НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіотехнічних систем

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Сергій ЖУК
«___»_____2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Радіотехнічні інформаційні технології»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Підсилювач сигналів GNSS з високою ефективністю»

Виконав:
студент IV курсу, групи РС-01
Бойко Данило Олександрович _____

Керівник:
Асистент
Романенко Тарас Володимирович _____

Рецензент:
Ст.викл.каф. ПРЕ
Новосад Андрій Анатолійович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	А4		Завдання на дипломний проєкт	3	
2	А4		Пояснювальна записка	46	
3	А3		Друкована плата	1	
4	А3		Принципова схема	1	

				РС-01.464114.001	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Бойко Д.О.			Відомість дипломного проєкту	Лист 1 / Листів 1
Керівн.	Романенко Т.В.				
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. РТС
Н/контр.	Піддубний В.О.				
Зав.каф.	Жук С.Я.				

Національно Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньою програмою «Радіотехнічні інформаційні технології »

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій ЖУК
«___»_____2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Бойко Данило Олександрович

1. Тема проєкту «Підсилювач сигналів GNSS з високою ефективністю», керівник Романенко Тарас Володимирович, асистент, затверджені наказом по університету від «29» травня 2024 р. №2178-с.
2. Термін подання студентом проєкту 19 червня 2024 року.
3. Вихідні дані до проєкту «Підсилювач сигналів GNSS з високою ефективністю»:
   - Діапазон робочих частот — L1
   - Мінімальна дальність роботи — 500м
   - Габарити — не більше 150x150x150мм
   - Вага — не більше 0.5кг
   - Максимальна випромінювана потужність – не більше 10Вт
   - Напруга живлення — 3,6 – 7,2 В
   - Час неперервної роботи — не менше 1 год
   - Вихідний опір навантаження — 50 Ом
   - Вартість — не більше 300$
4. Зміст пояснювальної записки:
   a. Огляд існуючих рішень.
   b. Розробка схеми принципової.

c. Експериментальні дослідження
d. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу:
    a. Структурна схема.
    b. Схема електрична принципова.
    c. Друкована плата
6. Дата видачі завдання: 17 квітня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вивчення принципу роботи GNSS	01.06	Виконано
2	Огляд існуючих рішень та їх аналіз	02.06	Виконано
3	Розробка технічного завдання	02.06	Виконано
4	Розробка схеми електричної принципової	08.06	Виконано
5	Проектування друкованої плати	10.06	Виконано
8	Оформлення дипломного проєкту	18.06	Виконано

Студент Бойко Данило Олександрович

Керівник Романенко Тарас Володимирович

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми проекту спричинена зростом попиту на супутникові технології та зокрема, в контексті російсько-української війни, на захист від засобів, оснащених модулями супутникових систем навігації.

Метою дипломного проекту є розробка високоефективного підсилювача сигналів глобальної супутникової навігації для застосування у радіотехнічних пристроях даної технології.

У проекті розроблено пристрій високоефективного підсилення сигналів GNSS, а саме шляхом розрахунку параметрів елементів та розробки принципової схеми і моделі фізичного підсилювача з поясненням щодо прийнятих конструкторських рішень.

В даному дипломному проекті наведено графічні та чисельні результати моделювання, що свідчать про доцільність та ефективність впровадження даного електронного пристрою.

Дипломний проект містить 46 сторінок пояснювальної записки, 24 рисунки, 3 таблиці, 2 додатки.

ANNOTATION

The actuality of the project topic is caused by the growth in demand for satellite technologies and, in particular, in the context of the Russian-Ukrainian war, for protection against means equipped with satellite navigation system modules.

The goal of the diploma project is the development of a highly efficient amplifier of global satellite navigation signals for use in electronic devices of this technology.

The project developed a device for highly efficient amplification of GNSS signals, namely by calculating the parameters of the elements and developing a schematic diagram and model of a physical amplifier with an explanation of the adopted design decisions.

In this diploma project, graphic and numerical modeling results are given, which testify to the expediency and effectiveness of the implementation of this electronic device.

The diploma project contains 46 pages of explanatory note, 24 figures, 3 tables, 2 appendices.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту

на тему: Підсилювач сигналів GNSS з високою ефективністю

Київ — 2024 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

GNSS – глобальна навігаційна супутникова система;

США – Сполучені Штати Америки;

GPS – «Global Positioning System» - американська система супутникової навігації;

GLONASS – «Глобальна навігаційна супутникова система» - російська та радянська система супутникової навігації;

DME – дальномірне обладнання;

SDR – програмно визначене радіо;

МДП-транзистор – польовий транзистор зі структурою «метал-діелектрик напівпровідник»;

MOSFET – польовий транзистор зі структурою «метал-оксид-напівпровідник»;

LDMOS – польовий транзистор зі латеральною дифузією в структурі «метал-оксид-напівпровідник»;

SMA – коаксіальний з'єднувач;

PAE – коефіцієнт ефективності поглинання потужності;

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напругою.

ВСТУП

Актуальність тематики високоефективного підсилення сигналів GNSS полягає у сучасних викликах перед використанням електронних систем з модулями навігації в умовах наявності завад та постановників хибних координат, що активно відбувається під час бойових дій на території України.

Як в цивільному, так і у військовому аспекті постає питання щодо забезпечення радіоелектронного захисту апаратури та збільшення завадостійкості модулів позиціонування електронних систем, для чого також необхідне використання підсилювачів сигналів. Також необхідно виконувати й протилежні завдання – радіоелектронний вплив на системи противника.

Система GNSS дозволяє визначати координати об’єктів за допомогою даних з геодезичних та космічних радіопередавачів методом порівняння відстаней до супутникових терміналів, поправки за допомогою радіомаяків та відповідної обробки даних.

Впровадження високоефективних технологій підсилювачів GNSS сигналів дозволяє забезпечити максимальну точність виконання поставлених завдань в контексті застосування модулів позиціонування у військовій сфері.

Також технології оптимізації підсилення сигналів GNSS дозволяють забезпечити більшу точність вимірювання координат для цивільної логістики, що особливо актуально для авіаційного, водного та автомобільного транспорту.

Отже, тематика впровадження технологій високоефективних підсилювачів сигналів систем позиціонування є актуальною для України як у цивільній, так і у військовій сфері, і дозволить виконувати специфічні завдання із використанням технологій GNSS.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1.Загальна інформація про GNSS

GNSS є сукупним терміном для систем навігації, що опираються на дані, одержані від супутникових радіопередавачів; серед інформації, яку отримують в процесі обробки сигналів з супутникових терміналів, є точний час, місцезнаходження, напрям та швидкість стосовно об’єкта, що містить модуль приймача супутникових даних [1].

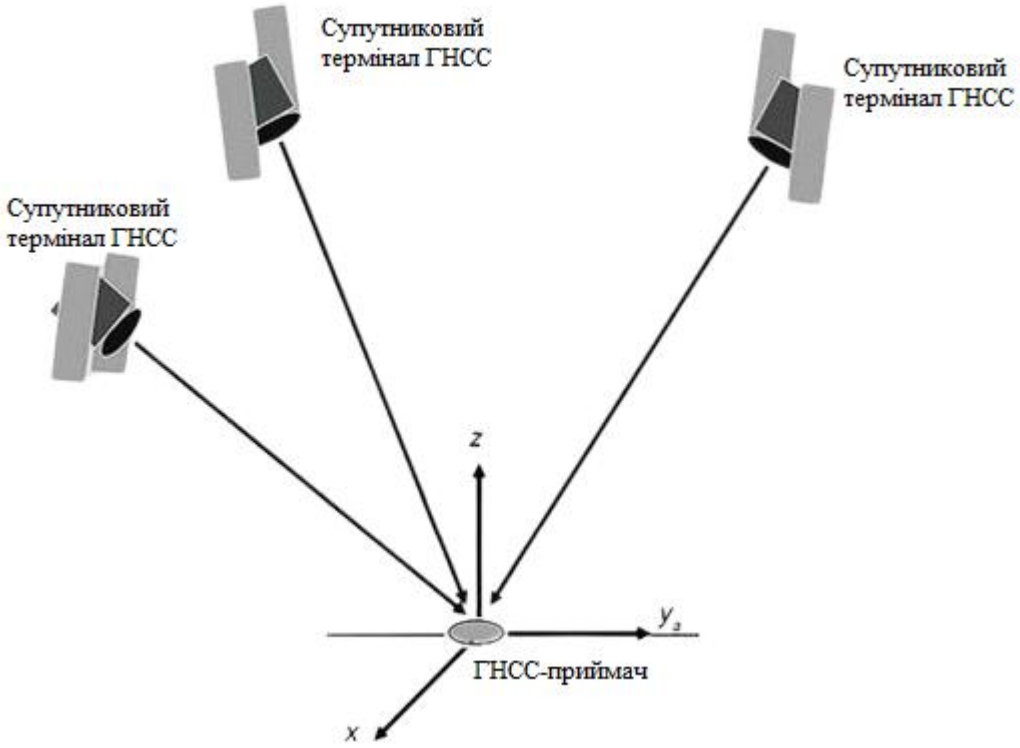


Рисунок 1.1 – Базовий принцип роботи систем GNSS.

Принцип роботи системи полягає в геометричному порівнянні даних з декількох супутникових терміналів із однозначно відомими координатами та слідуючій математичній корекції похибки, що зображено на рисунку 1.1. Також для збільшення точності позиціонування застосовують наземні радіопередавачі GNSS, дані яких відповідають геодезичним вимірам на місцевості.

Найбільшого поширення набули наступні системи супутникової навігації, що і відповідають поняттю глобальних систем [2]:

- GPS (Global Positioning System), запущена у 1978 році на замовлення Збройних Сил США що є першою доступною системою є першою доступною системою GNSS;
- GLONASS, що запущена Радянським Союзом у 1982 році як аналог і конкурент системи GPS;
- Galileo, запущена у 2011 країнами Європейського Союзу;
- Beidou, запущена Китайською Народною Республікою у 2000 році.

Радіочастотний ресурс, який використовується для систем позиціонування, визначений у більшості випадків L-діапазоном [3].

Таблиця 1. Розподіл діапазонів для систем GNSS

Технології GNSS	GPS (NAVSTAR)	GLONASS	Galileo, Beidou
I діапазон	L1: 1575,43 МГц	L1: 1602 + (n) МГц	E2-L1-E1: 1559-1592 МГц
II діапазон	L2: 1227,6 МГц	L2: 1246 + (n) МГц	E5A-E5B: 1164-1215 МГц
III діапазон	L3: 1176,45 МГц	L3: 1207,24 МГц	E6: 1260-1300 МГц

Найуживанішою системою позиціонування є GPS (NAVSTAR), що є власністю Міністерства оборони США, тому в конфігурації системи існують відмінності в модуляції несучих частот для цивільного та для військового користування.

Для широкого загалу доступним є грубий C/A-код, що передається лише на несучій L1 і має частоту у 1,023 МГц. Доступність реалізована відкритістю рівнянь, що дозволяють декодувати даний сигнал.

P(Y)-кодування є захищеним, передається на несучих L1 та L2 із частотою у 10,23 МГц. Даний вид кодування є більш точним, так як має розподіл кодів, заснований на сегментах тривалістю в 7 днів. Відмінність між режимами P та Y полягає в наявності у другого режиму мінімізації ефекту спуфінгу (навмисного підміни координат), тому цей метод кодування використовується у військовій сфері.

Структура псевдовипадкового генерування чисел для С/А та Р-коду полягає у двійковому сумуванні коду з шаблонами кодів D(t) із даними ефемеридів, часу та з тактовою бітовою послідовністю зі швидкістю 50 біт/с, що в результаті дає складену модулюючу бітову послідовність [4].

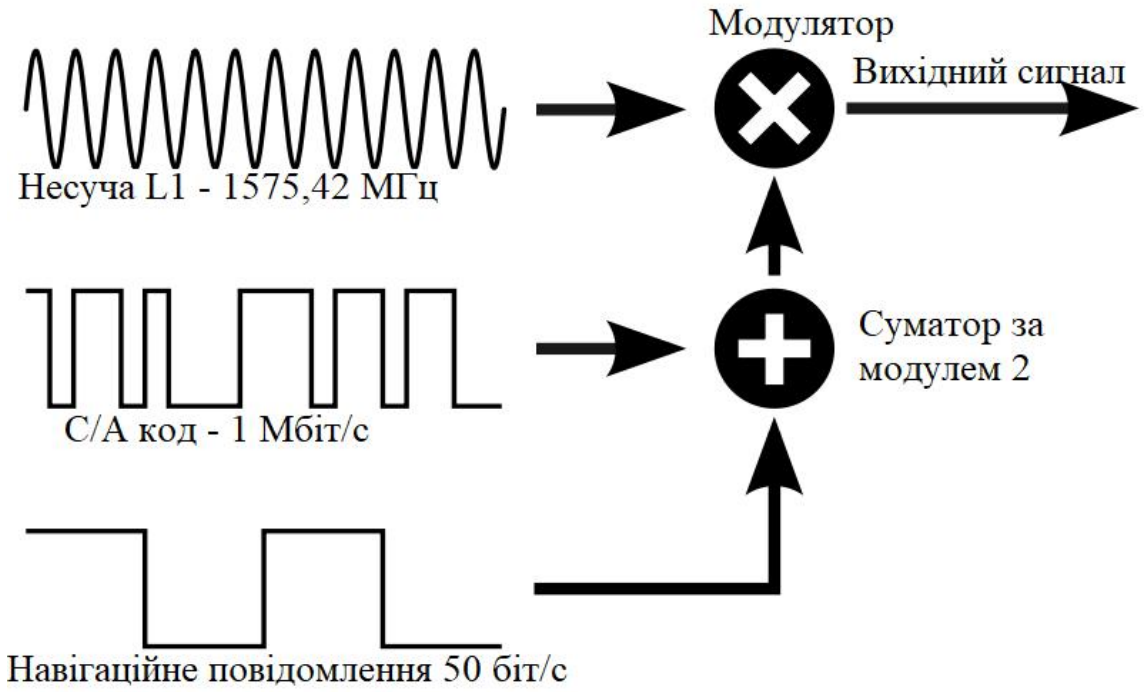


Рисунок 1.2 – Принцип формування сигналу GPS.

