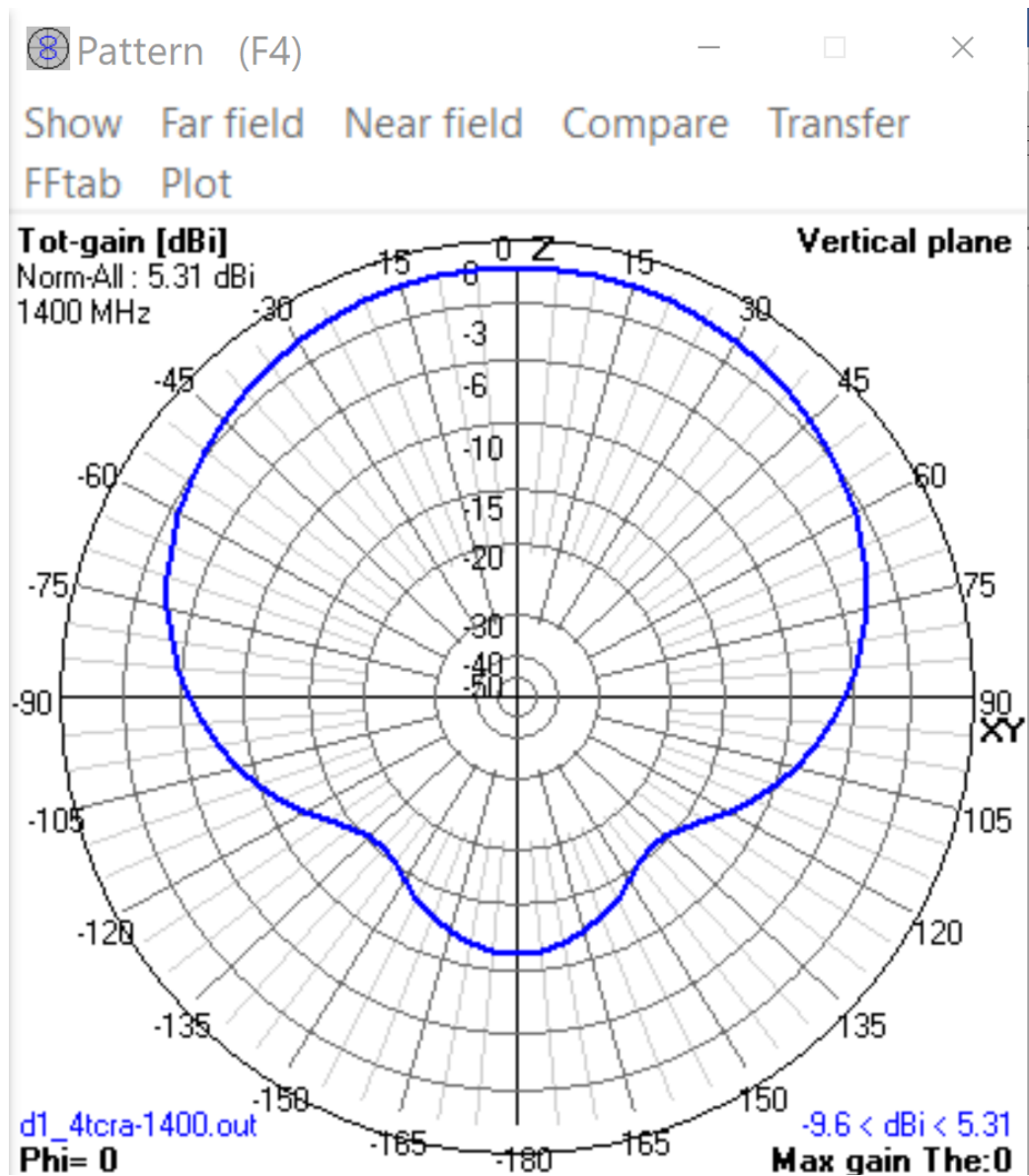


Рисунок 3.3 – Діаграма спрямованості подвійного турнікету з круглим екраном на частоті 1,4 ГГц

На рисунку 3.4 зображено головний екран програми 4nec2 цієї антени з усіма налаштуваннями для розрахунку характеристик спрямованості та параметрів узгодження з лінією живлення.

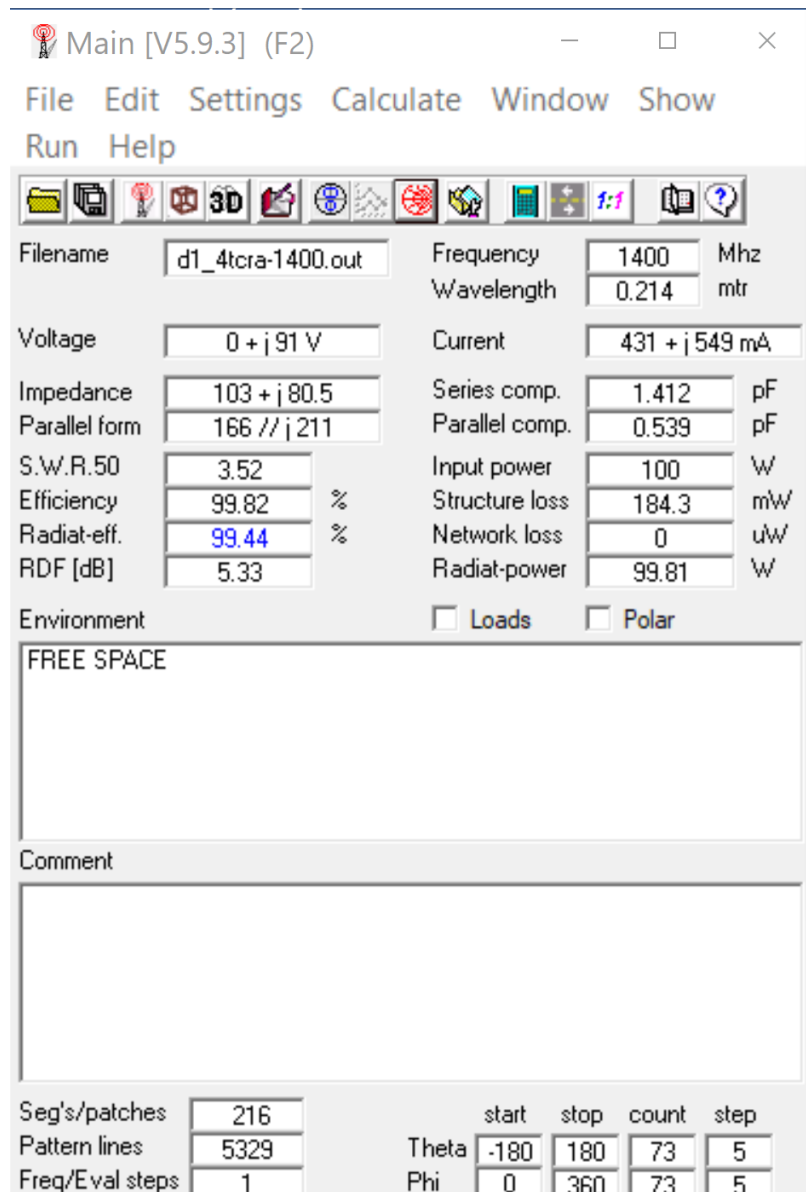


Рисунок 3.4 – Головний екран програми 4nec2 подвійного турнікету з круглим екраном з усіма налаштуваннями

Рисунок 3.5 надає уявлення про зовнішній вигляд досліджуваної антени в прив'язці до системи координат.

