



ПОБУДОВА МАЛОГАБАРИТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

С. Фабіровський, В. Сторож, І. Пруднус, І. Герей

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Сергій Фабіровський (e-mail: serhii.y.fabirovskiy@lpnu.ua).

(Подано 26 липня 2022)

У статті розроблено пристрій формування завад для подавлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів. Проаналізовано сучасні пристрої та системи для створення завад, засоби радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам, вказано їхні особливості та принцип функціонування. Обґрунтовано актуальність цих пристроїв сьогодні. Розроблено малогабаритний пристрій для створення завад у діапазонах частот від 433МГц до 6 ГГц, синтезовано його структурну та принципову електричну схеми, спроектовано друковану плату цього пристрою на сучасній елементній базі. Розроблено, виготовлено та протестовано передавальну антену для такого пристрою.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба; подавлення; GPS; генератор, керований напругою.

УДК: 654.16

1. Вступ

У сучасному світі засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) є одними з найважливіших систем для боротьби з тероризмом та іншими видами агресивних дій. Головною перевагою таких засобів є можливість дистанційного впливу на радіотехнічні засоби противника – виведення з ладу їх компонентів або придушення ділянки спектра, яку використовує противник.

Дослідження у цій сфері завжди буде актуальним, оскільки змагання між системами радіотехнічного подавлення та радіотехнічного захисту є постійним і результат – постійне удосконалення цих систем. Особливо актуальні ці дослідження в умовах воєнних дій. Удосконалення полягає у поліпшенні тактико-технічних характеристик, наприклад, збільшенні потужності передавачів, що збільшує, водночас, віддаль дії системи РЕБ; також удосконалення систем приводить до зменшення їх маси та габаритів та покращення інших тактико-технічних характеристик. Використання якісних систем РЕБ дає змогу знизити кількість втрат як у техніці, так і в особовому складі.

У роботі проаналізовано сучасні пристрої та системи для створення завад, засоби радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам, вказано їхні особливості та принцип функціонування. Обґрунтовано актуальність цих пристроїв сьогодні. Розроблено малогабаритний пристрій для формування завад у діапазонах частот від 433МГц до 6 ГГц. Синтезовано його структурну та принципову електричну схеми, створено друковану плату, розроблено, виготовлено та протестовано передавальну антену для цього пристрою.

2. Аналіз та постановка задачі


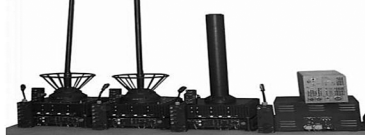
Безпілотні літальні апарати (БПЛА) противник широко використовує на території України, особливо на лінії фронту, для проведення розвідувальних та диверсійних операцій, а саме коригування вогню артилерії, виявлення опорних позицій, атак та підпалювання складів із озброєнням та боеприпасами. Тому є підстави для висновку, що розроблення засобів, які б могли унеможливити функціонування БПЛА, є актуальними. Системи, які виконують такі завдання, називають системами радіоелектронного придушення (РЕП) [1–3].

Нині великого поширення набули дрони любительського рівня, зокрема компанії DJI. Вони характеризуються порівняно великою віддаллю польоту, сучасною системою відеозв'язку та радіоканалом. Такі характеристики дають змогу створювати порівняно дешеві ударні БПЛА, прикріплюючи до них боеприпаси. Тому очевидно, що є потреба у пристроях, які б дали змогу боротися з такими ударними і розвідувальними БПЛА. В статті описано розроблення такого пристрою РЕП.

Основні недоліки наявних систем РЕП – обмежений частотою 3 ГГц діапазон подавлення та значні масо-габаритні характеристики. В [1] описано дві системи, які використовують для подавлення БПЛА. В табл. 1 наведено їх характеристики.

Таблиця 1

Параметри розглянутих засобів РЕП

Характеристика	ЕЈАВ	МПП-1
Фото пристрою		
Робочі частоти, ГГц	0,020÷2,438	0,020–2
Потужність сигналу завади, Вт	10, 20, 30	більше ніж 10
Мінімальна дальність подавлення, м	150	більше ніж 500

На рис. 1 та рис. 2 наведено графіки залежностей спектральної щільності випромінювання та мінімальної віддалі подавлення для обох пристроїв.

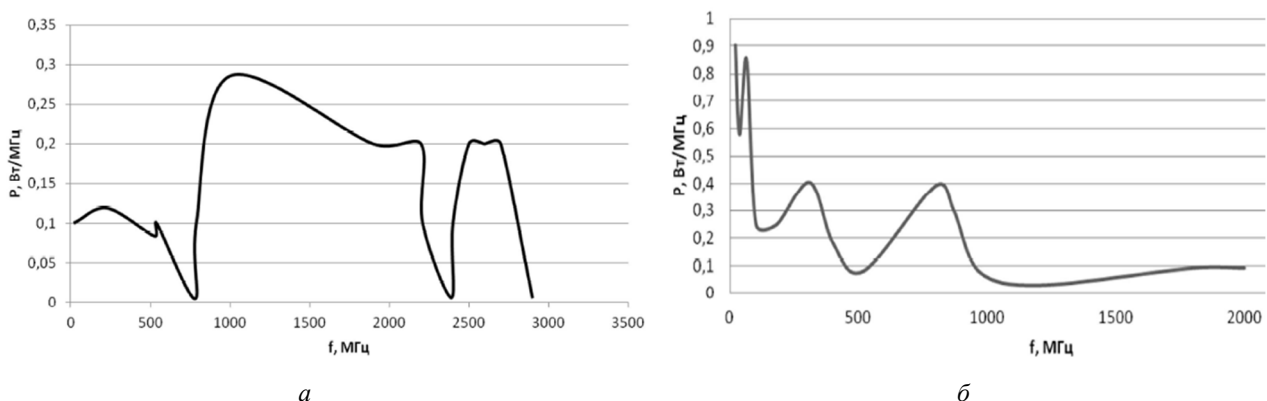


Рис. 1. Залежності спектральної щільності випромінювання: а – ЕЈАВ; б – МПП-1 [1]

Із залежностей, наведених на рис. 1 та 2, видно, що ці пристрої мають нерівномірну характеристику формування завад, обмежений частотний діапазон, на деяких частотах практично немає подавлення. У розглянутих пристроїв низька спектральна щільність випромінювання на частотах 2400–

2500 МГц, на яких працюють канали керування, телеметрії та відеопередавання з борту БПЛА, до того ж вони не подавляють БПЛА, які працюють у діапазоні частот понад 3000 МГц.