Технологія GLONASS використовує сигнали із розширеними спектрами, при цьому принцип доступу до відкритої та закритої інформації реалізовано за принципом, аналогічним до технології NAVSTAR GPS.

У цивільній сфері технології GNSS набули великої популярності, тому мають наступні області застосування [5]:

- Сфера послуг, зокрема доставка товарів приватними підприємствами та служба таксі;
- Навігація для автомобільного, авіаційного, морського транспорту та для туристів;
- Збільшення безпеки транспортного перевезення за рахунок відстеження координат вантажів трекінговими системами;
- Оптимізація виконання роботи сільськогосподарською технікою;

- Планування розмітки для висадки аграрних культур, контроль за процесом вирощування за допомогою оснащених модулями GNSS аграрних безпілотних систем;
- Будівництво із мінімальними прорахунками за допомогою порівняння моделі із реальними координатами об’єкта;
- Відстеження видобутку корисних копалин та автоматизація процесу видобутку;
- Вирішення геодезичних завдань, що в кінцевому результаті дозволяє побудувати географічну інформаційну систему;
- Визначення точного часу;

У військовій сфері GNSS використовується в першу чергу для модулів наведення високоточної зброї; також дана технологія використовується і у військовій техніці – як для навігації, так і для визначення дружніх або ворожих позицій за допомогою технології GPS-трекінгу [6].

Основні задачі, які виконує технологія GNSS у військових цілях:

- Навігація для авіаційного транспорту, бронетехніки та іншої військової техніки;
- Збільшення точності наведення для наявного озброєння;
- Оптимізація рекогностування місцевості та уточнення координат орієнтирів;
- Відстеження сил противника за допомогою приховано встановлених трекерів;
- Впровадження технологій мережецентричного керування бойовими діями.

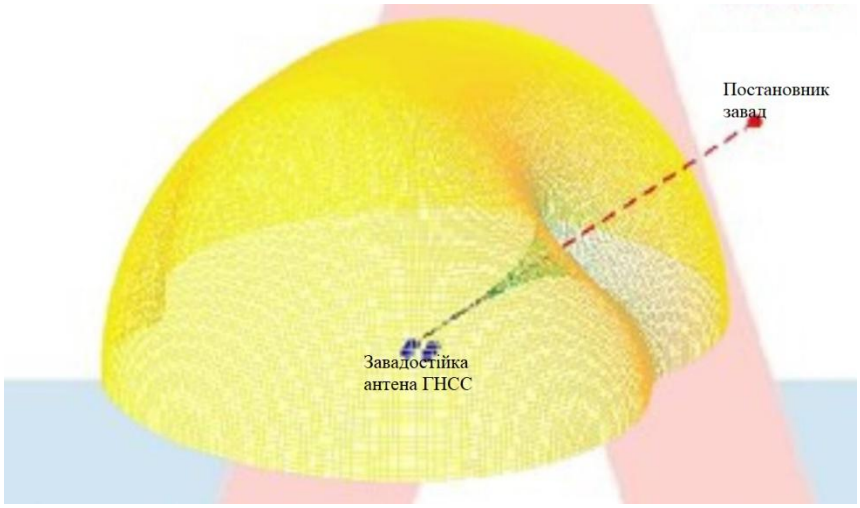


Рисунок 1.3 – Принцип роботи завадостійкої антени приймача GNSS.

Модулі GNSS наявні у ворожих засобах повітряного нападу, таких як надзвукові крилаті ракети [7]. При цьому для збільшення стійкості системи використовуються завадостійкі антенні технології на принципі адаптивних цифрових антенних решіток [8], принцип роботи яких зображено на рисунку 1.3. Аналогічне рішення також існує і для бойових та розвідувальних безпілотних систем [9], що дозволяє збільшити точність цілевказання та ураження бойовою частиною.

Враховуючи дані фактори, актуальною є проблема радіоелектронної протидії озброєнню, яке коригується за допомогою даних, отриманих через модулі GNSS.

1.2. Генератори постановки завад

Постановка завад системам глобального позиціонування є одним із факторів, що дозволяє отримати перевагу під час бойових дій, що спричинило утворення концепції навігаційної протидії (NAVWAR), яка була прийнята Міністерством оборони США як сукупність мір щодо захисту власної навігаційної апаратури та радіоелектронного впливу на системи GNSS противника [10]. Тому актуальною є проблема визначення методів генерування навмисних і ненавмисних завад та відповідного радіоелектронного захисту апаратури.

Ненавмисні завади можуть спричинятись апаратурою, що працює на частотах, близьких до частот GNSS, зазначених в таблиці 1; крім того, ненавмисні перешкоди генеруються гармоніками більш низьких частот. Варіант загального переліку ненавмисних перешкод наведений в таблиці 2 [11].

Таблиця 2. Перелік джерел ненавмисних перешкод системам GNSS.

Діапазон частот ненавмисних завад, МГц	Тип джерела ненавмисних завад
1533	Радіолінія
1575	Немодульована несуча
1610	GLOBALSTAR
1240-1243,25	Передача цифрових даних (пакетне радіо)
1242-1242,7	Радіоаматорські радіорелейні станції
1243-1260	Аматорське телебачення
1250-1259	Радіолокаційні станції керування повітряним рухом
500	III гармоніка
66, 67 канали телебачення	II гармоніка
22, 23 канали телебачення	III гармоніка

157 УКХ-діапазон	X гармоніка
131, 121 УКХ-діапазон	XII, XIII гармоніки

Продовження таблиці 2

108-118	Завади в смугах диспетчерського керування повітряним рухом
Сигнали запиту за дальністю системи ближньої навігації	II гармоніка
525 частота кристалу DME	III гармоніка

Захист від ненавмисних завад впливає на точність та адекватність роботи модуля GNSS, він повинен враховувати типи сигналів ненавмисних завад, їхні енергетичні та спектральні характеристики, можливості інтерференції сигналів тощо. Тому високоякісний GNSS-модуль повинен мати рішення, які дозволяють відфільтрувати такі типи завад за допомогою зміни параметрів антенної решітки, фільтрів та підсилювачів на апаратному рівні та відповідних алгоритмів інтерполяції і апроксимації даних на програмному рівні.

Навмисні завади спричинюються постановниками перешкод, що базуються на принципах радіопротидії та дезінформації [12]. До першого класу постановники перешкод відноситься технологія *Jamming*, тобто придушення сигналу, тоді як до другого класу – *Spoofing*, тобто випромінювання в радіоефір сигналу, що містить підставні координати.

Принцип роботи Jamming-пристроїв полягає у генерації сигналу високої потужності на частотах модуля GNSS, що придушується, і може бути реалізовано за допомогою генераторів шумоподібних, ЛЧМ чи гармонічних сигналів. При цьому за допомогою застосування адаптивних антенних решіток в GNSS-модулях можна мінімізувати вплив постановників перешкод подібного типу через їхні енергетичні властивості.

Принцип роботи Spoofing-пристроїв полягає у трансляції завідомо хибних координат, що ускладнює їхнє виявлення приймальним трактом GNSS-модуля. Дана технологія використовується переважно для атаки на C/A сигнали через повний доступ до інформації щодо модуляції сигналу.

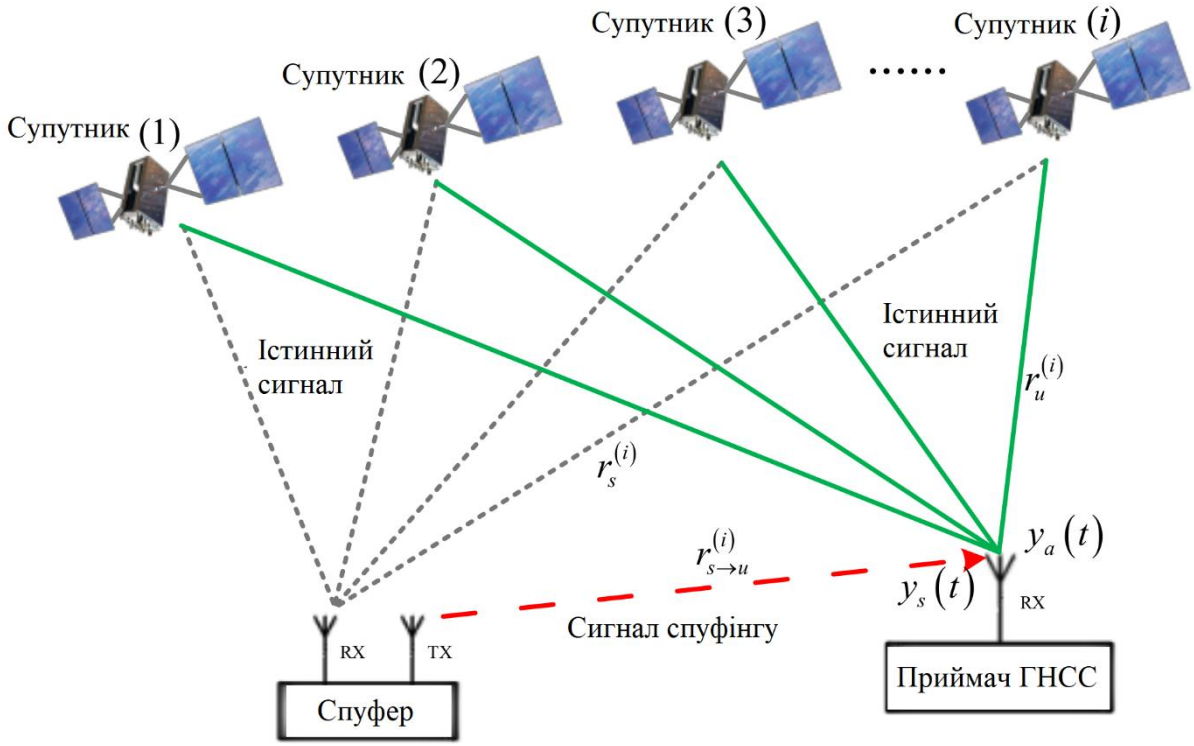


Рисунок 1.4 – Принцип постановки завад методом спуфінгу.

Для порушення роботи GNSS систем методом придушення використовуються наступні технології побудови перешкод [13]:

- Генератор неперервного синусоїдального коливання;
- Імпульсні генератори перешкод;
- Генератори прицільних за частотою шумових перешкод;
- Генератори загороджувальних шумових перешкод.

Серед зазначених технологій постановки перешкод найкращі показники за впливом на приймальний тракт модулів GNSS та бітову похибку мають генератори неперервних синусоїдальних коливань та генератори білого шуму.

Спуфінг є більш захищеним в плані виявлення засобами радіомоніторингу методом постановки перешкод, що дозволяє не тільки впливати на роботу приймального тракту модуля GNSS, а й впливати на пристрій, який коригується GNSS; зокрема, технологія спуфінгу дозволяє перехопити керування безпілотними системами та змінити траєкторію руху такої системи [14].

Найбільш розповсюджені рішення [15], [16], [17], що представлені на ринку джеммерів, мають значні недоліки, серед яких основними є:

- Низький коефіцієнт корисної дії постановників перешкод – до 50%;
- Температурна нестабільність електронних компонентів;
- Невеликий радіус дії за великих енергетичних затрат – менше 1 кілометра;
- Суворо обмежений низькою енергоефективністю час безперервної роботи постановників перешкод – до 1 години;
- Нерівномірність спектру перешкоди – наявність провалів;
- Висока вартість і унеможливлення ремонту апаратури при виході техніки з ладу.

Засоби постановки дезінформаційних перешкод за принципом спуфінгу можуть реалізуватись за допомогою засобів SDR, тобто програмно визначеного радіо, серед яких на ринку здобув найбільшого поширення пристрій під назвою HackRF One [18].

Поширені у відкритому доступі практичні реалізації спуферів [19], [20] засновані на комплексі програмних засобів, що впливають на модуляцію сигналу. З цього випливає, що наявні рішення є ефективними проти загальнодоступних технологій GNSS, що засновані на C/A кодуванні. Але, з іншого боку, дані системи є малоефективними проти модулів, що мають доступ до P(Y) кодування через закритий доступ до рівнянь демодуляції та алгоритми протидії із спуфінгом.

Перспективним на даний момент для ефективного придушення сигналів GNSS рішенням є генератор завад, запропонований у [21]. Принцип роботи, реалізований в зазначеному проєкті, полягає у генеруванні цифрового білого шуму; при цьому варто зазначити відсутність провалів у вихідному спектрі, час неперервної роботи у 3 години і велику дальність роботи – до 4,3 кілометрів за рівня потужності 1 Вт.