Як видно з рисунку 3.6, програма симулювання 4пес2 надає можливості покращити узгодження, увімкнувши між лінією живлення та входом антени узгоджувальний пасивний RLC пристрій Г-, П- та Т- типу з вибраними параметрами, які з'ясовуються з діаграми Сміта (рис. 3.2) згідно загальних правил узгодження шляхом компенсації реактивної складової вхідного опору антени.

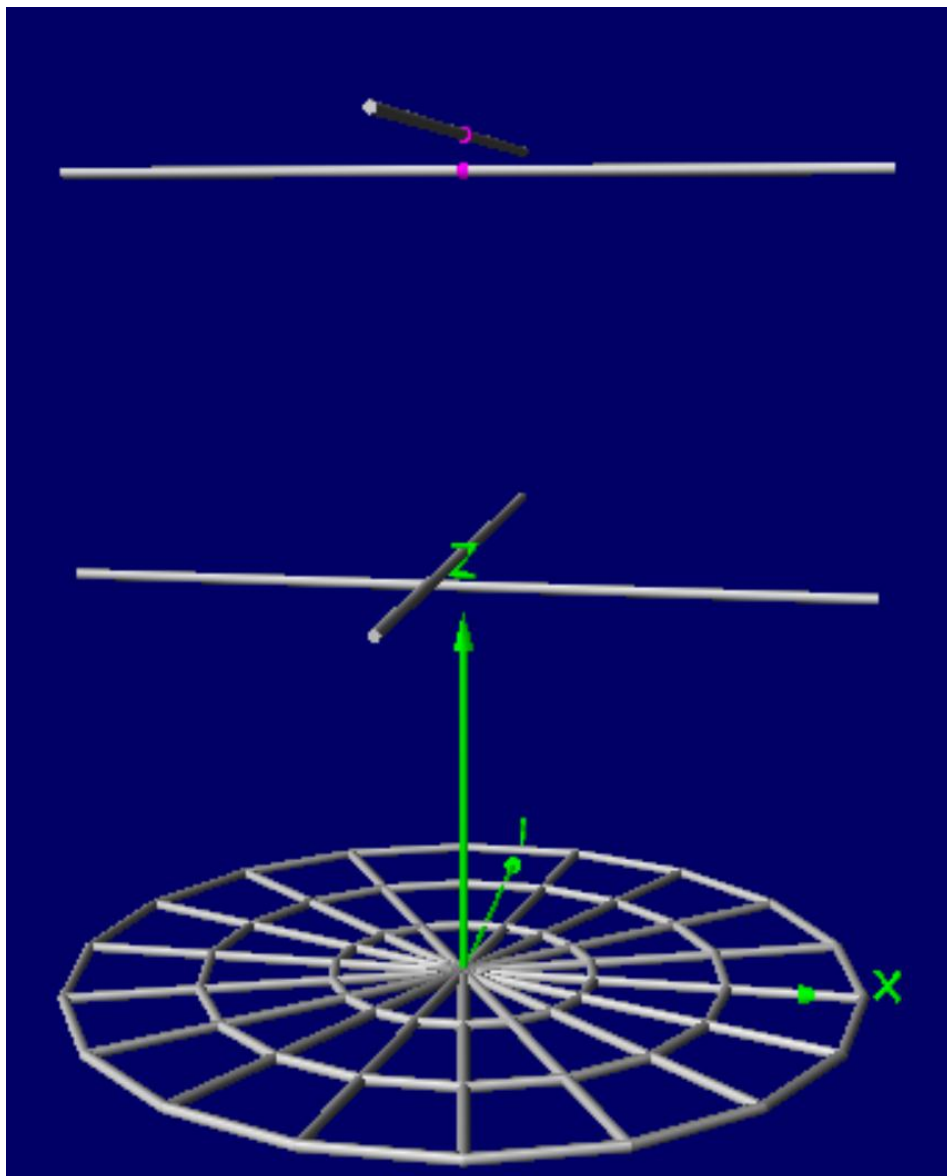


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд досліджуваної антени в прив'язці до системи координат