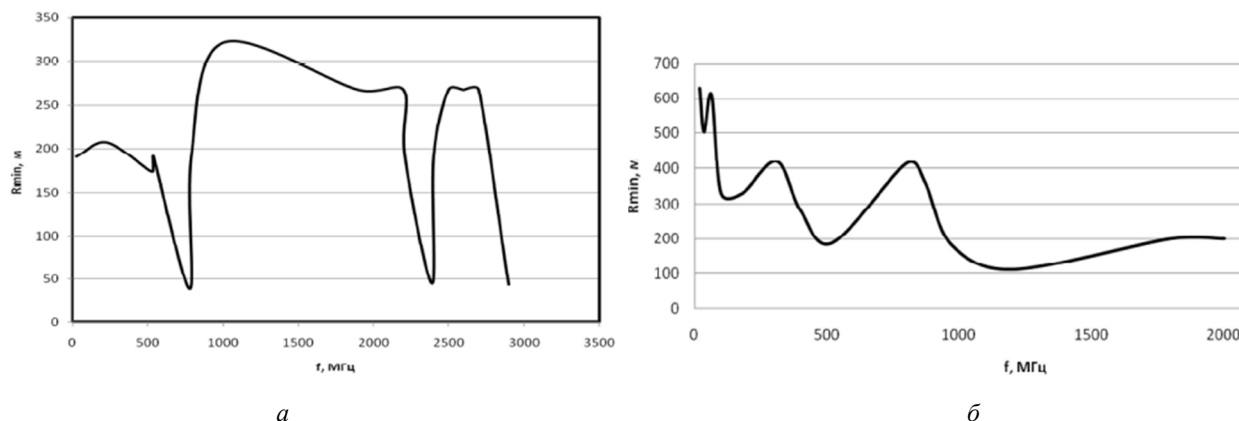


Рис. 2. Залежності мінімальної дальності подавлення від частоти: а – EJAB; б – МПП-1 [1]

Тому є доцільне розроблення малогабаритного пристрою для створення завад у діапазонах частот від 433 МГц до 6000 МГц, який унеможливував би функціонування малорозмірних БПЛА на відстані понад 500 м.

3. Аналіз використуваних безпілотними літальними апаратами частотних діапазонів

Засоби радіоелектронного подавлення характеризуються такими головними тактичними та технічними характеристиками: робочий діапазон частот, вихідна потужність завади, яка впливає на мінімальну віддаль подавлення. Вище зроблено висновок, що розроблюваний пристрій доцільно створювати для роботи в діапазоні від 433 МГц до 6000 МГц. Для підвищення ефективності розроблюваного пристрою проаналізуємо частотні діапазони, використувані безпілотними літальними апаратами. Підвищення ефективності полягає у створенні завад саме на ділянках частот, які використуються більшістю БПЛА, а не у всьому вищезгаданому діапазоні частот.

Часто управління та передавання телеметричних даних здійснюються у частотних діапазонах 433–434,79 МГц і 868–912 МГц. Пристрої, які передають телеметричну інформацію у вказаних діапазонах частот, зображено на рис. 3, їх вихідна потужність 0,1–1 Вт [4].

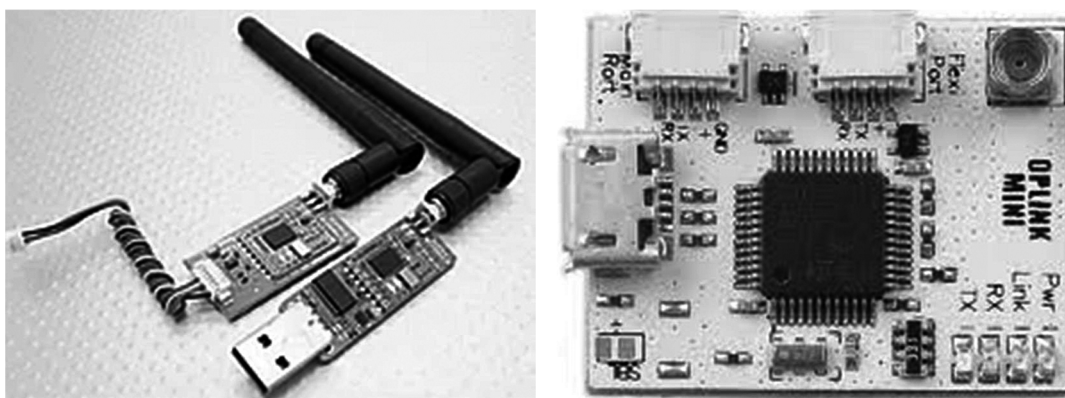


Рис. 3. Засоби телеметрії

Ключовою системою кожного БПЛА є навігаційна система, за допомогою якої він орієнтується в просторі та може виконувати польотні завдання. На рис. 4 зображено частотний план систем глобальної навігації GPS, ГАЛІЛЕО, ГЛОНАСС [5].