При цьому генератор шумових перешкод, що реалізований у [21], можна вдосконалити шляхом додавання високоефективного підсилювача, що дозволить збільшити дальність системи без суттєвого впливу на час роботи пристрою.

1.3. Висновки

Під час аналізу апаратури глобальної навігаційної системи та можливостей щодо їхнього придушення було визначено принципи роботи систем позиціонування та перешкоди, які можуть вплинути на роботу модулів GNSS.

Також було розглянуто сфери застосування GNSS, серед яких варто приділити особливу увагу військовому застосуванню із особливостями щодо передачі сигналу, його обробки та перешкодозахищеності військових систем позиціонування. Було прийнято рішення щодо необхідності постановки перешкод озброєнню, яке коригується за допомогою використання модулів глобальної навігаційної системи.

Було розглянуто як ненавмисні, так і навмисні перешкоди електронним пристроям позиціонування. Серед наявних рішень щодо постановки навмисних активних перешкод було розглянуто методи джеммінгу та спуфінгу.

Було визначено, що метод спуфінгу, попри свою ефективність, має суттєвий недолік у вигляді обмеженості роботи при атаці на модулі позиціонування військового призначення.

Було прийнято рішення щодо вдосконалення уже існуючого засобу постановки шумових перешкод, що за своїми показниками та простотою

реалізації має практичну цінність. Суть вдосконалення системи постановки шумових перешкод полягає у додаванні блоку підсилювача із низькими втратами, що дозволить збільшити дальність роботи системи придушення модулів GNSS.

2. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИКИ ПОСТАНОВКИ ЗАВАД

Для того, щоб визначити умови роботи і можливості щодо енергоефективного підсилення сигналів, необхідно розрахувати енергетичні властивості сигналу, що придушується, та завади, яка буде підсилюватись. Це дозволить визначити вхідні та вихідні потужності електронного пристрою, що використовується для покращення роботи постановника шумових перешкод.

Першочергово, для вибору активного елементу підсилювача необхідно визначити енергію на виході генератора шумових перешкод, яка буде передаватись у визначеному діапазоні частот в заданий момент часу. Так як енергетика постановника перешкод є відомою, необхідно розрахувати потужність підсилювача, що відповідає збільшеній дальності дії генератора завад системам позиціонування.

Для визначення енергетики на виході підсилювача розраховується енергетика на вході пристрою, яка є пропорційна робочій смузі частот та амплітуді сигналу генератора постановки перешкод.

Для аналізу енергетики на вході підсилювача основною є інформація щодо енергетики корисного сигналу, що надходить в приймальний тракт користувача, модуль GNSS якого придушується системою. Це дозволяє ефективно розрахувати як вимоги щодо потужності, так і в результаті – межі дальності роботи пристрою придушення із високоефективним підсилювачем.

Тобто, для визначення енергетичних характеристик підсилювача, розрахунки засновані на дослідженні вхідних характеристик системи, що відповідають потужності корисного сигналу. Наступним етапом є розрахунок енергетики для сигналу перешкоди з врахуванням підсилення за допомогою високоефективного підсилювача.

2.1. Розрахунок енергетики сигналу

Сигнал, дія якого придушується постановником перешкод, є маніпульованим, тобто модульованим зашифрованою бітовою послідовністю, високочастотним коливанням, що передається в тракт приймача GNSS з супутникового терміналу, що впливає на розрахунок його потужності через велику дальність між радіопередавачем та радіоприймачем.

Потужність сигналу пропорційна до квадрату напруженості електромагнітного поля, породжуваного радіопередавачем і перенесеного у просторі до антени приймача, тому, відповідно, має розмірність у ватах. Для зручності розрахунків використовується логарифмічне представлення у вигляді децибел-ват чи децибел-міліват відносно потужності.

Значення потужності корисного сигналу на вході приймача засобу, що придушується розраховується для оцінки роботи постановника перешкод як результуюче значення відносно чутливості приймача, потужності передавача, коефіцієнта підсилення антени приймача, довжини хвилі та відстані між супутниковим терміналом і модулем GNSS.

Потужність випромінювання супутникового терміналу розраховується як добуток коефіцієнту підсилення антени терміналу та власне потужності радіопередавача, тому є еквівалентною відносно ізотропного випромінювача в напрямку земної поверхні.

Розрахунок потужності корисного сигналу на вході має наступний вигляд:

$$P_{пр} = EIRP_{суп} + G_{пр} - 20\log\frac{4\pi}{\lambda_0} - 20\log R_c, \quad (1)$$

де: $P_{пр}$ – потужність на вході приймального тракту модуля GNSS, дБвт;

$EIRP_{суп}$ – еквівалентна потужність ізотропного випромінювання супутника, дБвт;

$G_{пр}$ – коефіцієнт підсилення антенної системи приймача GNSS, дБі;

λ_0 – довжина хвилі, м;

R_c – довжина радіотраси між супутником та приймачем GNSS, км.

Еквівалентна ізотропна потужність супутникового терміналу має дещо різні значення в залежності від кута огляду та втрат у вільному просторі [22].

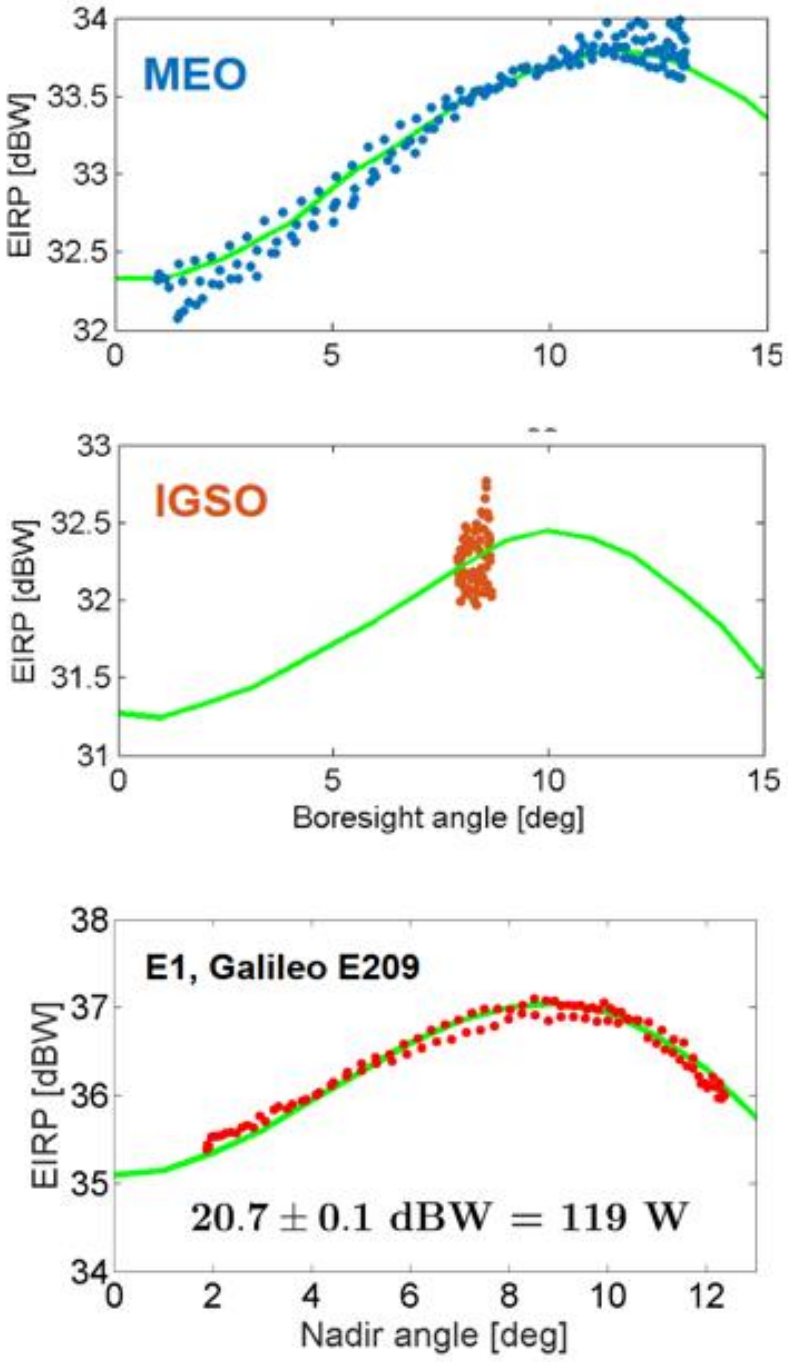


Рисунок 2.1 – Графіки еквівалентних ізотропних потужностей для супутникових терміналів GNSS.

Згідно даних з рисунку 2.1, обираємо значення еквівалентної потужності як $EIRP_{суп} = 33$ *дБвт*.

Згідно даними з [23], довжина радіотраси R_c відповідає орбіті супутників GNSS та становить приблизно 20200 км.

Частота передачі діапазону L1 становить 1575,42 МГц, що відповідає довжині хвилі $\lambda_0 = 1{,}903 \cdot 10^{-4}$ *м*.

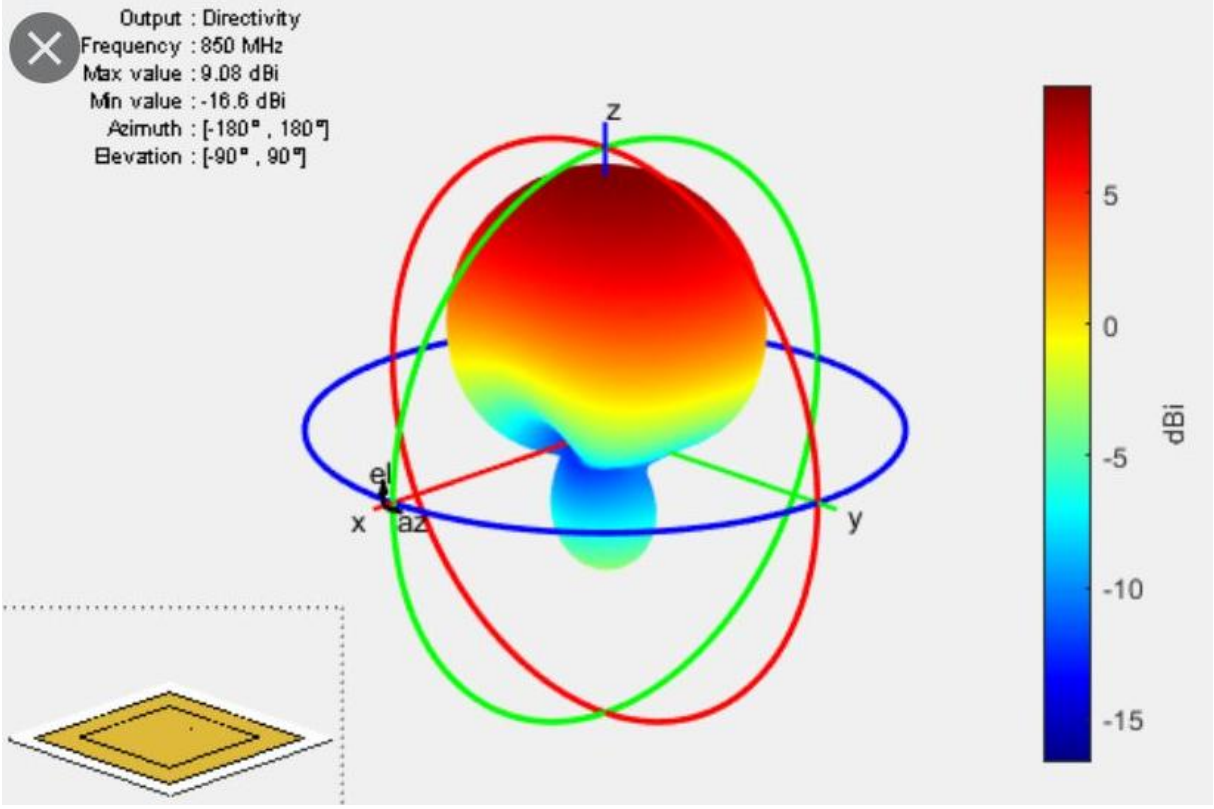


Рисунок 2.2 – Просторова діаграма спрямованості антени модуля GNSS.

Коефіцієнт підсилення антени, згідно поширених на ринку виробів, аналогічних [24], становить 5 дБі. Таке значення зумовлене використанням спрямованих антен [25] для забезпечення стабільного прийому сигналу GNSS, діаграма спрямованості яких зазначена на рисунку 2.2. Чутливість приймачів подібного типу сягає -160 *дБм*.

Тоді результуюче значення рівня вхідної потужності корисного сигналу згідно (1) становить $P_{пр} = -144{,}503$ дБвт $= -114{,}503$ дБм, що відповідає значенню потужності сигналу на вході приймача у $3{,}546 \cdot 10^{-15}$ *Вт*.

2.2. Розрахунок енергетики завади

Отримавши значення потужності на вході приймача GNSS із його максимумом підсилення антени в напрямі до супутникових терміналів, необхідно також розрахувати рівень шуму, який би забезпечив придушення сигналу.