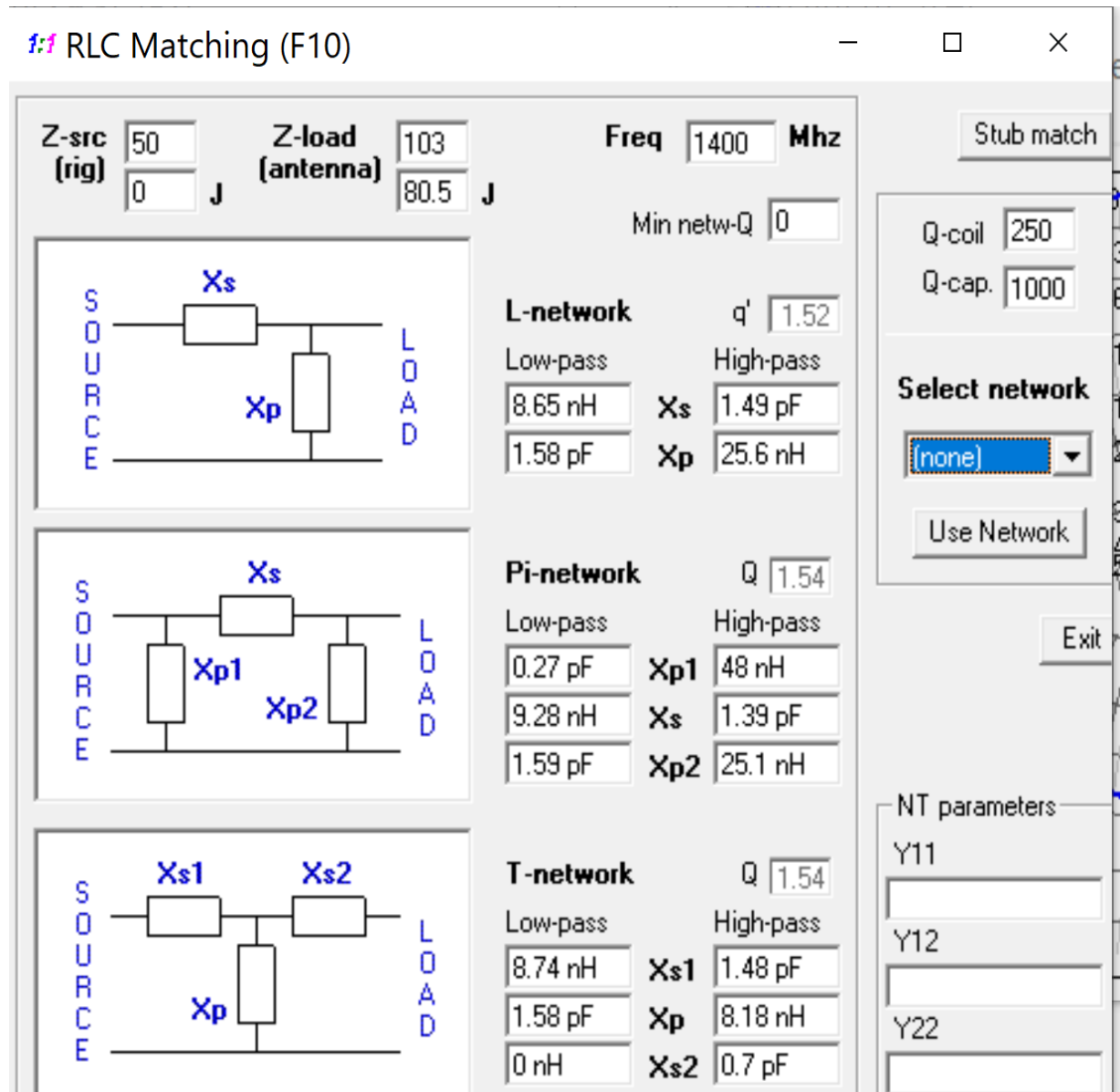


Рисунок 3.6 – RLC узгодження імпедансу антени

Для порівняння нижче надано характеристики класичної турнікетної хрестоподібної антени (рис. 3.7, 3.8).

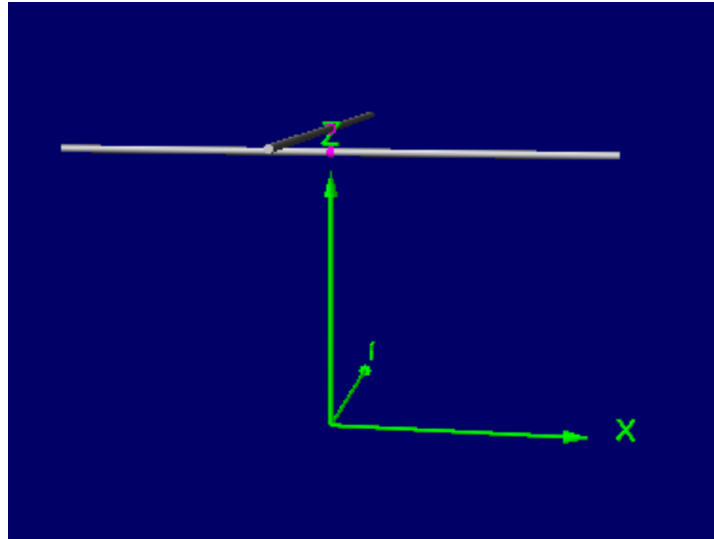


Рисунок 3.7 – Геометрія хрестоподібної антени

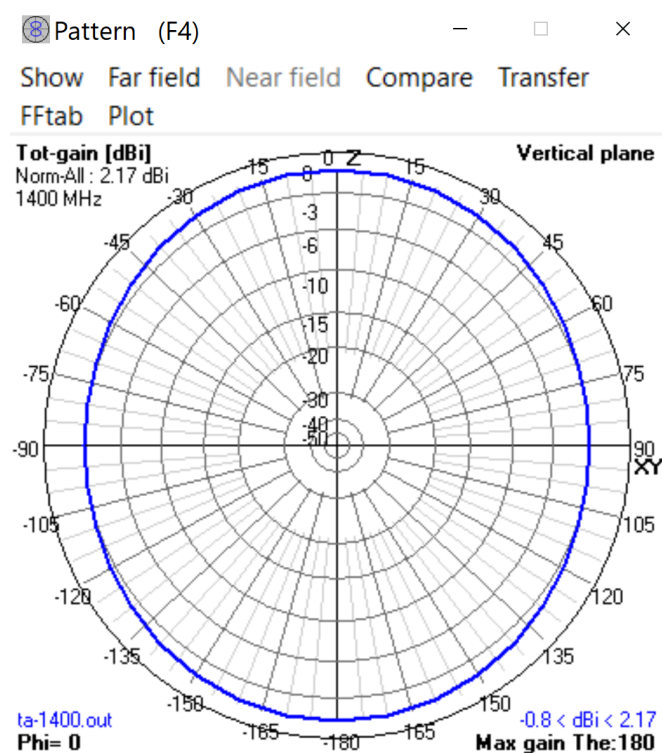


Рисунок 3.8 – Діаграма спрямованості на частоті 1,4 ГГц

Як видно з рисунку 3.8, хрестоподібна антена має двоспрямовану ДС, що не підходить для застосування в РЕБ. Це – наслідок відсутності

відбиваючого екрану в конструкції. Проте, випромінюване поле все ж таки має потрібну колову поляризацію. Коефіцієнт підсилення цієї антени на частоті 1,4 ГГц відповідно невеликий і дорівнює 2,17 dBi.

3.2 Одиночний турнікет з круглим екраном

Розглянемо рисунок 3.9, на якому зображено зовнішній вигляд 3D конструкції турнікетної антени з круглим екраном.