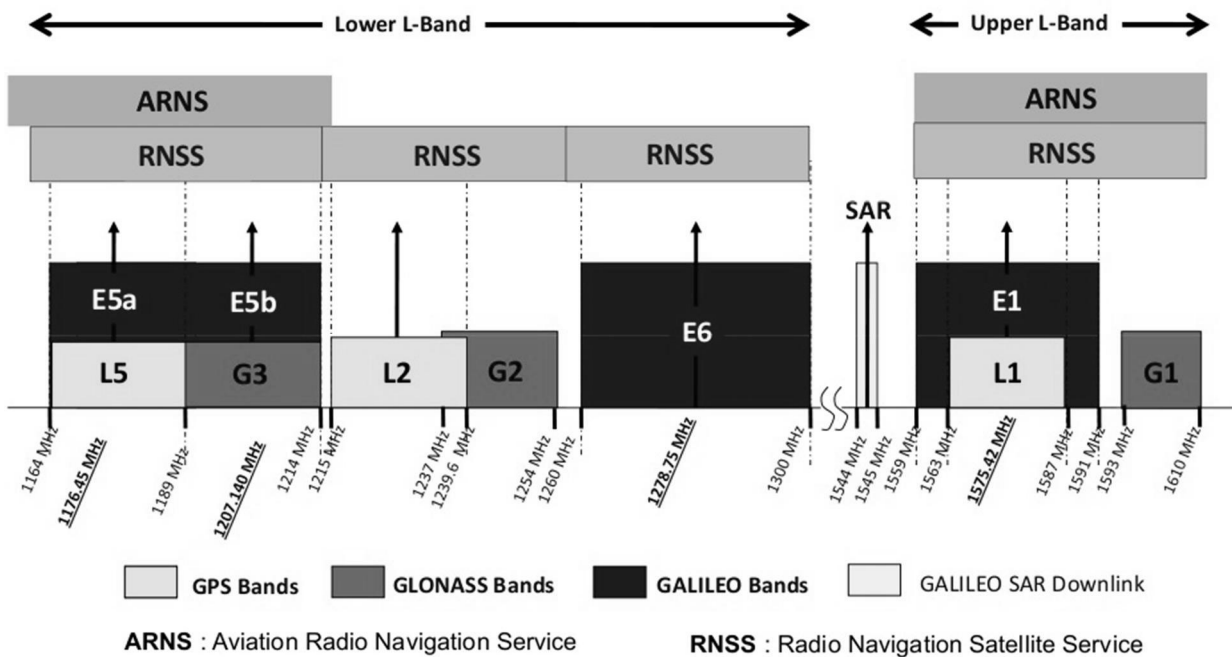


Рис. 4. Частотний план систем глобальної навігації [5]

Як видно з рис. 4, частоти, які використовують системи глобальної навігації, містяться у двох діапазонах 1164–1300 МГц і 1559–1610 МГц. Якщо згенерувати заваду достатнього рівня у цих діапазонах, ворожий БПЛА втратить можливість визначати своє місцезнаходження за допомогою цих систем навігації, що призведе до аварійного приземлення, повернення або аварії.

Для функціонування БПЛА також використовується частотний діапазон 2400–2500 МГц. Через цей канал відбуваються керування, передавання телеметричних даних та цифрового відео-сигналу з борту безпілотного літального апарата. Потужність сигналу для малорозмірних БПЛА, як правило, не перевищує 0,4÷1 Вт.

Останнім часом широко використовуються пристрої радіозв'язку, які працюють у діапазоні частот 5600–5900 МГц. На цих частотах виконуються ті самі функції, що і в діапазоні 2400–2500 МГц, крім того, відеосигнал може бути переданий з вищою роздільною здатністю, оскільки ширина каналу більша, що поліпшує якість розвідувальної інформації. Перевагою використання цього діапазону є також те, що збільшення частоти дає змогу зменшити масо-габаритні розміри антен, а це важливо для малорозмірних БПЛА. Але є і недоліки: підсилювачі потужності для таких частот мають невеликий коефіцієнт корисної дії – близько 25 % і відбувається послаблення електромагнітних хвиль.

4. Розрахунки потужностей завад для окремих каналів подавлення

Одним із основних параметрів пристроїв подавлення функціональних можливостей БПЛА є мінімальна віддаль, на якій забезпечується подавлення окремих каналів зв'язку та навігації. Виконаємо розрахунок мінімальної потужності передавача завад у відповідних частотних діапазонах для захисту зони об'єкта з радіусом один кілометр.

Спочатку виконаємо розрахунки для каналів навігації. Із попереднього аналізу випливає: для того, щоб подавити всі наявні навігаційні супутникові системи, повинна бути сформована завада в двох спектральних діапазонах 1164–1300 МГц і 1559–1610 МГц. У [6] показано, що система ГЛОНАСС теоретично характеризується високим рівнем сигналу, тому в розрахунках використовують її параметри, наведені в табл. 2.

Спочатку виконаємо розрахунки для діапазону L1 – 1559–1610 МГц. Як видно з табл. 2, система навігації дає можливість визначати положення з двома різними точностями – з низькою (30 м) та високою (1–7 м). Для цього всі супутники випромінюють два сигнали – С/А код для низької точності та Р(У) для високої точності, відповідно. Щоб подавити сигнал С/А код, відношення завади/сигнал повинно бути більшим за 22 дБ, а для подавлення Р(У) – має перевищувати 34 дБ [8].