Для оцінки завадостійкості системи використовується порівняння корисного сигналу із завадою в якості співвідношення SNR, тобто сигналу до шуму. Очевидно, що для забезпечення роботи пристрою постановки завад необхідно максимізувати значення цього показника.

$$SNR = \frac{P_{завади}}{P_{сигналу}} = P_{завади}, дБм - P_{сигналу}, дБм \quad (2)$$

Як відомо, при рівні SNR 20 децибел і більше (перешкода більше ніж сигнал мінімум в 100 разів), завада є ефективною та порушує прийом корисного сигналу приймачем.

Тоді, випливаючи з (2), мінімальне значення рівня потужності завади в тракті приймача становить $P_{min_{завади}} = -94{,}503\ дБм$.

Розрахунок оптимального значення потужності завади можна провести наступним чином:

$$P_{пр_{завади}} = P_{пп} + G_{пр} + G_{пп} - 20\log\frac{4\pi}{\lambda_0} - 20\log R_{ш} - 10\log\frac{\Delta f_{ш}}{\Delta f_{с}}, \quad (3)$$

де: $P_{пп}$ – потужність на виході підсилювача;

$G_{пп}$ – коефіцієнт підсилення антени постановника перешкод;

$R_{ш}$ – відстань між постановником перешкод та ціллю;

$\Delta f_{ш}$ – діапазон частот постановника перешкод;

$\Delta f_{с}$ – діапазон частот корисного сигналу.

Потужність на виході підсилювача приймаємо на рівні 20 Вт, що відповідає значенню $P_{пп} = 13{,}01\ дБвт = 43{,}01\ дБм$.

Коефіцієнт підсилення антени передавача залежить від типу антени. Так як даний підсилювач є стаціонарним, то можна використовувати

дипольну антену по типу штирьової вібраторної антени, а отже коефіцієнт підсилення антени приймаємо як $G_{ПП} = 2{,}14\ дБі$.

Розрахована відстань між постановником завад і ціллю обрана як $R_{ш} = 2\ км$, що є достатнім для придушення таких систем, як безпілотні літальні апарати мультикоптерного типу та наземні і морські безпілотні комплекси.

Діапазон частот корисного сигналу є відомим – для придушення обрано C/A кодування на несучій L1, що має частоту генерування псевдовипадкового коду у $\Delta f_{c} = 1{,}023\ МГц$.

Для забезпечення перекриття корисного сигналу на несучій L1 обрано смугу частот завади як $\Delta f_{ш} = 51\ МГц$, що відповідає відтинку у 1559-1611 МГц.

Виходячи з рівняння (3), рівень вхідної потужності в тракті приймача, за якої забезпечується придушення завадою сигналу на відстані 20 кілометрів із вихідною потужністю підсилювача постановника перешкод у 20 Вт та дископодібною антеною Уда-Ягі на виході постановника перешкод, становить $P_{пр_{завади}} = -124{,}243\ дБвт = -94{,}243\ дБм$, що відповідає вхідній потужності номіналом $3{,}764 \cdot 10^{-13}\ Вт$.

Тоді можливе співвідношення сигнал/шум, згідно з (2), становить $SNR = 20{,}26\ дБ$, тобто сигнал перешкоди у 105 разів більше ніж корисний сигнал, що задовольняє мінімальні вимоги.

Так як в самому генераторі шумових перешкод вже було враховано вплив втрат у вільному просторі для L-діапазону, то вхідна потужність, яка подається на підсилювач GNSS, становить 1 Вт.

2.3. Висновки

В цьому розділі було розраховано енергетичні характеристики постановки завад та порівняно їх із характеристиками вхідного сигналу. Для цього було зроблено попередній розрахунок енергетики корисного сигналу на вході приймача з врахуванням випромінювання супутникового терміналу, довжини хвилі, відстані від орбіти та антенної системи приймача.

Для розрахунків приймального тракту взято до уваги реальні пристрої прийому сигналів GNSS та такі їхні характеристики, як чутливість приймача та діаграма спрямованості приймальної антени.

Було з’ясовано, що для радіоелектронного впливу на роботу приймачів GNSS на відстані у 2 кілометри необхідно підсилювати сигнал генератора білого шуму до рівня 20 ват. При цьому оптимальним є застосування дипольних антен, що дозволяє перекрити потенційну зону загрози з боку озброєння, корегованого за допомогою GNSS та збільшити ефективність дії системи.

Було визначено, що саме за такої конфігурації вхідної потужності постановника перешкод, потужності підсилення та характеристик антени співвідношення сигнал-шум перевищує значення у 100 разів, що дозволяє придушувати об’єкти на заявленій відстані із врахуванням втрат у просторі.

Розрахунки енергетики сигналів призводять до висновку, що для виконання заданих вимог необхідно застосовувати саме енергоефективні підсилювачі. Такий вибір зумовлено як потужністю підсилення, так і забезпеченням стійкості системи при довготривалому використанні.

3. РОЗРОБКА ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

Підсилювач потужності сигналів GNSS повинен мати доступну і енергоефективну елементну базу.

Оптимальною є схема підсилювача на основі транзистора, що відповідає вимогам узгодження із вхідним та вихідним трактом електронної системи в цілому. Тобто основною задачею розробки є вибір транзистора із найбільш оптимальними параметрами щодо діапазону частот, підсилення та рівня втрат.

Узгодження транзистора буде досягатись через включення в схему підсилювача компенсувальних і фільтруючих елементів, таких як ємності та індуктивності, та стабілізаційних елементів, таких як резистори.

Основні параметри, що відповідають за узгодження підсилювача із генератором шуму та антенною системою – це коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН), вхідний опір, вихідний опір схеми. КСХН не повинен перевищувати значення 2, вхідний та вихідний опори підсилювача повинні відповідати лінії передачі із мінімально можливим характеристичним імпедансом навантаження.

Так як робоча частота знаходиться в межах 1,559-1,61 ГГц, і належить до надвисокочастотного діапазону, то узгоджувальні елементи, такі як індуктивності, економічно доцільніше буде реалізувати за допомогою мікросмужкових технологій.

Ефективність підсилювача оцінюється як PAE [26], тобто як співвідношення різниці вхідної і вихідної потужності підсилювача відносно потужності живлення.

Коефіцієнт підсилення підсилювача залежить від вхідної та вихідної потужності; так як значення вхідної потужності становить 1 Вт, а вихідної – 20 ват, то він повинен відповідати значенню як мінімум 13 дБ.

3.1. Вибір активного елемента

Активний елемент повинен відповідати наступним вимогам:

- Робоча частота повинна сягати як мінімум 1,5-1,7 ГГц;

- Коефіцієнт підсилення – мінімум 13 дБ;
- Ефективність підсилювача PAE – мінімум 50 %;
- Висока температурна стабільність елемента.

Серед технологій, які задовольняють дані вимоги, варто виділити підсилювачі на MOSFET [27], тобто польових транзисторах із МДП (метал – діелектрик/оксид – провідник) структурою.

Для забезпечення стабільної роботи в ролі підсилювача на надвисоких частотах застосовують саме LDMOS структуру в якості активного елемента, через зменшене поверхневе поле і більшу температурну стабільність.

На ринку активних елементів найбільш відповідним за вимогами щодо поставленої задачі є такий транзистор, як BLP0427M9S20Z, виробництва компанії Ampleon [29], [30], [31].

Рисунок 3.1 – LDMOS-транзистор BLP0427M9S20Z.

Характеристики даного транзистора приведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Характеристики транзистора BLP0427M9S20Z.

Параметр	Позначення	Номінал	Розмірність
Діапазон частот	f_{range}	10-2700	МГц
Номінальна вихідна потужність	$P_{L(1dB)}$	20	Вт
Напруга стік-витік	V_{DS}	28	В
Ефективність каналу витоку	η_D	>55	%
Рівень вихідної потужності підсилення	$P_{L(1dB)}$	43	дБм
Вхідні втрати	RL_{in}	-9	дБ
Тепловий опір	$R_{th(j-c)}$	0,9	К/Вт

3.2. Розрахунок узгодження транзистора

Наступним кроком є розрахунок узгодження транзистора з виходом генератора шуму та входом антенно-фідерного тракту.

Було обрано діелектрик RO4350B [32] товщиною 0,762 мм з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon_r = 3{,}48$.

На вхід та на вихід системи для забезпечення мінімальних втрат було прийнято рішення використовувати SMA-роз'єми.

Вихідний опір генератора шуму та підсилювача Z_0 становить 50 Ом.

Центральна частота f_0 відповідає каналу L1 і становить 1575,42 МГц.

Діапазон частот – від 1559 до 1610 МГц.

Вхідний опір транзистора становить $Z_s = 1.8 - j5.6 \approx 1\ Ом.$

Вихідний опір транзистора становить $Z_l = 3 - j1.2 \approx 3\ Ом.$

Комплексними складовими вхідного і вихідного опорів транзистора можна знехтувати через їхнє невелике значення.

Для побудови трансформатора в мікросмужковому варіанті необхідно враховувати високочастотні ефекти краю мікросмужкової пластини, які за необхідної резонансної частоти дають ефект вкорочення фізичних розмірів мікросмужкової лінії:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 10\frac{d}{w}}}, \tag{4}$$

де: ε – діелектрична проникність підкладки;

d – товщина підкладки;

w – ширина мікросмужкової лінії.

Опір узгоджувального трансформатора, який використовується як на вході, так і на виході підсилювача, повинен становити:

$$Z_t = \sqrt{Z_{вх} Z_{вих}}, \tag{5}$$

де: $R_{вх}$ – вхідний опір;

$Z_{вих}$ – вихідний опір.

Довжина чвертьхвильового трансформатора повинна становити:

$$l_t = \frac{\lambda_0}{4}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \quad (6)$$

де: λ_0 – центральна довжина хвилі;

ε_{eff} – ефективна діелектрична проникність.

Тоді вхідний імпеданс трансформатора становить:

$$Z_{вх} = Z_t \frac{Z_{транз} + jZ_t \tan(\beta l_t)}{Z_t + jZ_{транз} \tan(\beta l_t)}, \quad (7)$$

де: Z_t – опір узгоджувального трансформатора;

$Z_{транз}$ – опір, який йде від транзистора (вхідний або вихідний);

l_t – довжина мікросмужкової лінії трансформатора;

$\beta = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_{eff}}}{\lambda_0}$ – хвилеве число в електродинамічному середовищі трансформатора.

Параметри узгодження ліній, які визначають правильність розрахунків – КСХН та коефіцієнт відбиття. Коефіцієнт відбиття отримують як:

$$Г = \frac{Z_0 - Z_{вх}}{Z_0 + Z_{вх}}, \quad (8)$$

де: Z_0 – вихідний опір;

$Z_{вх}$ – вхідний опір.

Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою є пов'язаним із коефіцієнтом відбиття наступним чином:

$$КСХН = \frac{1 + |Г|}{1 - |Г|}, \quad (9)$$

де: $|Г|$ – модуль коефіцієнта відбиття.

В результаті розрахунків за формулами (5) і (4) було визначено, що:

- Необхідний опір вхідного трансформатора становить $Z_{t_{вх}} = 7{,}071$ Ом;
- Необхідний опір вихідного узгоджувального трансформатора становить $Z_{t_{вих}} = 12{,}247$ *Ом*;
- Ширина мікросмужкової лінії, що йде на вихід в обох випадках, становить $w = 1{,}689$ міліметрів;

- Ширина вхідної мікросмужкової лінії вхідного узгоджувального трансформатора, становить $w_{вих_{t1}} = 16{,}568$ міліметрів;
- Ширина вхідної мікросмужкової лінії вихідного узгоджувального трансформатора становить $w_{вх_{t2}} = 9{,}244$ міліметрів.

Довжина лінії вхідного трансформатора згідно формули (6) становить $l_{t_1} = 26{,}323$ міліметри; тоді як для вихідного трансформатора довжина лінії становить $l_{t_2} = 26{,}77$ міліметрів.

Результуючий опір обох трансформаторів (вхідний імпеданс) відповідає заданим вимогам, є рівним вихідому опору генератору завад та необхідному вихідному опору підсилювача Z_0 та становить $Z_{вх_1} = Z_{вх_2} = 50\ Ом.$

Графіки КСХН та коефіцієнтів відбиття вхідного трансформатора зображені на рисунках 3.2 та 3.3 відповідно.