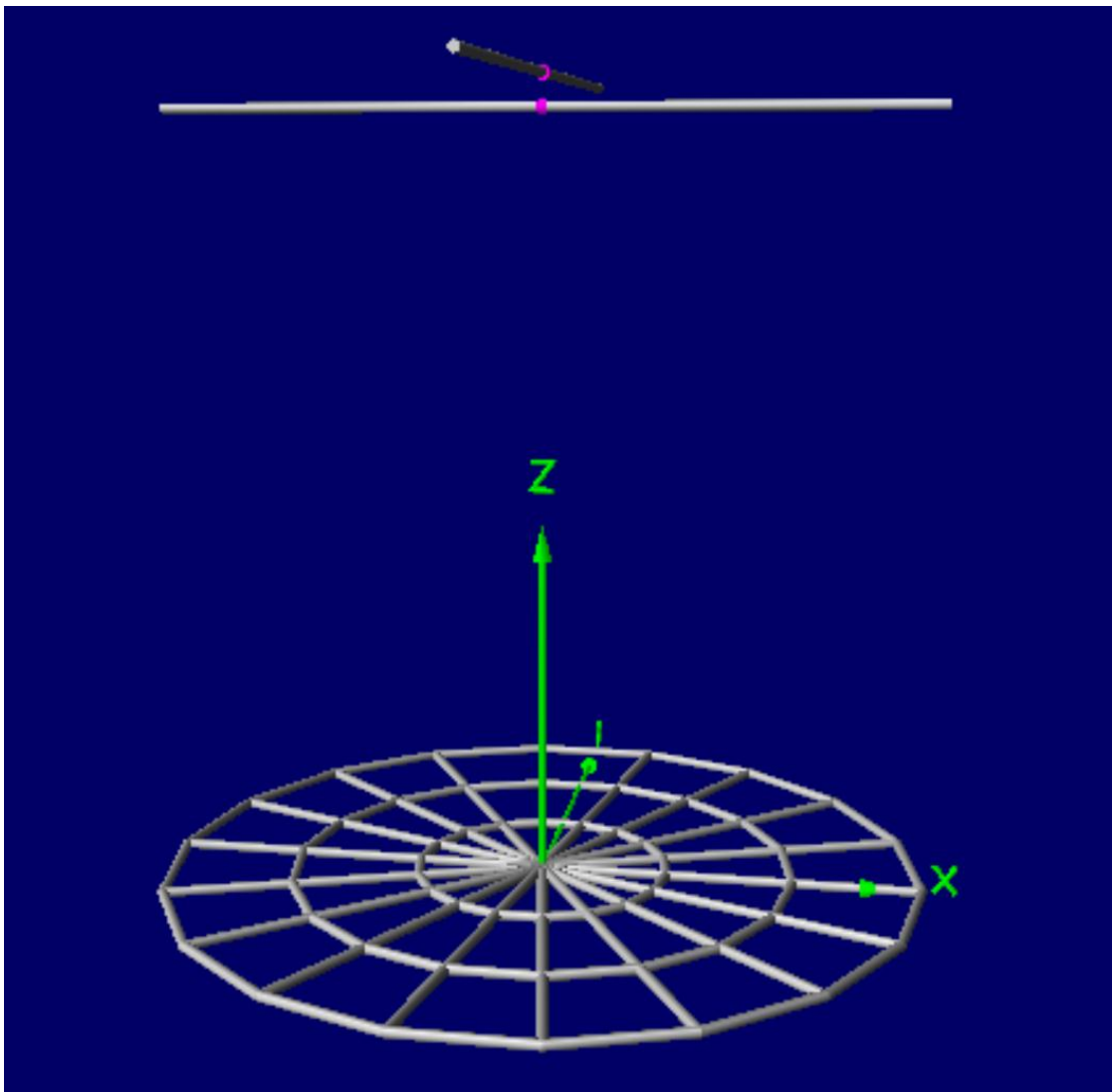


Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд 3D конструкції оди нарної турнікетної антени з круглим екраном

Розглянемо ДС турнікетної антени з круглим екраном на частоті 1,4 ГГц (рис. 3.10).

З нього видно, що антена має потрібну для застосування в РЕБ купольну форму ДС, з шириною близько 180 градусів та коефіцієнтом підсилення порядку 2.53 dBi. Антена випромінює поле колової поляризації, як це і потрібно для згаданого вище застосування.

Що ж стосується ступеню узгодження з лінією живлення, то уявлення про це дає рисунок 3.11, на якому зображено частотні залежності коефіцієнтів стоячої хвилі та відбиття.