Таблиця 2

Основні характеристики супутникової системи навігації ГЛОНАСС [7]

Параметр	ГЛОНАСС
Точність визначення координат (диференційний режим), м,	30 (1–7)
Метод навігації	Псевдовіддалемірний
Характеристики супутникового групування	
Кількість орбітальних площин	3
Діапазон висот орбіт, км	18840–19940
Випромінювана потужність, Вт L1	64
L2	9
Коефіцієнт підсилення антен, дБ L1	10–12
L2	9–11
Поляризація випромінювання	Колова (правостороння)
Структура і параметри радіонавігаційних сигналів	
Розділення каналів	FDMA (частотне)
Ширина спектра радіосигналу для коду С/А/Р(У)	1,022/10,22 МГц
Вид маніпуляції	BPSK

Як відомо [9], мінімальна потужність завади $P_{з_мін}$ для подавлення каналів зв'язку та навігації визначається за формулою:

$$P_{з_мін} = K_n \frac{P_g G_g D_g^2 \Delta f_z}{D_z^2 \Delta F_{np} \nu_n G_z} \quad (1)$$

де K_n – коефіцієнт, який характеризує відношення завади/сигнал; P_g – потужність передавача сигналу, Вт; G_g – коефіцієнт підсилення передавальної антени, рази; D_g^2 – віддаль між оператором БПЛА (або супутником системи навігації) та БПЛА, м; G_z – коефіцієнт підсилення антени передавача завади, рази; D_z^2 – віддаль між передавачем завади та БПЛА м; ν_n – коефіцієнт, який враховує різницю між поляризаціями завади і сигналу; якщо вони збігаються, дорівнює одиниці, а якщо поляризації ортогональні, – нулю. Приймаємо для розрахунків $\nu_n = 0.5$; ΔF_{np} – ширина смуги пропускання приймача БПЛА, Гц; Δf_z – ширина спектра завади, Гц.

Приймаємо значення параметрів $G_z = 2$, $\Delta F_{np} = 1,022 \text{ МГц}$ – для сигналів С/А коду і $\Delta F_{np} = 10,22 \text{ МГц}$ для Р(У), $\Delta f_z = 51 \text{ МГц}$, $D_z = 1 \text{ км}$.

З отриманих залежностей (рис. 5) видно, що для подавлення сигналів С/А коду достатньо потужності передавача завад 100 мВт. Таке низьке значення потужності передавача завад пояснюється тим, що супутники систем навігації розташовані на дуже великій відстані від БПЛА – 19100 км. В результаті густина потоку потужності електромагнітного поля від них у точці приймання дуже мала.

Виконаємо розрахунки для визначення потужності передавача завади для подавлення сигналу системи глобальної навігації з $P(Y)$ кодом.

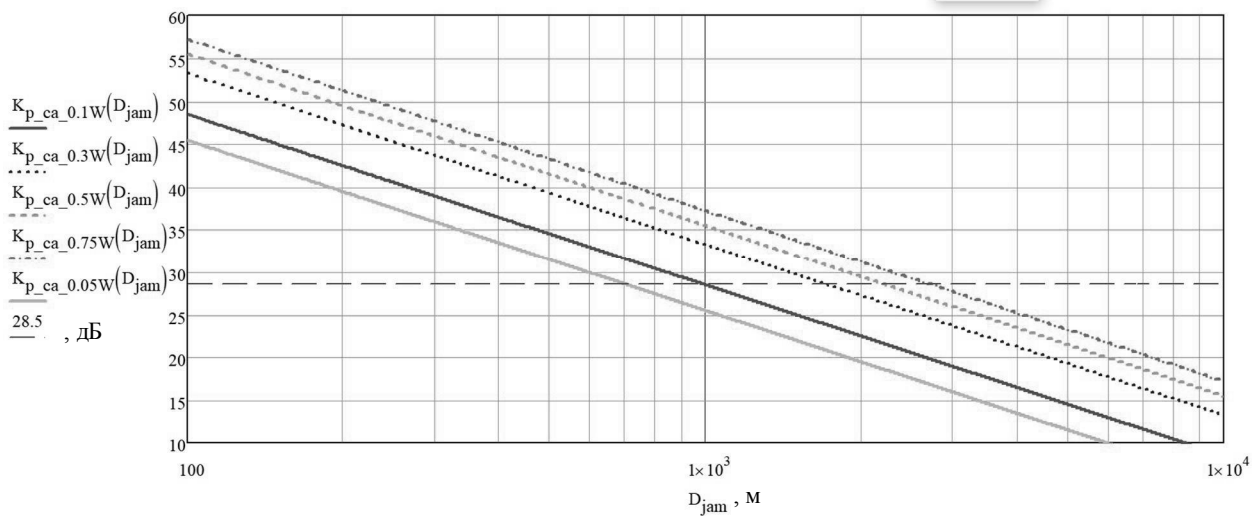


Рис. 5. Залежності відношення завада/сигнал від віддалі подавлення для різних потужностей передавача завади (50 мВт, 100 мВт, 300 мВт, 500 мВт, 750 мВт) (для С/А) (канал 1559–1610 МГц)