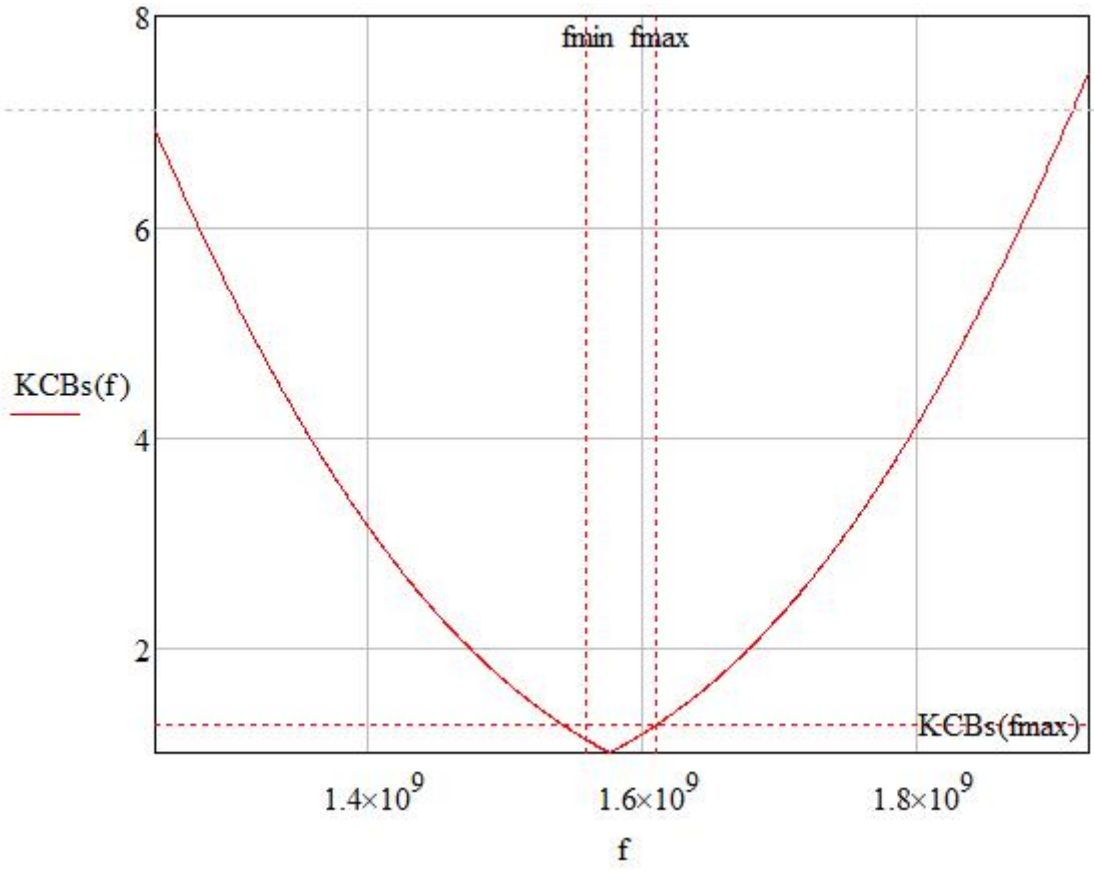


Рисунок 3.2 – КСХН вхідного трансформатора.

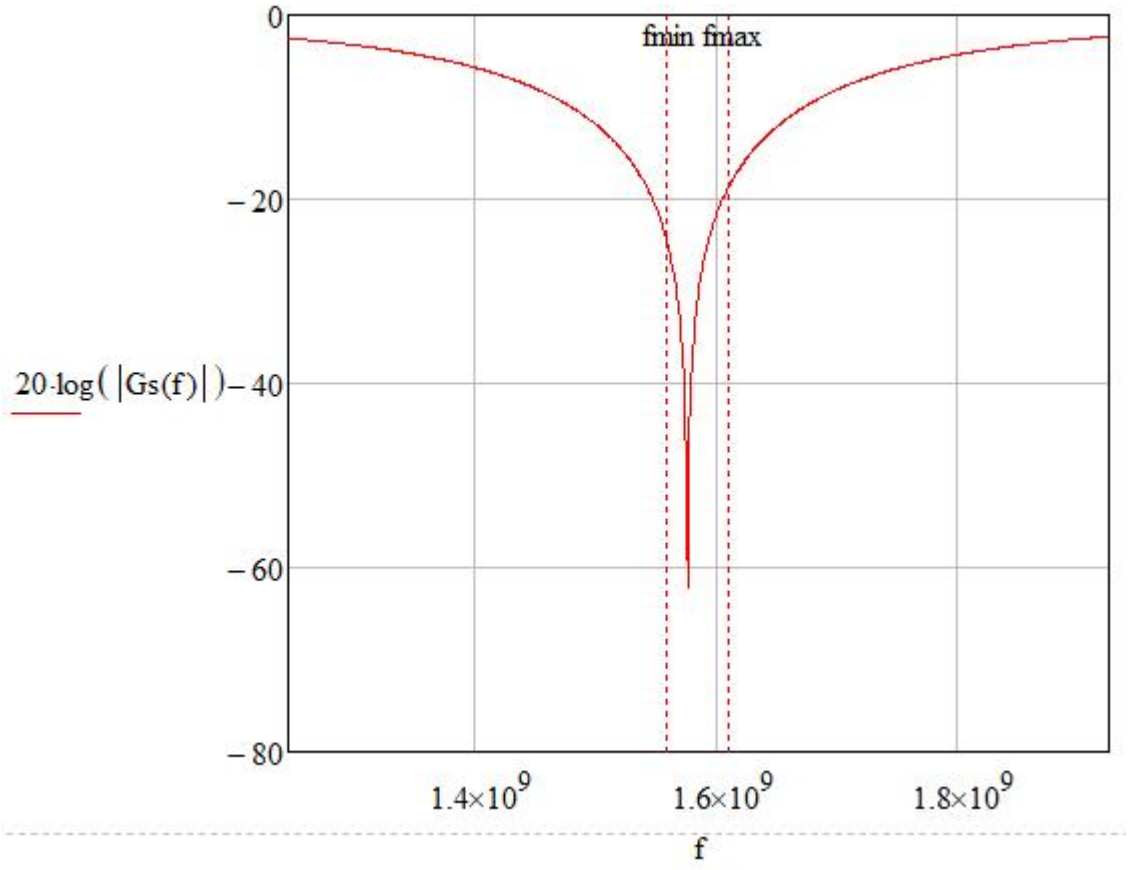


Рисунок 3.3 – Коефіцієнт відбиття вхідного узгоджувального трансформатора.

Як видно з рисунків 3.2 та 3.3, робочий діапазон частот для вхідного трансформатора, де значення КСХН менше, ніж 1,5 і коефіцієнт відбиття за рівнем становить менше, ніж -20 дБ, є ширшим за необхідний, що задовольняє умови задачі. При цьому, значення КСХН на максимальній частоті необхідного діапазону 1610 МГц становить 1,269, що свідчить про високу ефективність узгодження таким трансформатором. На центральній частоті діапазону L1 1575,42 МГц коефіцієнт стоячої хвилі прямує до нуля, що свідчить про практичну реалізацію відсутності втрат в узгоджувальному тракті на вході підсилювача.

Графіки КСХН та коефіцієнтів відбиття вихідного узгоджувального трансформатора зображені на рисунках 3.4-3.5.

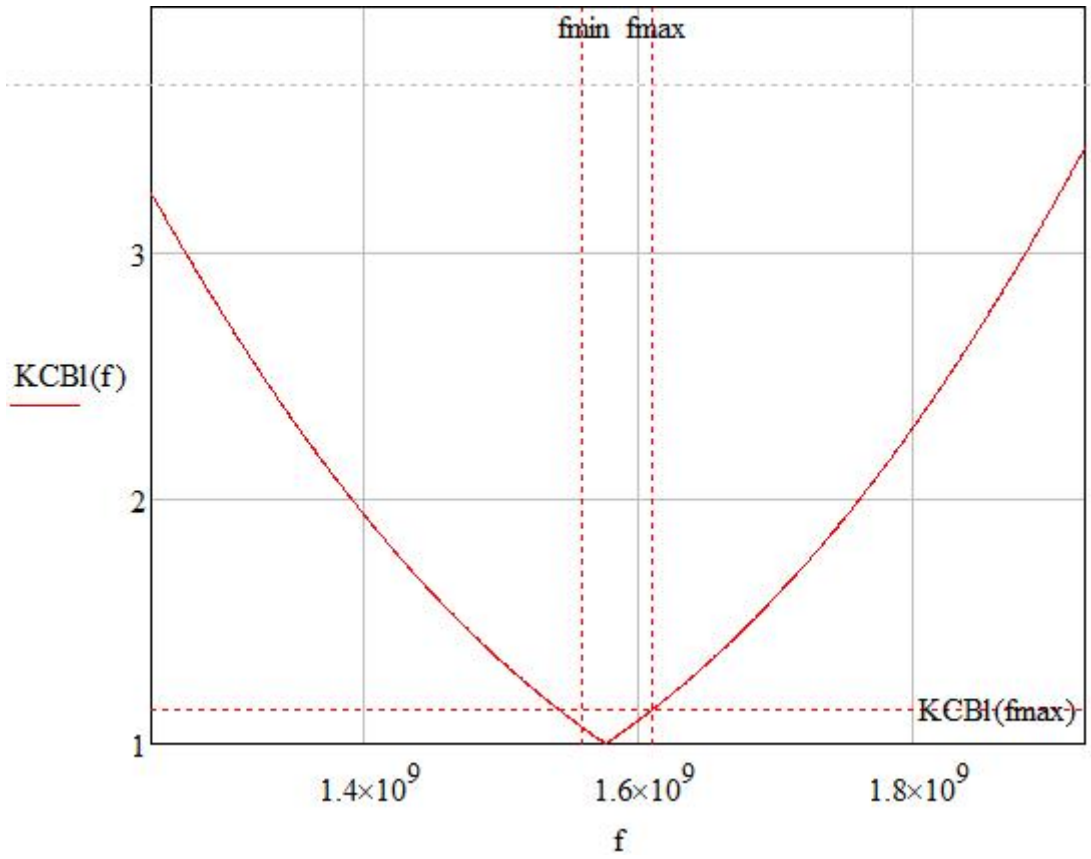


Рисунок 3.4 – КСХН вихідного трансформатора.

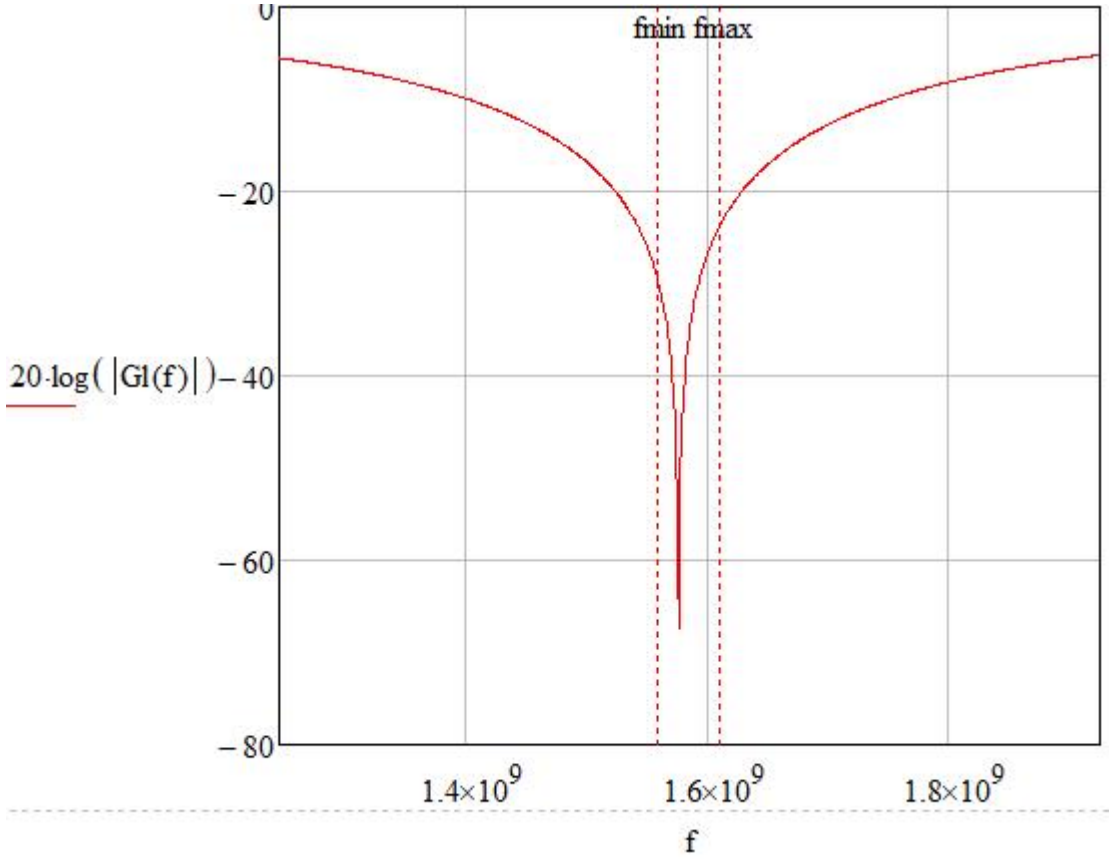


Рисунок 3.5 – Коефіцієнт відбиття вихідного трансформатора.

Як видно з рисунків 3.4-3.5, узгодження вихідного трансформатора забезпечується не тільки в заданому діапазоні частот, а і за його межами. КСХН на максимальній частоті 1610 МГц становить 1,141, а на центральній частоті L1 1575,42 МГц прямує до нуля, що свідчить про практично відсутній рівень втрат на виході підсилювача.

3.3. Моделювання та оптимізація підсилювача в середовищі AWR Microwave Office

Отже, за розрахованими попередньо даними, високочастотний підсилювач має наступні параметри:

- Робочий діапазон частот – 1559-1610 МГц;
- Потужність підсилювача – 20 Вт;
- Узгодження за допомогою мікросмужкових чвертьхвильових трансформаторів;
- Компенсаційні ємності на вході та на виході – 18 пікофарад;
- Напруга живлення 32 В;
- Живлення каналу транзистора – 2,167 В.