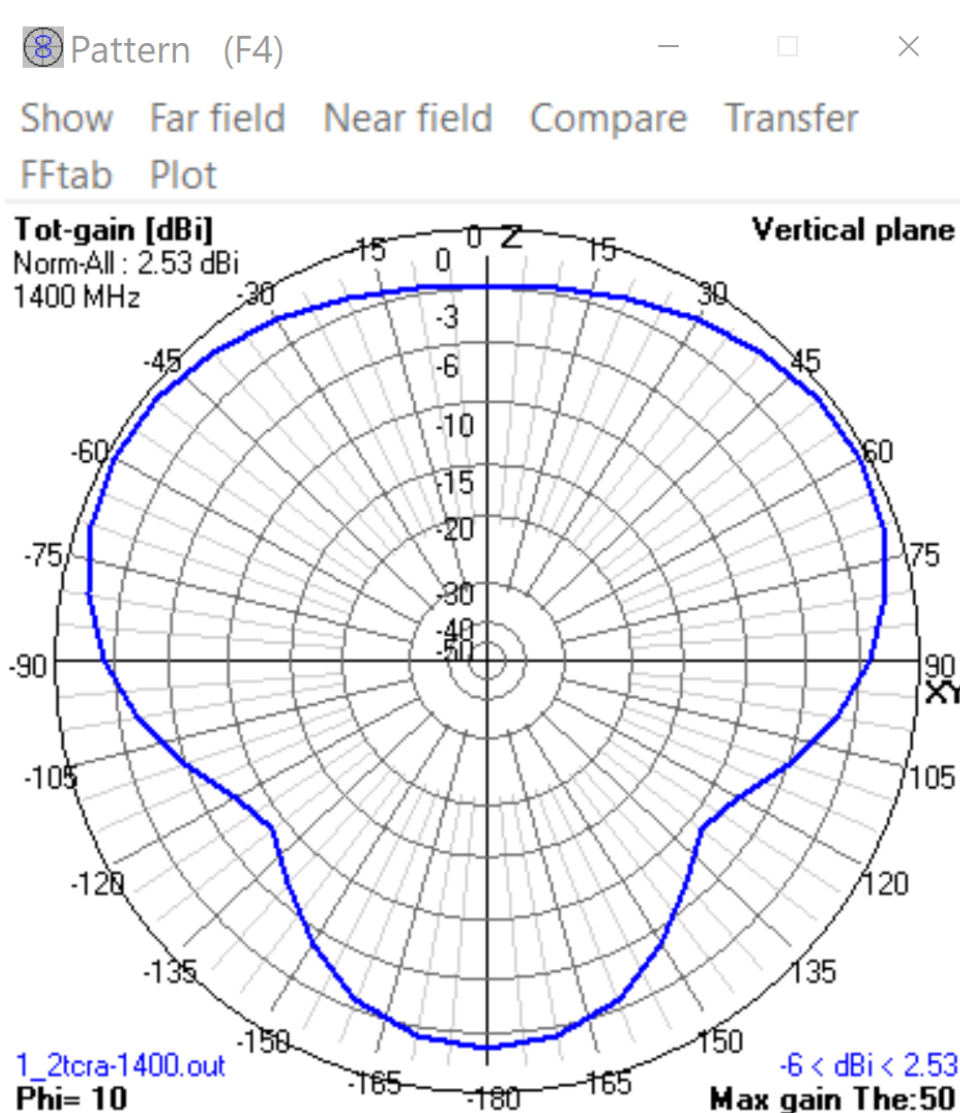


Рисунок 3.10 – ДС турнікетної антени з круглим екраном на частоті 1,4 ГГц

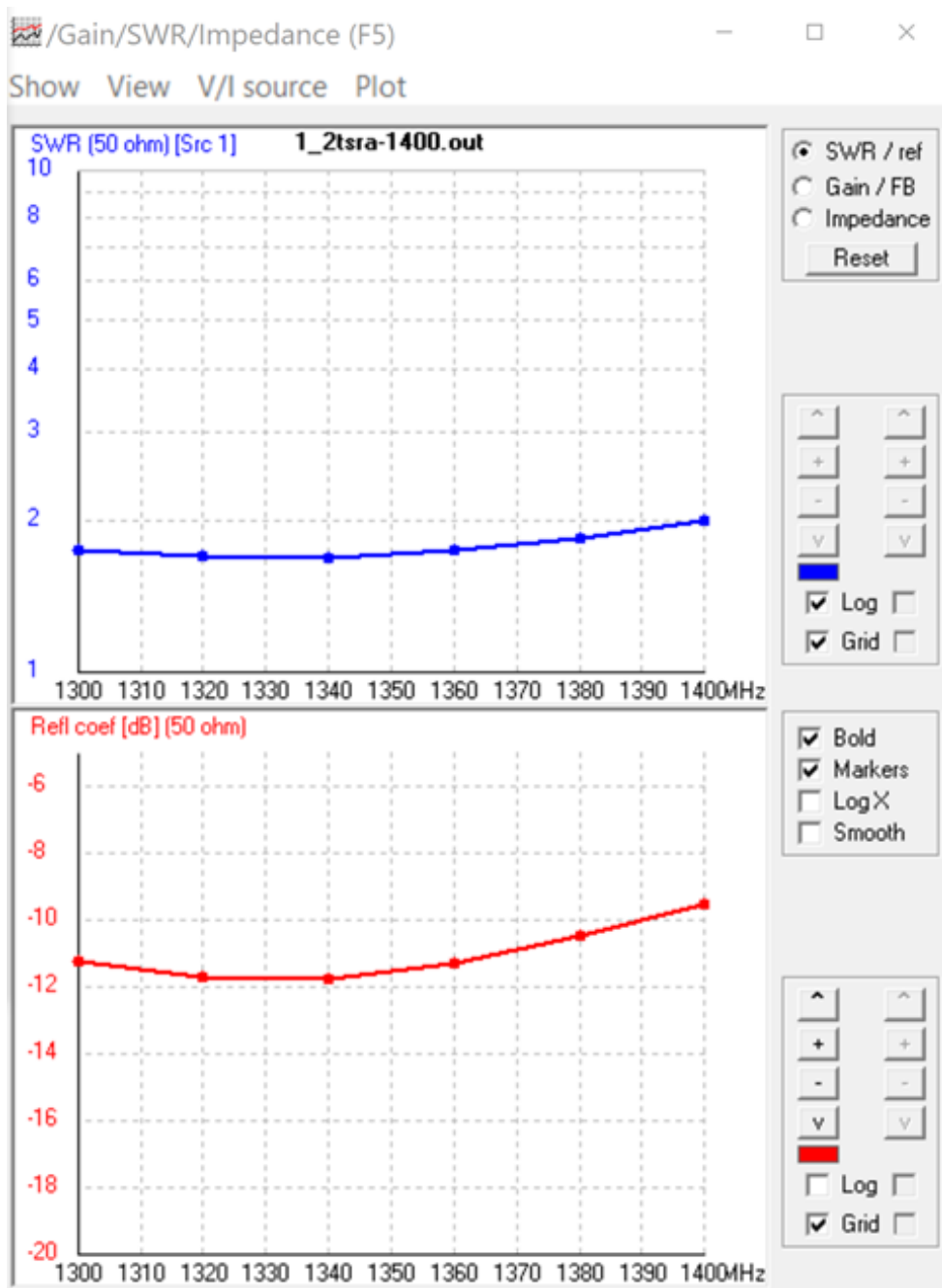


Рисунок 3.11 – Частотні залежності коефіцієнтів стоячої хвилі та відбиття турнікетної антени з круглим екраном на частоті

З рисунку 3.11 видно, що КСХ та коефіцієнт відбиття за своїми значеннями на виходять за межі допустимих.

3.3 Одиночний турнікет з прямокутним екраном

На рисунку 3. 12 показано зовнішній вигляд 3D конструкції турнікетної антени з прямокутним екраном.

Далі проаналізуємо діаграму спрямованості на частоті 1,4 ГГц та головні параметри спрямованості та ефективності. На рисунку 3.13 зображено ДС цієї антени. По ній та параметрах встановимо ступінь придатності цієї антени для РЕБ. Для того, щоб забезпечити полегшення конструкції та її вітрильність, було запропоновано реалізувати екран у вигляді сітчастої структури з розмірами комірки $1/16$ від довжини хвилі.