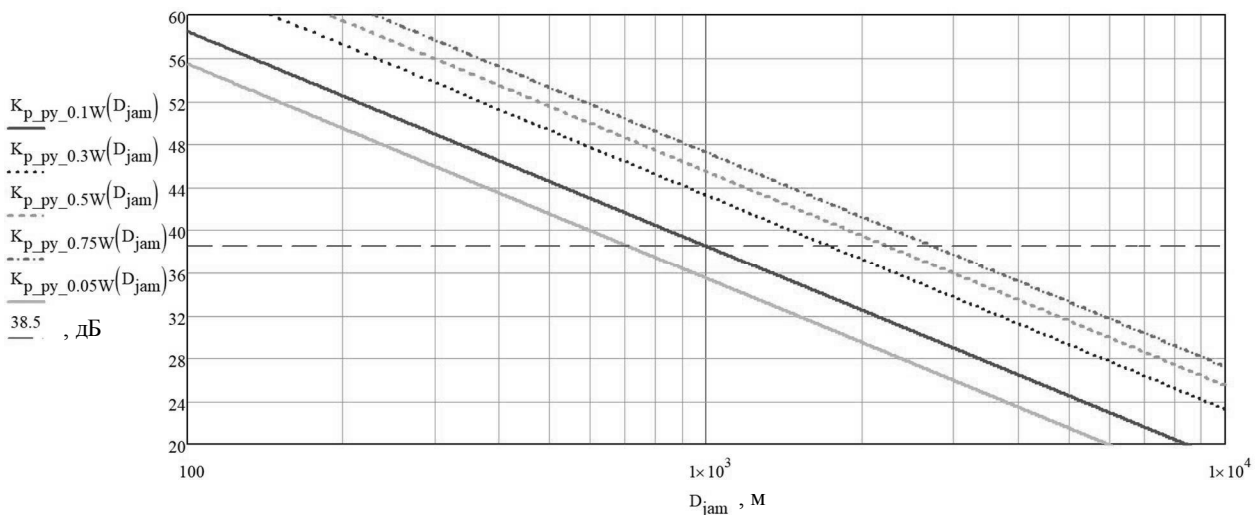


Рис. 6. Залежності відношення завада/сигнал від віддалі подавлення для різних потужностей передавача завади (50 мВт, 100 мВт, 300 мВт, 500 мВт, 750 мВт) (для P(Y)) (канал 1559–1610 МГц)

Отримані залежності, зображені на рис. 6, показують, що для подавлення сигналів $P(Y)$ коду 100 мВт потужності передавача завад також достатньо.

Із наведених вище розрахунків випливає, що для подавлення систем навігації, які працюють в діапазоні 1559–1610 МГц, достатньо випромінювати заваду з потужністю 100 мВт та шириною спектра 51 МГц.

На рис. 7 подано залежності відношення завада/сигнал від максимальної віддалі подавлення для діапазону 1162÷1300 МГц, визначені із використанням попередніх вхідних даних.

У такому разі достатньо потужності передавача завад 30–50 мВт для подавлення сигналів С/А коду.

На рис. 8 наведено залежності відношення завада/сигнал від віддалі подавлення для діапазону 1162÷1300 МГц у разі використання $P(Y)$ коду.

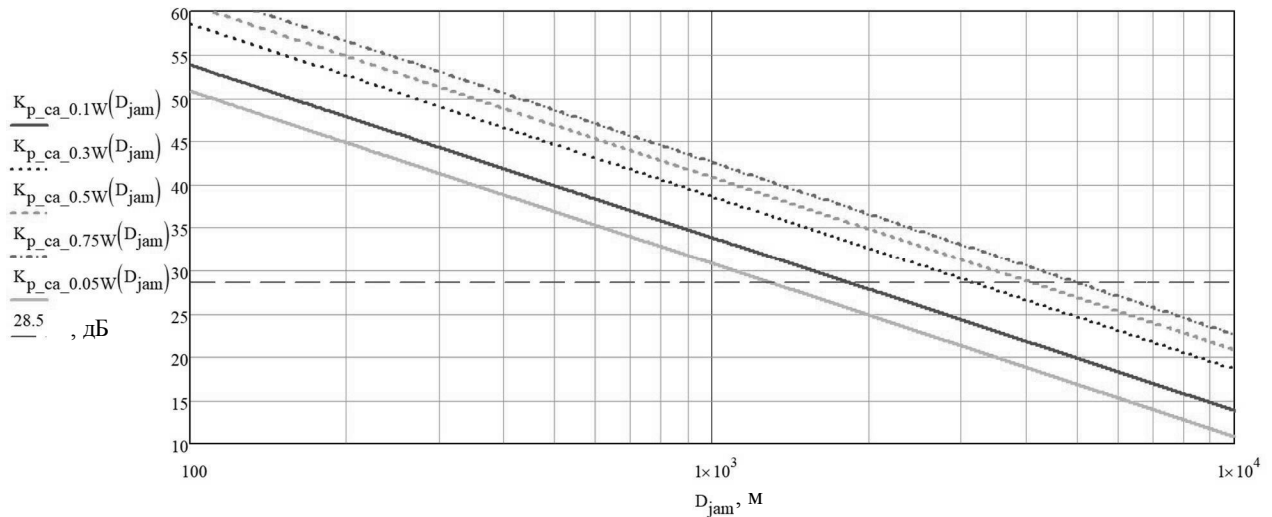


Рис. 7. Залежності відношення завада/сигнал від віддалі подавлення для різних потужностей передавача завади (50 мВт, 100 мВт, 300 мВт, 500 мВт, 750 мВт) (для C/A) (канал 1162–1300 МГц)