Структурна схема підсилювача, розроблена в середовищі AWR Microwave Office, показана на рисунку 3.6.

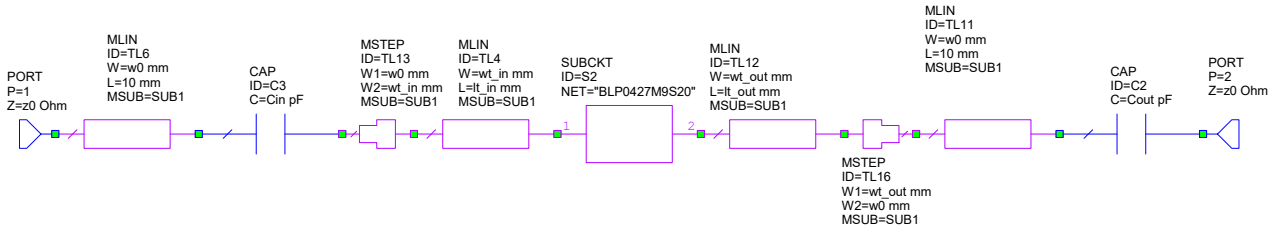


Рисунок 3.6 – Структурна схема високоефективного підсилювача потужності сигналів GNSS.

Схема включає в себе вхідний та вихідний роз'єми, розділювальні ємності, мікросмужкові трансформатори на вході та виході схеми і підсилювальний каскад на базі польового транзистора. Номінали напруг живлення було обрано таким чином, щоб забезпечити максимально енергоефективний режим роботи підсилювача.

Принципова схема каскаду транзистора BLP0427M9S20Z показана на рисунку 3.7.

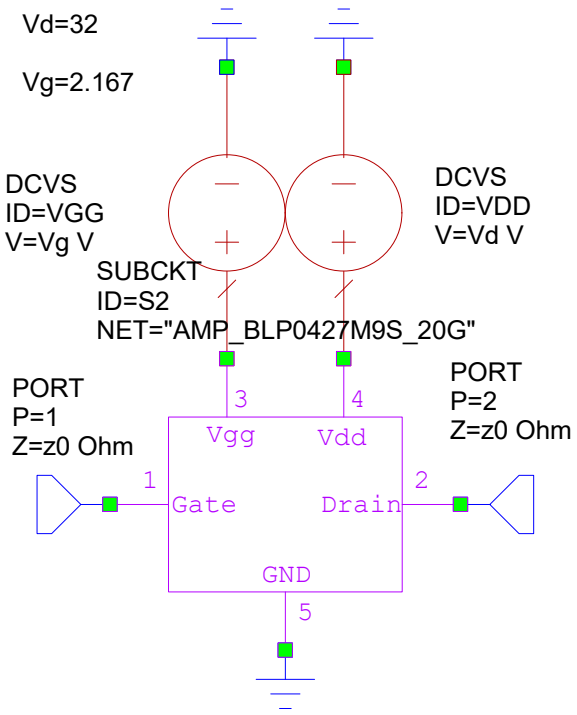
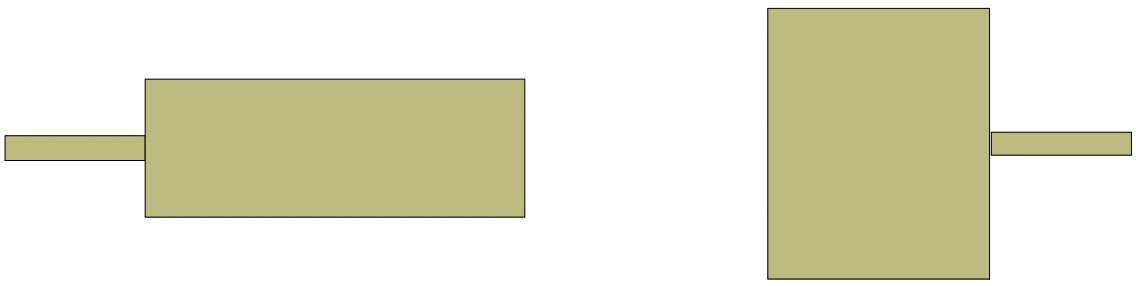


Рисунок 3.7 – Принципова схема живлення транзистора в підсилювачі.

Напруга зміщення, що подається на затвор транзистора, реалізується за допомогою реактивних елементів, а саме індуктивності.

Мікросмужкові вхідний та вихідний трансформатори проілюстровані на рисунку 3.8.



а б

Рисунок 3.8 – Мікросмужкові трансформатори, розроблені для підсилювача сигналів GNSS: а – вхідний трансформатор; б – вихідний трансформатор.

Індуктивність, за допомогою якої реалізовано живлення польового транзистора, зображено на рисунку 3.9.

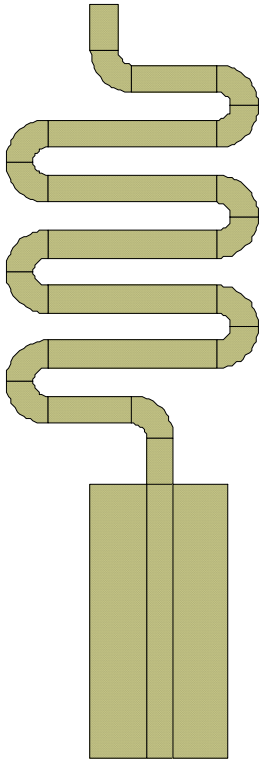


Рисунок 3.9 – Мікросмужкова катушка індуктивності.

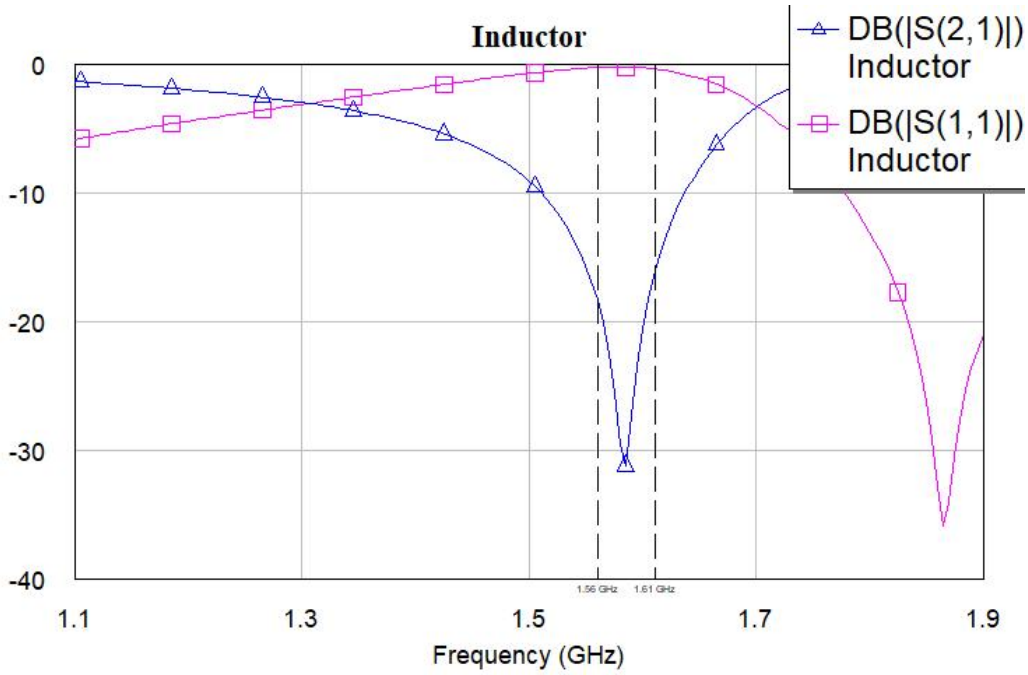


Рисунок 3.10 – S-параметри індуктивності.

Під час моделювання параметрів катушки було з’ясовано, що рівень теплових втрат на центральній частоті становить -31 дБ, що дозволяє використовувати катушку в якості високоефективного елемента підсилювача.

Для отримання результатів моделювання вхідних параметрів підсилювача в середовищі AWR Microwave Office його було представлено в якості двохполюсника.

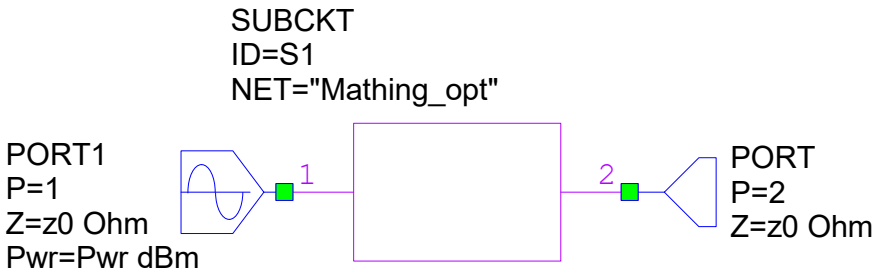


Рисунок 3.11 – Представлення підсилювача у вигляді двохполюсника.

Необхідно порівняти попередньо розраховані параметри підсилювача, що не містить оптимізації за допомогою ємностей та індуктивності, із необхідними реально для оптимізації схеми.

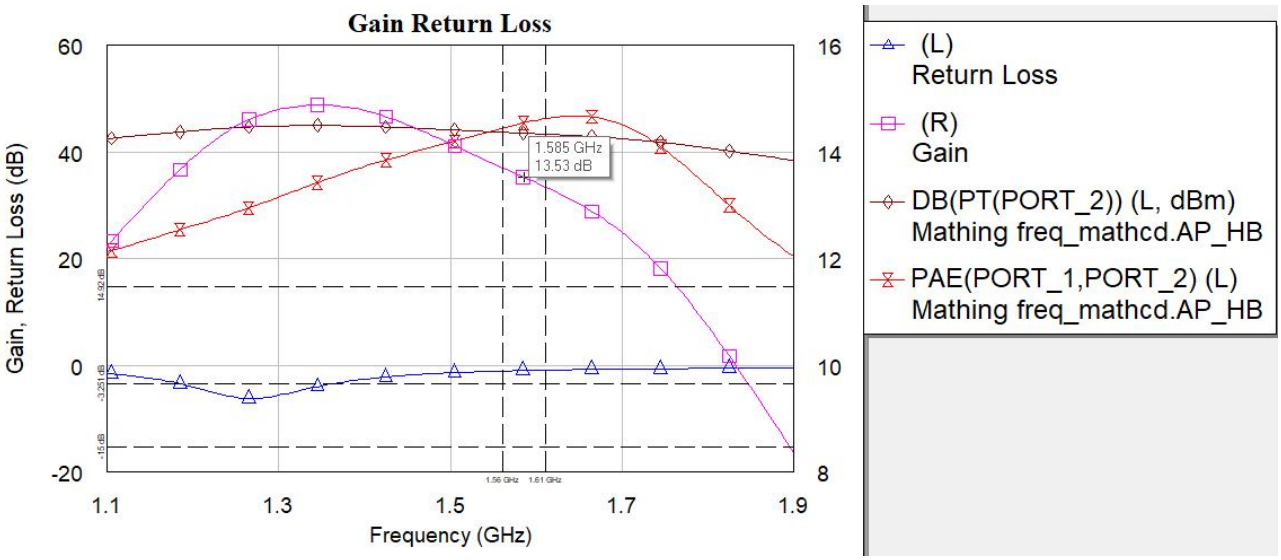


Рисунок 3.12 – Попередньо розраховані параметри підсилювача.

Як видно з рисунку 3.12, коефіцієнт підсилення схеми становить 13,53 децибел на центральній частоті, що попередньо задовольняє умови. Але при цьому ефективність роботи підсилювача становить PAE = 45,44%, що не задовольняє вимоги енергоефективності схеми. Також на мінімальному рівні вирішено проблему зворотних втрат.

Тому в схему було додано ємності та індуктивність, що проілюстровано на рисунках 3.6 та 3.9.

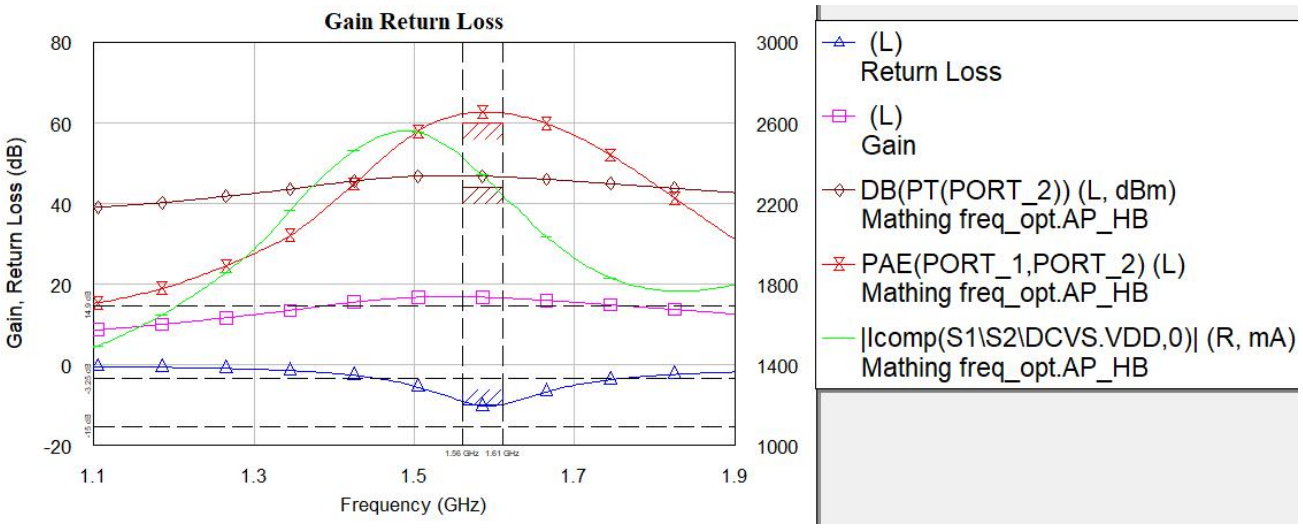


Рисунок 3.13 – Моделювання параметрів оптимізованої схеми підсилювача потужності.