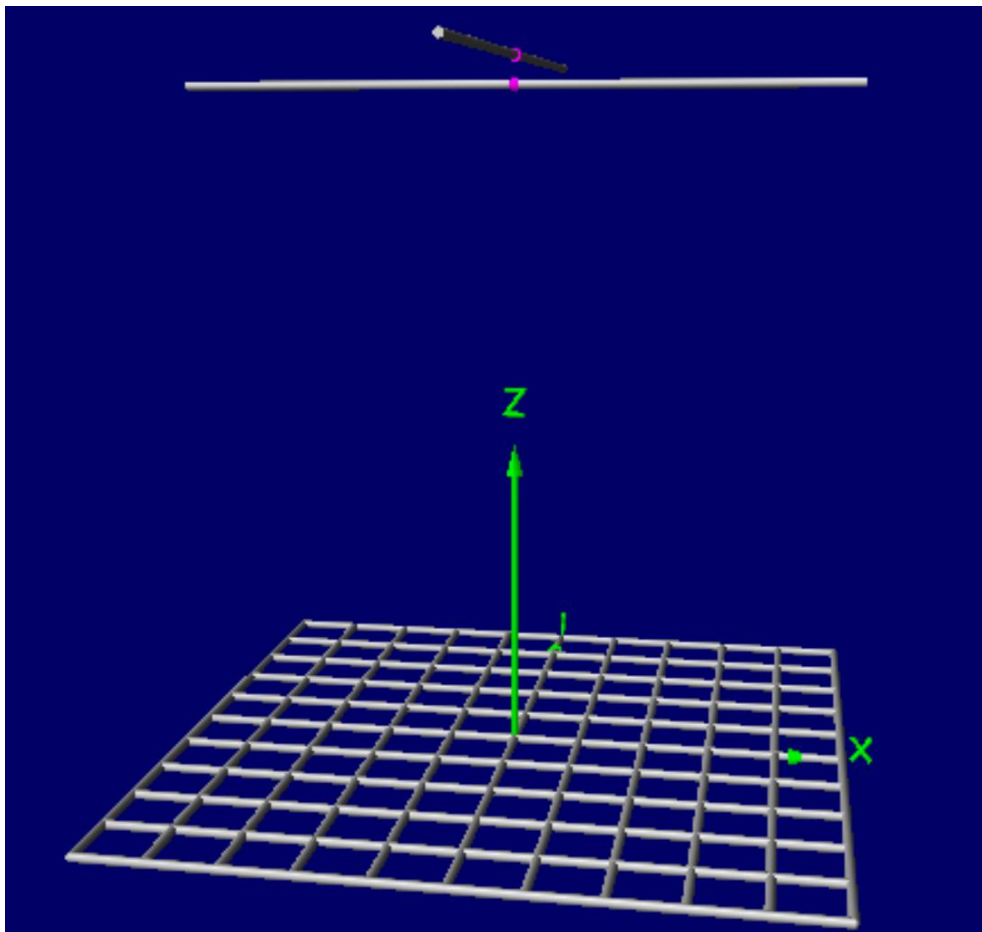


Рисунок 3.12 – 3D конструкція турнікетної антени з прямокутним екраном

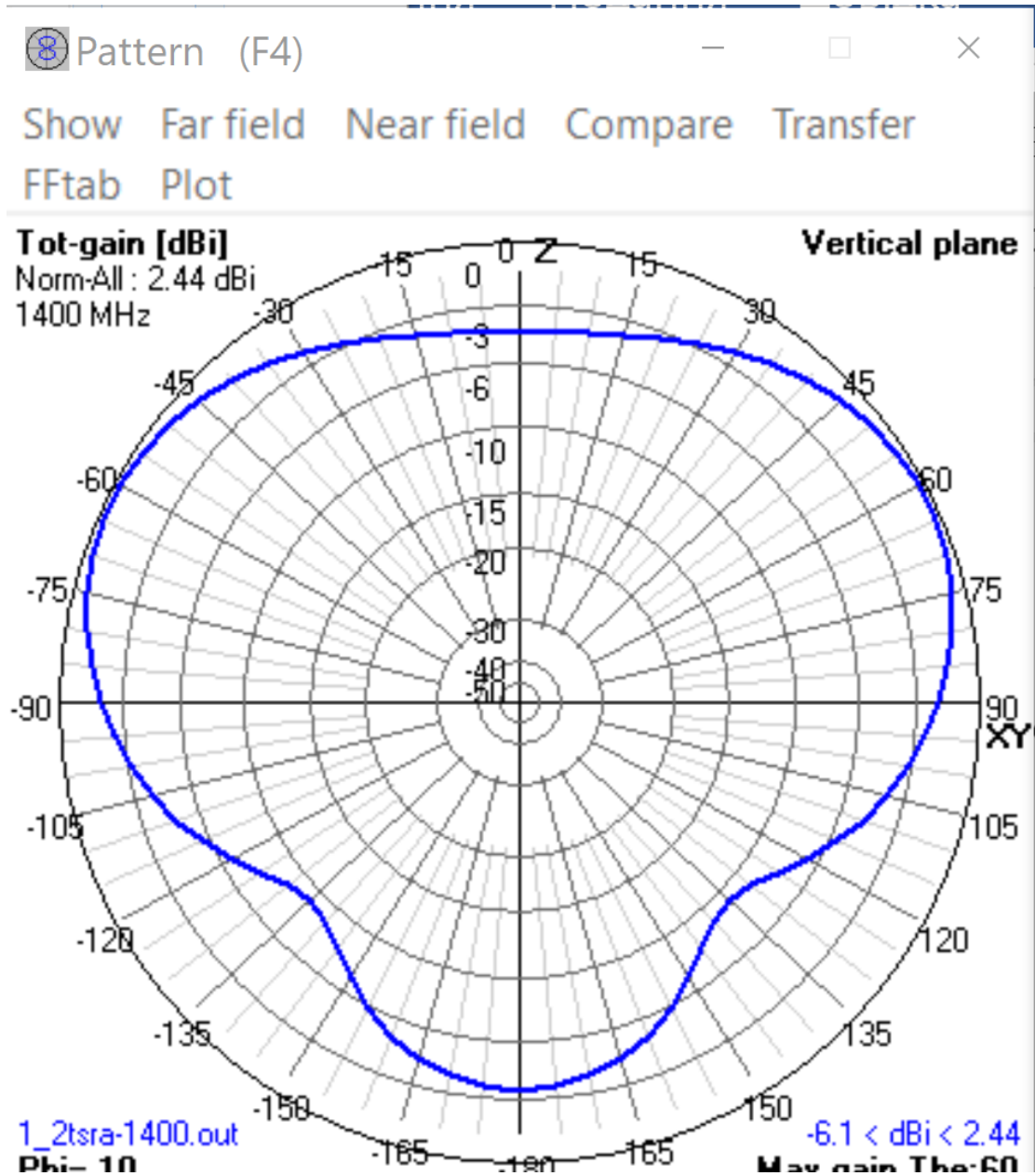


Рисунок 3.13 – ДС турнікетної антени з прямокутним екраном на частоті 1,4 ГГц

З рисунку 3.13 видно, що діаграма спрямованості має потрібну для застосування антени в РЕБ купольну форму, ширина ДС близька до 150 градусів при коефіцієнті підсилення у 2,44 dBi на частоті 1,4 ГГц. Певним недоліком, але несуттєвим для практичних застосувань, є роздвоєння

головного променя ДС внаслідок сплюснення його форми. Але цей ефект є слабо вираженим і не заважає застосуванню антени в система РЕБ.

З'ясуємо ступінь узгодження даної конструкції з лінією живлення в діапазоні робочих частот. На рисунку 3.14 показано частотні залежності коефіцієнта стоячої хвилі та коефіцієнта відбиття.