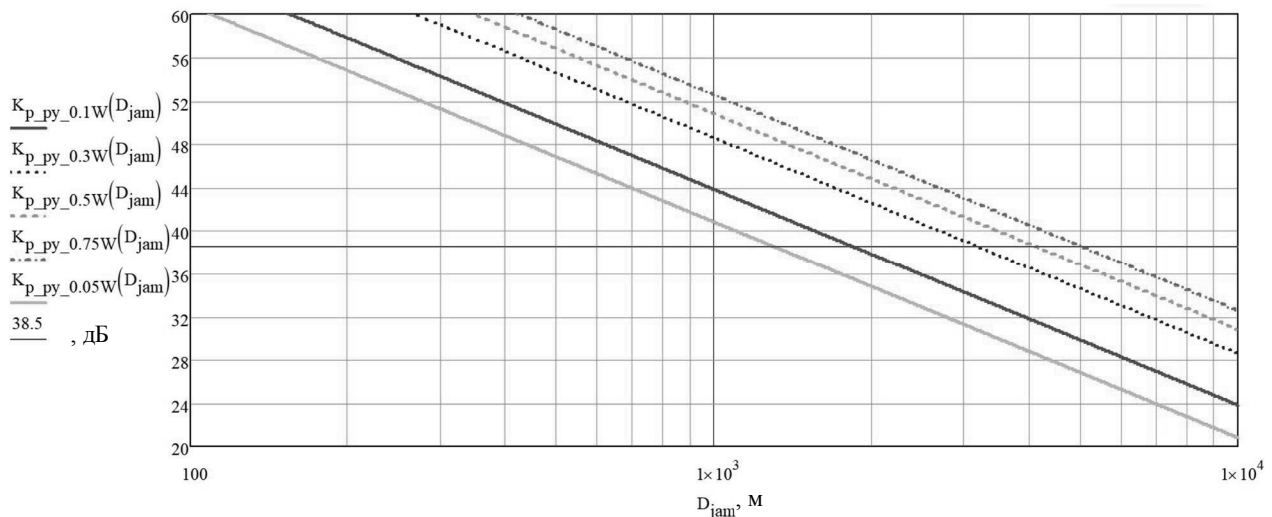


Рис. 8. Залежності відношення завада/сигнал від віддалі подавлення для різних потужностей передавача завади (50 мВт, 100 мВт, 300 мВт, 500 мВт, 750 мВт) (для P(Y)) (канал 1162–1300 МГц)

Отримані залежності показують, що для подавлення сигналів $P(Y)$ коду достатньо також 30–50 мВт потужності передавача завад.

Отже, виконавши розрахунки, можемо стверджувати, що для подавлення систем супутникової навігації необхідно сформувати завади у двох діапазонах: один діапазон 1559–1610 МГц із потужністю передавача завад 100 мВт, а другий – 1162–1300 МГц з потужністю передавача завад 30 мВт. Коефіцієнт підсилення антени передавача завад повинен бути не меншим, ніж 3 дБ.

Виконаємо розрахунок необхідної потужності сигналу завади для подавлення каналів радіозв'язку в діапазоні частот 2400–2500 МГц. Системи, які працюють у цьому діапазоні, характеризуються достатньо великою швидкістю передавання даних, що потрібно, наприклад, для передавання розвідувальної інформації у вигляді відеопотоку з борту БПЛА у цифровому вигляді. У [10] доведено, що такі системи перестають працювати за відношення сигнал/шум 4 дБ (рис. 9), якщо швидкість передавання інформації дорівнює 1 Мбіт/с, якої недостатньо для передавання якісного відеосигналу. Виконаємо розрахунки, аналогічні до попередніх.

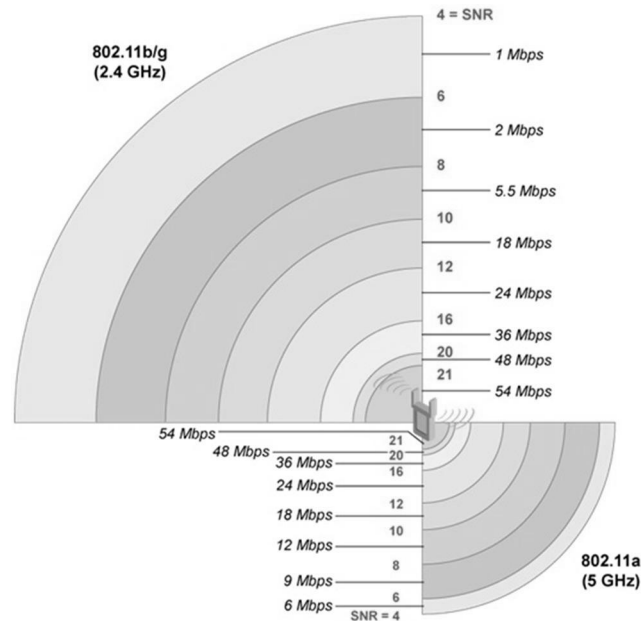


Рис. 9. Залежність швидкості передавання інформації по радіоканалу від відношення сигнал/шум [7]

Як БПЛА вибрано квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro [11], потужність передавача якого близька до 26 дБм (400 мВт). Для виконання розрахунків необхідно перевести значення відношення сигнал/шум у значення відношення завада/сигнал, оскільки воно є змінною у формулі (1). Відношення завада/сигнал дорівнює $K_n = -4\text{дБ} = 0.398$. Відстань між оператором з пультом управління і БПЛА прийнято 1 км.