Як видно з рисунку 3.13, маємо набагато кращі параметри роботи підсилювача. Зокрема, на центральній частоті:

- Підсилення становить 16,8 дБ, що більше ніж задовольняє вимоги;
- Зворотні втрати на рівні -10,2 дБ, що свідчить про ефективність роботи підсилювача і його низький КСХН;
- Коефіцієнт ефективності підсилювача PAE становить 62,6%, що задовольняє вимоги щодо енергоефективності схеми.
- Споживаний струм становить 2,3 А.

Як видно з рисунка 3.14, зміна параметрів підсилювача за зміни рівня потужності підсилення відбувається рівномірно.

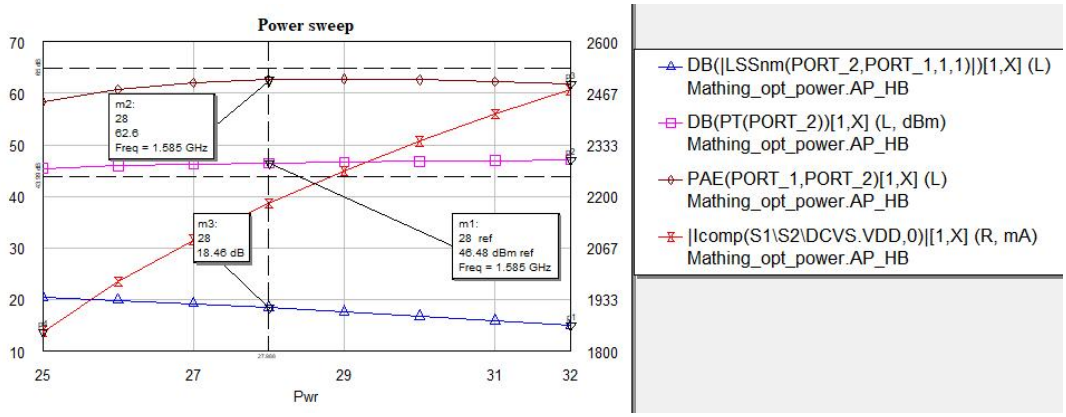


Рисунок 3.14 – Характер зміни параметрів від зміни потужності підсилювача.

4. РОЗРОБКА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Моделювання друкованої плати було проведено в середовищі DipTrace з врахуванням оптимізації роботи підсилювача.

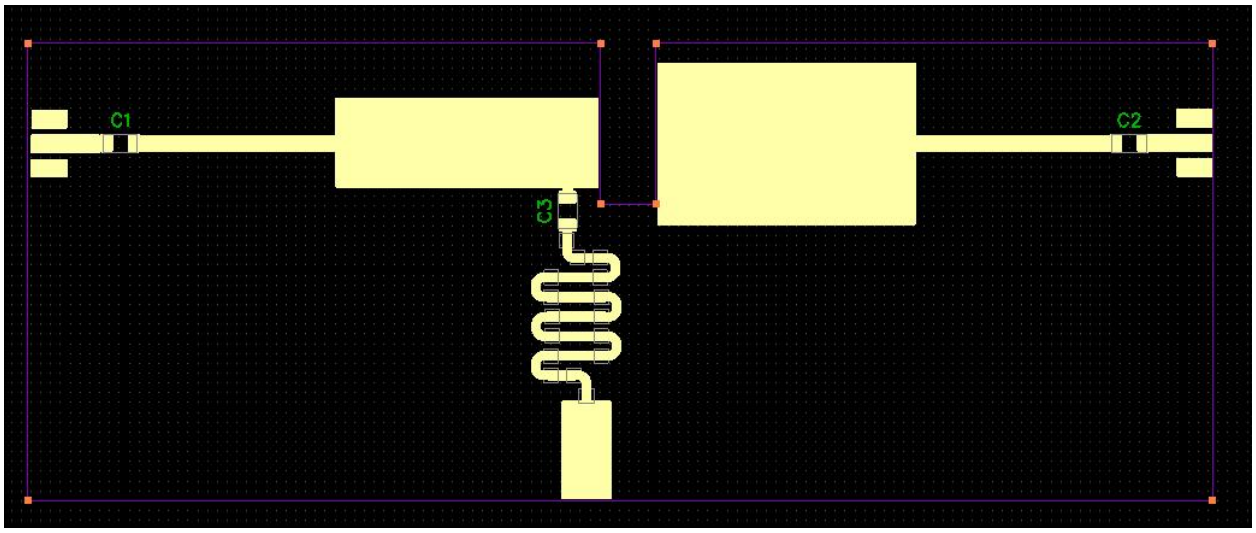


Рисунок 4.1 – Топологія друкованої плати.

Друкована плата містить трансформатори вхідний та вихідний і індуктивність, за допомогою якої реалізується напруга зміщення затвора польового транзистора. Також додані розділювальні ємності С1, С2 та блокуюча ємність С3.

Трьохвимірний макет представлено на рисунку 4.2.

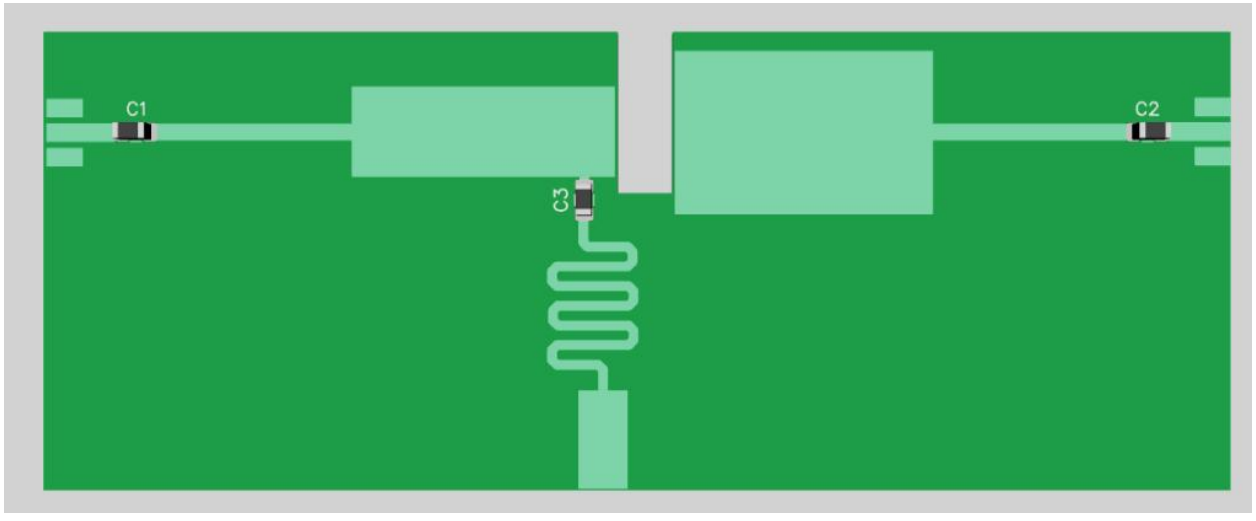


Рисунок 4.2 – Трьохвимірний макет друкованої плати високоефективного підсилювача сигналів GNSS.

5. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПІДСИЛЮВАЧА

Конструктивно підсилювач має характерну форму друкованої плати, розраховану на компенсацію перегріву транзистора. Також для забезпечення стабільної роботи до транзистора монтується радіатор.

Розміри транзистора зображені на рисунку 5.1.

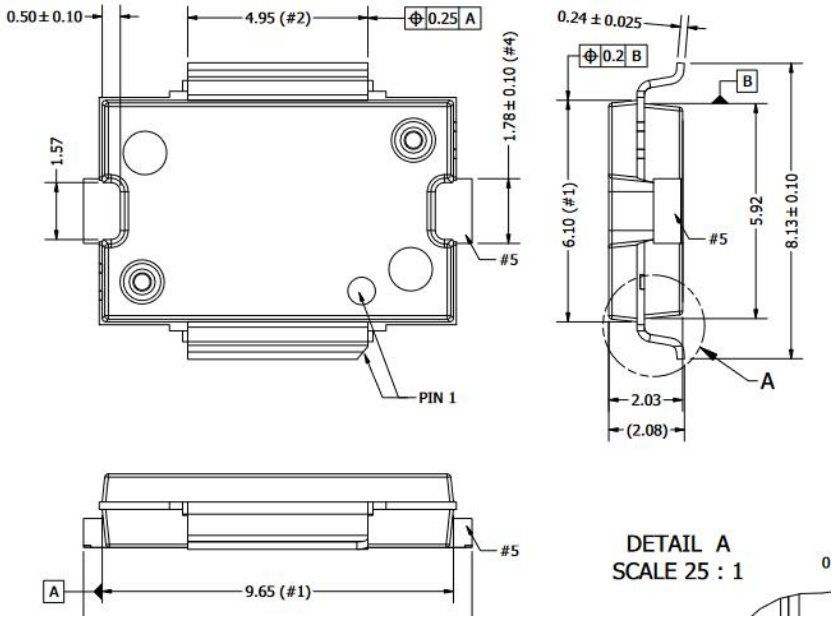


Рисунок 5.1 – Розміри транзистора підсилювача.

Для даного рішення на ринку наявні радіатори із аналогічними розмірами, тому було обрано існуючу модель [33].

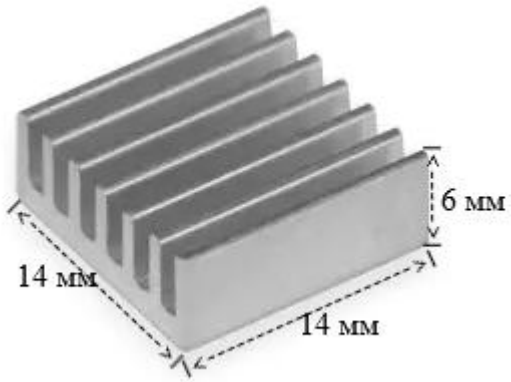


Рисунок 5.2 – Розміри терморегулюючого радіатора для транзистора.

Розміри радіатора: 14x14x6 міліметрів.

ВИСНОВКИ

Першочергово, розроблений підсилювач сигналів GNSS задовольняє вимоги щодо використаної потужності і тому є енергоефективним за своєю сутністю. Його функціональні можливості дозволяють застосування в якості доповнення до генератору шумових перешкод сигналам супутникової навігації та дозволяють збільшити дальність малопотужного генератора перешкод до двох кілометрів.

Оцінка енергоефективності полягає у порівнянні виданої елементом живлення потужності до схеми відносно потужності, яка відводиться на вихід підсилювача. Якісно даний показник визначається коефіцієнтом ефективності поглинання енергії, значення якого для розробленого підсилювача сягає 62,6 відсотків на центральній частоті 1575,42 мегагерц.

Теоретичні розрахунки було підтверджено і оптимізовано в процесі моделювання електронної системи; було з’ясовано, що лінія узгодження підсилювача практично не вносить втрат на центральній частоті, а використання висококласного транзистора зменшує ризики виходу підсилювача з ладу.

До того ж, було внесено конструктивні доповнення в кінцевий варіант підсилювача у вигляді розрізу друкованої плати для пасивної температурної регуляції із монтуванням алюмінієвого радіатора відповідного польовому транзистору розміра.

Варто зазначити, що дана розробка має практичну цінність в ході розвитку технологій радіоелектронної боротьби та концепції придушення систем навігації для забезпечення державної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. P. Papadimitratos, A. Jovanovic. Protection and Fundamental Vulnerability of GNSS, 2008. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/224342594_Protection_and_Fundamental_Vulnerability_of_GNSS (дата звернення 01.06.2024 р).
2. What are Global Navigation Satellite Systems? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss (дата звернення 01.06.2024 р). – Назва з екрану.
3. GNSS Spectrum Allocation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Infrastructure/Space-based/GNSS-Spectrum-Allocation.html (дата звернення 01.06.2024 р). – Назва з екрану.
4. Interface Specification IS-GPS-200. Global Positioning Systems Directorate, 2014. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf (дата звернення 02.06.2024 р).
5. GNSS applications and equipment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/gnss-applications-and-equipment (дата звернення 02.06.2024 р). – Назва з екрану.
6. Military Satellite Navigation Technology (GPS/GNSS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.defenseadvancement.com/suppliers/military-satellite-navigation-gps-gnss/ (дата звернення 03.06.2024 р). – Назва з екрану.
7. WING Rocket SATELLITE NAVIGATION SYSTEM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://patents.google.com/patent/RU170644U1/en (дата звернення 03.06.2024 р). – Назва з екрану.
8. Т. Сафронов. “Комета” – проблема для РЕБ України. 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://mil.in.ua/uk/articles/kometa-problema-dlya-reb-ukrayiny/ (дата звернення 03.06.2024 р).