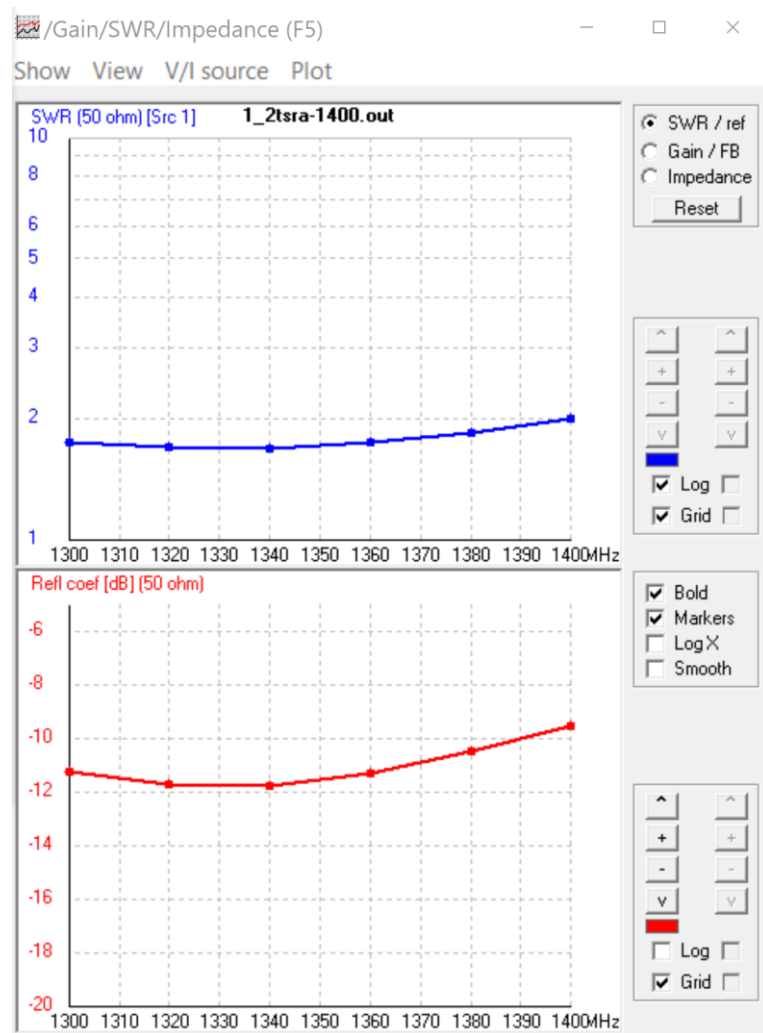


Рисунок 3.14 – Частотні залежності коефіцієнта стоячої хвилі (синя крива) та коефіцієнта відбиття (червона крива) турнікетної антени з прямокутним екраном

В усьому діапазоні частот коефіцієнт стоячої хвилі є меншим за 2, що є цілком прийнятною ознакою ступеню узгодження антени з лінією живлення.

Що стосується діаграми Сміта, то бачимо на ній значно кращі характеристики узгодженої антени (рис. 3.16) внаслідок компенсації реактивної складової вхідного опору антени.

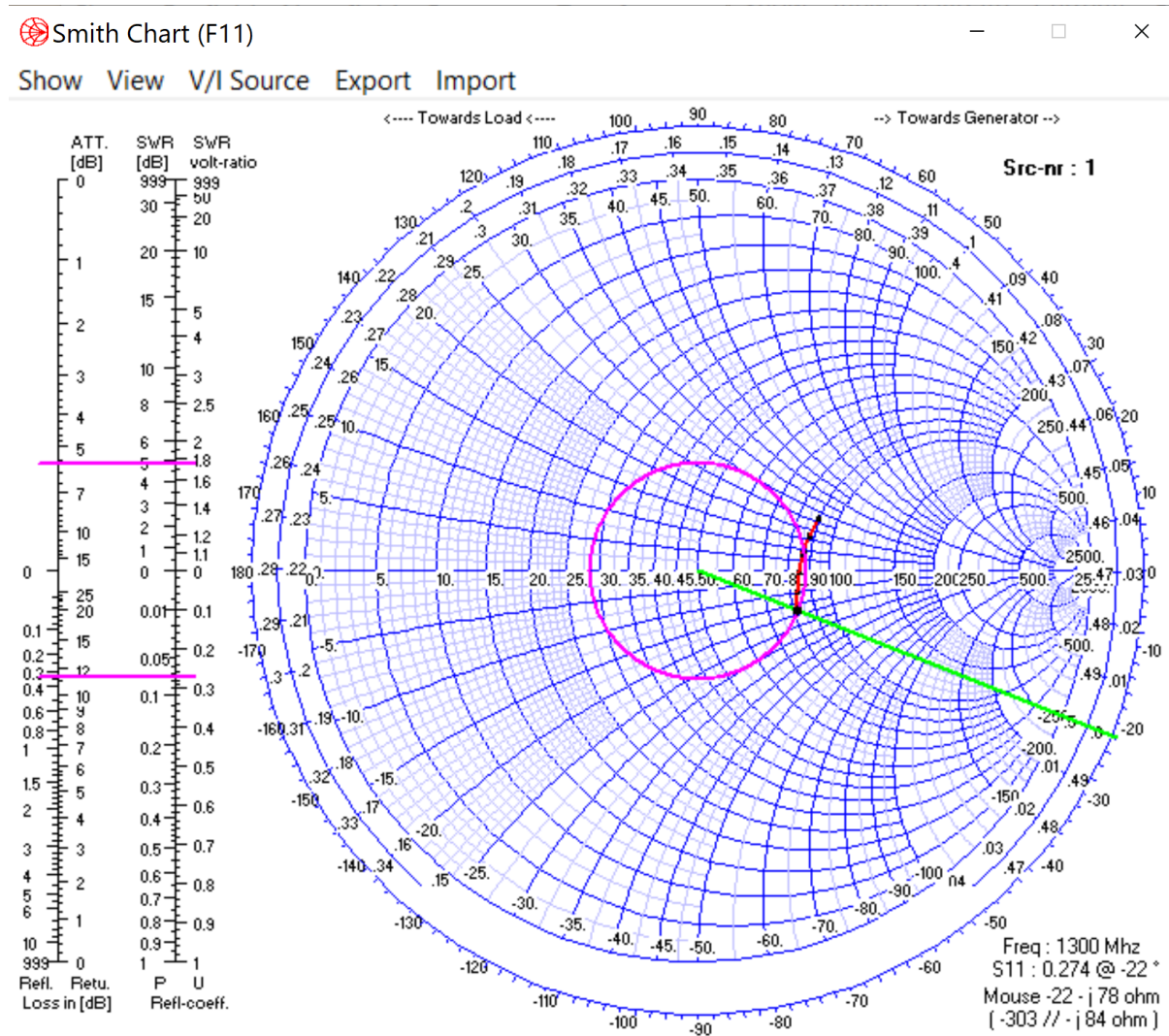


Рисунок 3.16 – Діаграма Сміта узгодженої турнікетної антени з квадратним екраном

3.4 Порівняння турнікетних антен

Наостанок порівняймо всі проаналізовані у програмі 4nec2 турнікетні антени і виберемо з них найбільш придатну для застосування в системах РЕБ.

Шляхом проведення великої кількості чисельних експериментів встановлено, що турнікет з квадратним екраном має більшу ефективність спрямованого випромінювання у вигляді найбільшого з усіх розглянутих в роботі турнікетних антен підсилення, яке дорівнює 6,95 dBi, тоді як підсилення турнікету з круглим екраном трошки, але несуттєво, є меншим (6,87 dBi), а у антени типу «кажан» цей показник не підіймається вище 2,32 dBi. Є й більш спрямовані багатоеlementні (2,3 elementні), але вони складно узгоджуються і не створюють діаграми спрямованості купольної форми, так званої форми «грибок». Тому для застосування в складі РЕБ використовуватись не можуть.