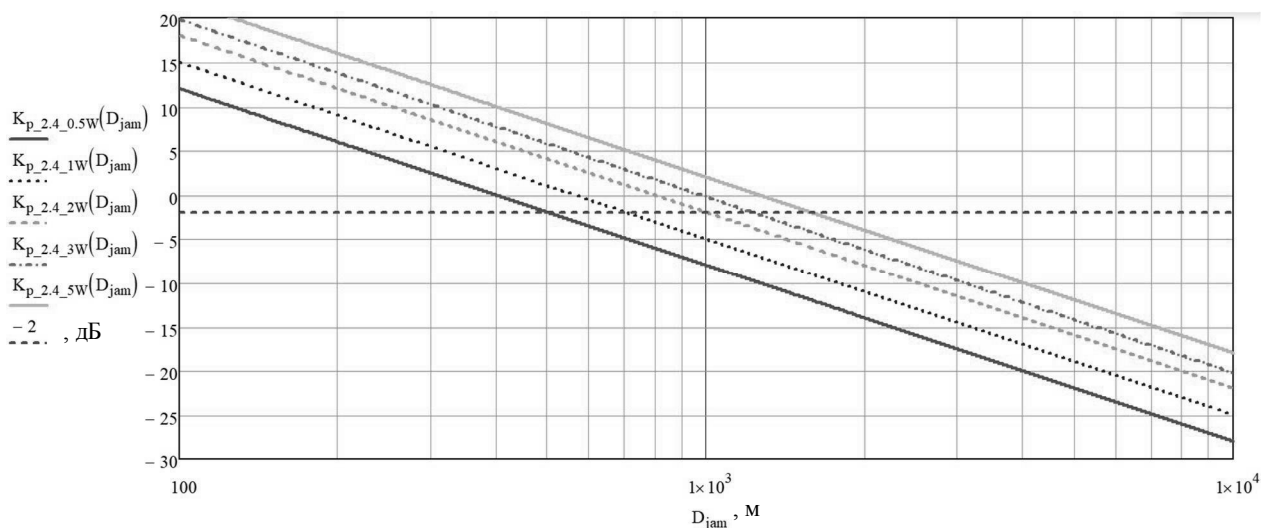


Рис. 10. Залежності відношення завада/сигнал від максимальної віддалі створення завади для різних потужностей передавача завади (0,5 Вт, 1 Вт, 2 Вт, 3 Вт, 5 Вт) (канал 2400–2500 МГц)

З рис. 10 видно, що для подавлення цього каналу БПЛА потрібна мінімальна вихідна потужність передавача завад – 2 Вт.

Квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro [11] також має інший канал зв'язку, який працює у діапазоні частот від 5,725 до 5,85 ГГц. Вихідна потужність передавача в цьому діапазоні становить також 26 дБм (400 мВт).

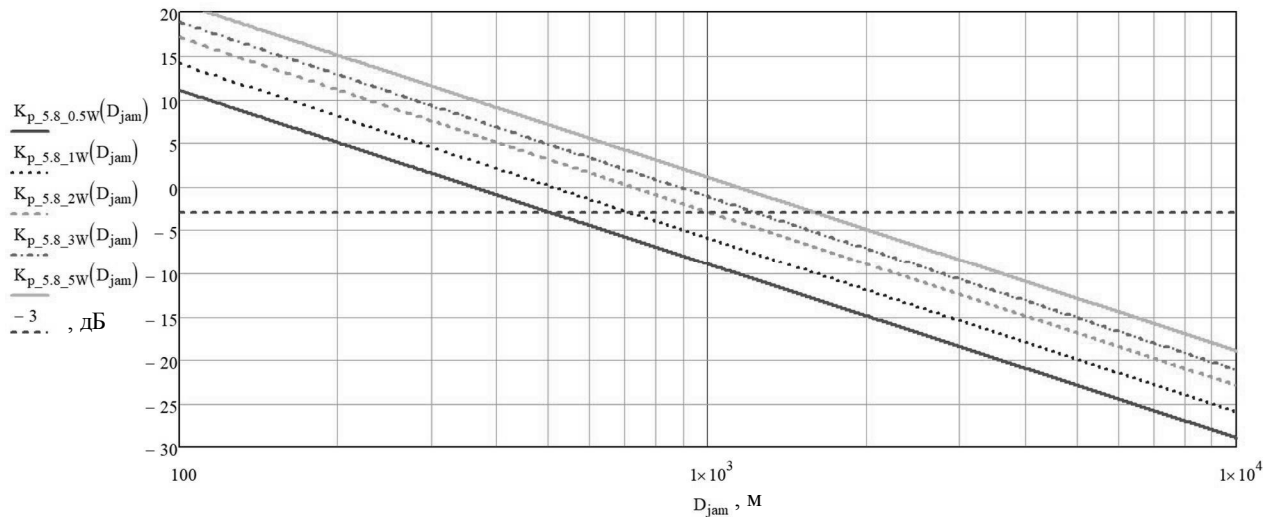


Рис. 11. Залежності відношення завада/сигнал від максимальної віддалі створення завади для різних потужностей передавача завади (0,5 Вт, 1 Вт, 2 Вт, 3 Вт, 5 Вт) (канал 5725–5850 МГц)

Як видно з рис. 11, для подавлення каналу зв'язку в частотному діапазоні від 5,725 до 5,85 ГГц також достатньо потужності передавача завад 2 Вт.

Діапазони частот 433–434,79 МГц та 868–912 МГц використовуються найчастіше для радіоуправління та передавання телеметричних даних із борту БПЛА. Запропоновано вибрати вихідні потужності передавачів завад у цих діапазонах 1 та 4 Вт, відповідно до ширини цих діапазонів.

Згідно з попередніми розрахунками пристрій подавлення функційних властивостей БПЛА повинен мати шість незалежних каналів подавлення. Інші характеристики пристрою вказано в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри каналів подавлення

№ каналу	Робочі частоти, МГц	Ширина спектра завади, МГц	Мінімальна вихідна потужність, мВт	Мінімальне підсилення антени, дБ
1	433–434,79	1,79	1000	3
2	868–912	44	4000	3
3	1162–1300	138	50	3
4	1559–1610	51	100	3
5	2400–2500	100	2000	3
6	5725–5850	125	2000	3

Споживана таким пристроєм потужність не перевищує 60 Вт, він забезпечує безперервну роботу понад 5 год. Вага пристрою без антен – не більше ніж 1,5 кг. Для забезпечення правильного теплового режиму роботи в пристрої передбачено активне охолодження підсилювачів потужності, стабілізаторів напруги та інших елементів, що нагріваються.