9. The Use of GNSS in Drones [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://drones.measurusa.com/blogs/news/the-use-of-gnss-in-drones (дата звернення 03.06.2024 р). – Назва з екрану.
10. Advances in Electronic Warfare. Osnabrueck, 2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://osnadocs.ub.uni-osnabrueck.de/bitstream/urn:nbn:de:gbv:700-202111025533/1/Electronic%20Warfare_28_Oct_2021_Saalbach.pdf (дата звернення 04.06.2024 р).
11. Швець В. А. Необхідність захисту інформації глобальних навігаційних супутникових систем GPS, ГЛОНАСС, ГАЛІЛЕО [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/article/view/7306/8200 (дата звернення 04.06.2024 р).
12. How to Deal with GPS Jamming and Spoofing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.crfs.com/blog/how-to-deal-with-gps-jamming-and-spoofing (дата звернення 04.06.2024 р). – Назва з екрану.
13. A. Purwar. GPS Signal Jamming and Anti-jamming Strategy - A Theoretical Analysis / A. Purwar [та ін.] ; India Conference (INDICON), 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/316884392_GPS_Signal_Jamming_and_Anti-jamming_Strategy_-_A_Theoretical_Analysis (дата звернення 04.06.2024 р).
14. Ji Hyuk Jung. An Analysis of GPS Spoofing Attack and Efficient Approach to Spoofing Detection in PX4. / Ji Hyuk Jung [та ін.] ; IEEE Access, 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/379348886_An_analysis_of_GPS_spoofing_attack_and_efficient_approach_to_spoofing_detection_in_PX4 (дата звернення 05.06.2024 р).

15. Глушилка сигналу GPS у прикурювач USB (антитрекер, придушувач, Jammer) для авто [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mobileparts.com.ua/ua/p2180858460-modul-pomeh-jammer.html (дата звернення 05.06.2024 р). – Назва з екрану.
16. Модуль перешкод (jammer) 1.5 GHz (1550-1620 mHz) Gan 100W NJ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vazistaz.com.ua/drugie-avtotovary/glushilka-podavitel-signala-gps-jammer.html (дата звернення 07.06.2024 р). – Назва з екрану.
17. 800mW 30dBm Handheld GPS Signal Jammer 1500MHz For Conference Room [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.vbejammer.com/sale-36536685-800mw-30dbm-handheld-gps-signal-jammer-1500mhz-for-conference-room.html (дата звернення 07.06.2024 р). – Назва з екрану.
18. SDR-трансивер HackRF One [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://arduino.ua/ru/prod5198-hackrf-one (дата звернення 07.06.2024 р). – Назва з екрану.
19. Spoofing a Multi-Band RTK GNSS Receiver with HackRF One and GNSS Jammer. 2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://gpspatron.com/spoofing-a-multi-band-rtk-gnss-receiver-with-hackrf-one-and-gnss-jammer/#Spoofers_Configuration (дата звернення 08.06.2024 р). – Назва з екрану.
20. LimeGPS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://github.com/osqzss/LimeGPS (дата звернення 08.06.2024 р).
21. О. Бендак. Генератор постановки завад GNSS. Дипломний проєкт. / Бендак О.Р. ; К., 2023.
22. P. Steigenberger. Measuring GNSS Satellite Transmit Power. / P. Steigenberger [та ін.], 2017 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://files.igs.org/pub/resource/pubs/workshop/2017/W2017-PY08-02%20-%20Steigenberger.pdf (дата звернення 09.06.2024 р).

23. GPS (Navstar) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/navstar.htm (дата звернення 09.06.2024 р). – Назва з екрану.
24. Антена 1575,42МГц, 5dBi. BLUEBIRD ANT.GPS.FAKRA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/antena-1575-42mhts-5dbi-bluebird-ant-gps-fakra_73403.html (дата звернення 09.06.2024 р). – Назва з екрану.
25. The Antenna [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1783 (дата звернення 10.06.2024 р). – Назва з екрану.
26. Glossary Definition for Power Added Efficiency [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.archive.org/web/20110714055235/http://www.maxim-ic.com/glossary/definitions.mvp/term/power-added-efficiency-pae/gpk/1010 (дата звернення 10.06.2024 р). – Назва з екрану.
27. MOSFET Amplifiers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.allaboutcircuits.com/video-lectures/mosfet-amplifiers/ (дата звернення 11.06.2024 р). – Назва з екрану.
28. J. Pritiskutch, B. Hanson. Understanding ldmos device fundamentals. / Hanson B., Pritiskutch J. ; STMicroelectronics, 2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00004124-understanding-ldmos-device-fundamentals-stmicroelectronics.pdf (дата звернення 11.06.2024 р).
29. BLP0427M9S20Z [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.digikey.com/en/products/detail/ampleon-usa-inc/BLP0427M9S20Z/8637954?WT.z_cid=sp_1603_buynow&s=N4IgTCBcDaIEIBkAKAGALGA7AWQJwGUwUAtEAXQF8g (дата звернення 11.06.2024 р). – Назва з екрану.

30. BLP0427M9S20 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ampleon.com/products/general-purpose-wideband/32-v/BLP0427M9S20.html (дата звернення 11.06.2024 р). – Назва з екрану.
31. BLP0427M9S20; BLP0427M9S20G. Product data sheet. / Ampleon, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ampleon.com/documents/data-sheet/BLP0427M9S20_0427M9S20G.PDF (дата звернення 11.06.2024 р).
32. RO4350B™ Laminates [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4350b-laminates (дата звернення 11.06.2024 р). – Назва з екрану.
33. Радіатор охолодження алюмінієвий 14 х 14 х 6 мм [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://prom.ua/p1880176905-radiator-ohlazhdeniya-alyuminievyj.html (дата звернення 12.06.2024 р). – Назва з екрану.

ДОДАТОК А ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ПОГОДЖЕНО	ЗАТВЕРДЖЕНО
керівник дипломного проєкту	завідувач кафедри радіотехнічних систем
Асистент Романенко Т.В.	Д.т.н., професор Жук С.Я.
_____ _____	_____ _____
(підпис) (дата)	(підпис) (дата)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ

Підсилювач сигналів GNSS з високою ефективністю

GNSS signal amplifier with high efficiency

Київ 2024

Назва КР

– Підсилювач сигналів GNSS з високою ефективністю

Шифр

– 464114

Виконавець КР

– Бойко Данило гр. РС-01

Виробник

– (компанії у яких буде замовлятися друкована плата)

Мета виконання КР і призначення продукції

– Створення високоефективного підсилювача сигналів глобальної супутникової навігації.

Склад продукції

– Друкована плата, на якій розміщено рішення підсилювача сигналів GNSS; акумуляторні батареї; вібраторна антена.

Технічні вимоги

Вимоги життєздатності до зовнішніх впливів і чинників

– Функціювання приладу передбачає, що експлуатація приладу буде відбуватись у відкритий місцевості на стаціонарній платформі. Не допускати потрапляння вологи, бруду, пилу на поверхню приладу.

– Прилад є малорозмірним, тому передбачене мобільне транспортування.

Вимога надійності

– Час напрацювання на відмову повинен становити не менше 3 годин.

Вимоги до конструкції

– Ударостійкий до падіння із невеликої висоти
– Невеликі габарити пристрою
– Простота роботи і підключення пристрою
– Стійкість до умов перепадів температур

Вимоги до технологічності

– Корпус повинен бути максимально доступний для ремонту в разі виходу пристрою з ладу.
– Роз’єми коаксіального типу не повинні виходити за межі корпусу пристрою і мати механічну стійкість під час встановлення антени та інших пристроїв до підсилювача

Вимоги щодо метрологічного забезпечення виробництва та контролю параметрів продукції

– Для виготовлення друкованої плати можуть обиратися виробництва, що здатні виготовляти продукцію III класу точності.

Вимоги до дизайну і ергономіка

– Корпус повинен мати монолітну пластикову структуру, зручну для монтування і бути забарвленим в захисні кольори.

Вимоги до експлуатації, зручності технологічного обслуговування та ремонту

– Можливість розборки корпусу, заміни транзистора і радіатора.

Вимоги взаємозамінності

– Пристрій виготовляється з доступних на ринку компонентів, що дозволяє проводити вчасний і недорогий ремонт пристрою

Технічно економічні вимоги

– Пристрій не є складним, при цьому його виробник повинен використовувати транзистор визначеної моделі, що є доступним на ринку.

Вимоги до транспортування та зберігання

– Транспортування пристрою може здійснюватись за допомогою будь-яких транспортних засобів

Виконавець Бойко Данило _____

ДОДАТОК Б

$f0 := 1575.42 \cdot 10^{9}$ $\lambda 0 := \frac{c}{f0} = 1.903 \times 10^{-4}$ $c := 2.99792458 \times 10^{8}$

$Pprd\_mW\_n := 20000$ $K := 1.380649 \cdot 10^{-23}$

$Pprd\_n := 10 \cdot \log\left(\frac{Pprd\_mW\_n}{1000}\right) = 13.01$

$\Delta fn := 51$ $Gprd\_n := 2.14$ $R\_n := 2$

$\Delta fs := 1.023$ $Gprm := -20$

$Pprm\_n := Pprd\_n + Gprm + Gprd\_n - 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda 0}\right) - 20 \cdot \log(R\_n) - 10 \log\left(\frac{\Delta fn}{\Delta fs}\right) = -124.243$

$Pprm\_dBm\_n := Pprm\_n + 30 = -94.243$

$Pprm\_mW\_n := 10^{\frac{Pprm\_dBm\_n}{10}} = 3.764 \times 10^{-10}$

$D := Pprm\_dBm\_n - Pprm\_dBm\_s = 20.26$

$Gprm\_s := 5$ $R\_s := 20200$ $EIRPsat := 33$

$Pprm\_s := EIRPsat + Gprm\_s - 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda 0}\right) - 20 \cdot \log(R\_s) = -144.503$

$Pprm\_dBm\_s := Pprm\_s + 30 = -114.503$

$Pprm\_mW\_s := 10^{\frac{Pprm\_dBm\_s}{10}} = 3.546 \times 10^{-12}$

$z0 := 50$ $\varepsilon := 3.48$ $d := 0.762$ $j := \sqrt{-1}$ $c := 2.9979246 \cdot 10^{8}$

$f0 := 1575.42 \cdot 10^{6}$ $\lambda 0 := \frac{c}{f0}$ $zs := 1$ $zl := 3$

$fmin := 1559 \cdot 10^{6}$

$fmax := 1610 \cdot 10^{6}$

$\varepsilon eff(w) := \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 10 \cdot \frac{d}{w}}}$

$w0 := d \cdot \frac{300 - z0 \cdot \sqrt{\varepsilon}}{z0 \cdot \sqrt{\varepsilon}} = 1.689$

$zts := \sqrt{z0 \cdot zs} = 7.071$

$wts := d \cdot \frac{300 - zts \cdot \sqrt{\varepsilon}}{zts \cdot \sqrt{\varepsilon}} = 16.568$

$\lambda gts := \frac{\lambda 0}{\sqrt{\varepsilon eff(wts)}} = 0.105$ $\frac{\lambda gts \cdot 10^{3}}{4} = 26.323$

$$\lambda 0(f) := \frac{c}{f} \qquad \beta(f, w) := \frac{2\cdot\pi}{\lambda 0(f)}\cdot\sqrt{\varepsilon eff(w)}$$

$$zvhs(f) := zts\cdot\frac{zs + j\cdot zts\cdot\tan\left(\beta(f, wts)\cdot\frac{\lambda gts}{4}\right)}{zts + j\cdot zs\cdot\tan\left(\beta(f, wts)\cdot\frac{\lambda gts}{4}\right)}$$

$$Gs(f) := \frac{z0 - zvhs(f)}{z0 + zvhs(f)} \quad KCBs(f) := \frac{1 + |Gs(f)|}{1 - |Gs(f)|} \quad KCBs(fmax) = 1.269$$

$$ztl := \sqrt{z0\cdot zl} = 12.247$$

$$wtl := d\cdot\frac{300 - ztl\cdot\sqrt{\varepsilon}}{ztl\cdot\sqrt{\varepsilon}} = 9.244$$

$$\lambda gtl := \frac{\lambda 0}{\sqrt{\varepsilon eff(wtl)}} = 0.107 \qquad \frac{\lambda gtl\cdot 10^3}{4} = 26.77$$

$$zvhl(f) := ztl\cdot\frac{zl + j\cdot ztl\cdot\tan\left(\beta(f, wtl)\cdot\frac{\lambda gtl}{4}\right)}{ztl + j\cdot zl\cdot\tan\left(\beta(f, wtl)\cdot\frac{\lambda gtl}{4}\right)}$$

$$Gl(f) := \frac{z0 - zvhl(f)}{z0 + zvhl(f)} \quad KCBl(f) := \frac{1 + |Gl(f)|}{1 - |Gl(f)|} \quad KCBl(fmax) = 1.141$$