Водночас, надзвичайно велику роль, як і в будь-яких антенах, у антенах типу турнікет в складі РЕБ, відіграє ступінь узгодження їх із системою живлення. Але стосовно випадку турнікетів до проблеми їх імпедансного узгодження додається ще проблема точного взаємного фазування elementів турнікету для отримання колової поляризації з малим коефіцієнтом еліптичності. Треба зважати на наступні обставини. По-перше, лінія живлення у вигляді коаксіалу є несиметричним типом напрямної системи, а кожен з ортогональних один до одного у просторі випромінюючих elementів турнікету потребує симетричного живлення. По-друге, для створення поля випромінювання колової поляризації між джерелами живлення (між першим і другим вібраторами) необхідно забезпечити якомога точніший фазовий зсув у 90°.

Таким чином, можна об'явити своєрідним переможцем змагань на кращу турнікетну антену в складі РЕБ конструкцію одиночного дротового

турнікету з екраном пквдратної форми, який віддалений від турнікету на відстань у чверть довжини хвилі.

ВИСНОВКИ

Шляхом електродинамічного моделювання в програмному середовищі вільного використання 4nec2 змодельовано турнікетні антени різних конструкцій з метою застосування їх в установках РЕБ для захисту цивільних та військових об'єктів, транспортних засобів і людей від ударних БПЛА. Чисельний розрахунок параметрів та характеристик показав стабільність турнікетних структур. Аналіз їх характеристик довів можливість застосування у блоках РЕБ, оскільки, поряд з коловою поляризацією, більшість турнікетних антен мають діаграму спрямованості у вигляді широкого купола, що якраз і забезпечує ефективну захисну дію з усіх боків..

Досліджено спрямовані властивості турнікетної антени і характеристики її узгодження в діапазоні 1,3 -1,4 ГГц.

Визначено переможця серед турнікетних антен для їх застосування в РЕБ. Це одиночна дротова турнікетна антена з сітчастим екраном на відстані в чверть довжини хвилі від турнікета. турнікет з квадратним екраном має більшу ефективність спрямованого випромінювання у вигляді найбільшого з усіх розглянутих в роботі турнікетних антен підсилення, яке дорівнює 6,95 dBi, тоді як підсилення турнікету з круглим екраном трошки, але несуттєво, є меншим (6,87 dBi), а у антени типу «кажан» цей показник не підіймається вище 2,32 dBi. Є й більш спрямовані багатоеlementні (2,3 elementні), але вони складно узгоджуються і не створюють діаграми спрямованості купольної форми, так званої форми «грибок». Тому для застосування в складі РЕБ використовуватись не можуть.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що підтверджено можливість досягнення мети – використання турнікетної антени в джамерах, а завдяки наявності створеної моделі в 4nec2 зє

можливість в подальшому оптимізувати параметри цієї антени для отримання необхідних характеристик.

Антенна є конструктивно нескладною, побудована з двох дротових півхвильових вібраторів, які розташовані жрестоподібно, піднятих над металевим екраном на висоту у чверть довжини хвилі. Вона є стійкою до механічних пошкоджень і легкою за вагою.

Завдяки своїй куполоподібній ДС, ця антена дозволяє ефективно глушити сигнали від 110° до 180° .

По результатах досліджень можна сформулювати наступні висновки:

- діаграма спрямованості широка, порядку $110 - 180^\circ$, і не сильно змінює свій вигляд від змін лінійних розмірів та частоти;
- коефіцієнти відбиття, коефіцієнт еліптичності в межах норми для таких застосувань.

Наостанок слід зазначити, що у турнікетної антени є широкі перспективи практичного застосування завдяки необмеженій кількості конструктивних модифікацій, кожна з яких може виступати як окремий об'єкт наукового дослідження, а також необмежені кількості варіантів узгодження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Касьянов В. П. Антени та поширення радіохвиль: навч. посіб. / В. П. Касьянов. – Київ: НАУ, 2013. – 312 с.
2. Кривий С. А. Радіоантени : метод. вказівки до лаб. робіт / С. А. Кривий, І. В. Павленко. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 64 с.
3. Левченко В. І. Антени в телекомунікаційних системах: підручник / В. І. Левченко. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2011. – 258 с.
4. Дмитренко В. П. Пристрої НВЧ. Основи теорії / В. П. Дмитренко Т. І. Бугрова, Л. М. Логачова та ін. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 280 с.
5. Логачова Л. М. Внутрішня антена мобільного телефону [Електронний ресурс]: тези доп. / Л. М. Логачова, О. С. Садовський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 2 с.
6. ДСТУ 3801-98 «Антени»: нац. станд. / Мінзв'язку України, 1998. – 72 с.
7. Назаренко О. П. Антени для БПЛА в УHF/SHF-діапазонах: монографія. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 210 с.
8. Петренко І. Ю. Циркулярна поляризація в антенних рішеннях // Радіоелектроніка, 2021. – № 2. – С. 30–37.
9. Сидоренко С. М. Практичні аспекти налаштування турнікетних антен: тези доп. з конференції, 2022.
10. Богданов В. І. Оптимізація діаграм спрямованості турнікетних антен: дис. канд. техн. наук, Київ, 2019.
11. НАНУ. Антени кругової поляризації: метод. вказівки, Київ, 2022.
12. Kraus J. D., Marhefka R. J. Antennas for All Applications. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2002. – 921 p.
13. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2016. – 1104 p.

14. Stutzman W. L., Thiele G. A. *Antenna Theory and Design*. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, 2012. – 648 p.
15. ARRL *Antenna Book for Radio Communications*. – Latest ed. – Newington, CT: American Radio Relay League, 2020. – 1312 p.
16. ITU-R Recommendation F.1245-2. *Mathematical Model of Circularly Polarized Antennas*. – Geneva: ITU, 2019. – 20 p.
17. FPV Know-It-All. *Antenna Guide for FPV Drones* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fpvknowitall.com/antenna-guide/researchgate.netresearchgate.net+5oscarliang.com+5dronetrest.com+5>
18. OscarLiang. *The Ultimate Guide to Choosing and Using FPV Antennas* [Електронний ресурс], 2025.
19. Karunnya B. S., Sarath J., Bindu P. et al. *Review of Antennas Used in FPV/WLAN Applications*. *Acta Technica Corviniensis*, 2021.
20. Škiljo M., Udženija M., Blazevic Z. *Axial Ratio of Quarter- and Half-wavelength Cloverleaf Antenna for Drone FPV Applications*. *SoftCOM Conference*, 2023.
21. Brown G. *The Turnstile Antenna*. *Electronics*, Apr. 1936.
22. DIY Drones Forum. *Antenna feedpoint matching, baluns, turnstiles* [Онлайн-пост]. diydrone.com
23. Hardesty G. *FPV Antennas for Drones* [Data-Alliance.net], Nov 2024.
24. Voors, A. *4nec2. Antenna Modeling Software*, 2005. (офіційна документація).
25. *Antenna Modelling with 4NEC2 (YouTube playlist)* – серія відеоуроків зі створення моделей та аналізу. [Youtube.com](https://www.youtube.com)
26. Dr. Carol Milazzo, KP4MD, *4nec2 Model Analysis of Quadcopter 'Range Extender' Antennas* (2022).