5. Розроблення пристрою подавлення каналів зв'язку БПЛА

На рис. 12 зображено синтезовану структурну схему розробленого пристрою. У схемі наявні шість каналів, кожен із яких складається із відповідних генераторів, керованих напругою (ГКН), підсилювачів потужності (ПП), а також антен. Для постійної зміни частоти роботи генераторів формується пилкоподібна напруга за допомогою програмованої логічної матриці ЕРМ3064АТС44-10N. На виходах мікросхеми сигнал формується шестибітним лічильником із відліком від 0 до 63, або, відповідно, у двійковій системі – від 000000 до 111111. Далі цей сигнал подається на цифро-

аналоговий перетворювач, на виході якого формується пилкоподібний сигнал. Як тактовий генератор використано кварцовий автогенератор KX0-V97T із частотою 200 МГц. На керуючі входи ГКН як альтернативу пилкоподібному сигналу також можна подавати сигнал із генератора шуму, що дасть змогу зробити роботу пристрою менш помітною. У структурній схемі також є DC/DC перетворювач, який забезпечує живлення вузлів схеми. Живлення пристрою відбувається від батареї акумуляторів Batt, яка заряджається за допомогою зарядного пристрою ЗП.

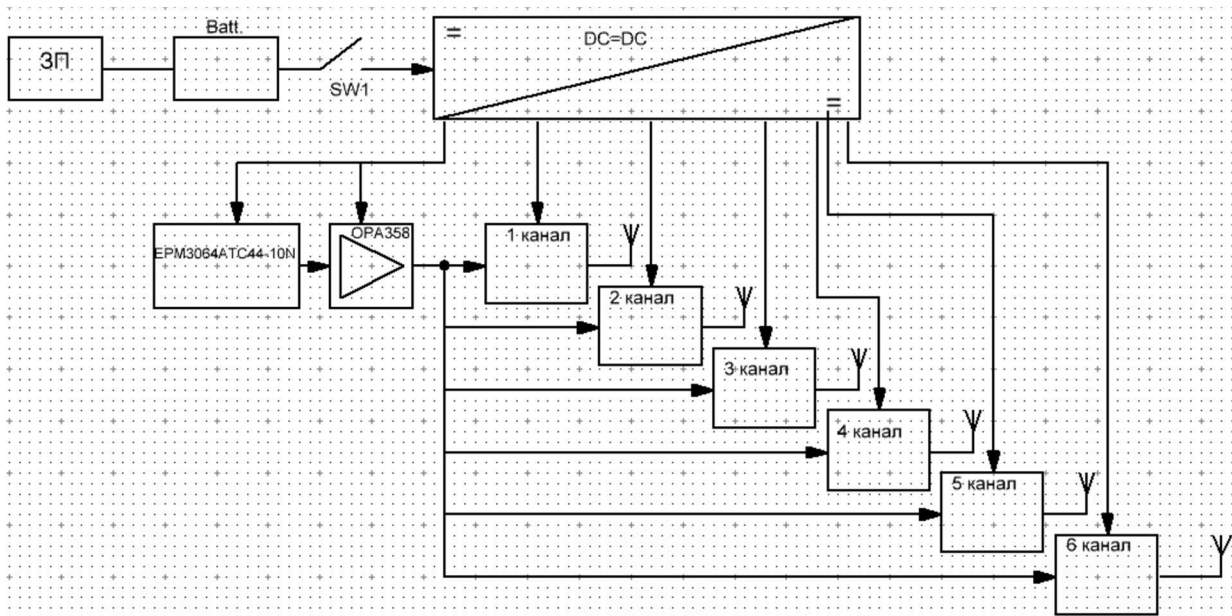
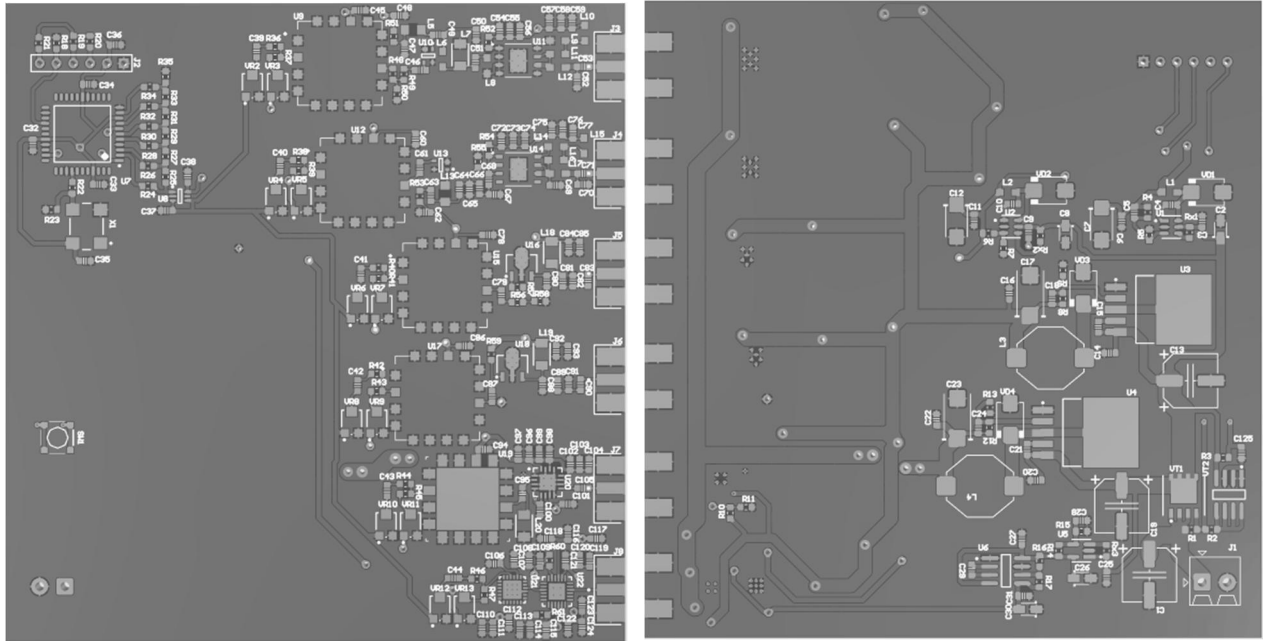


Рис. 12. Структурна схема розробленого пристрою

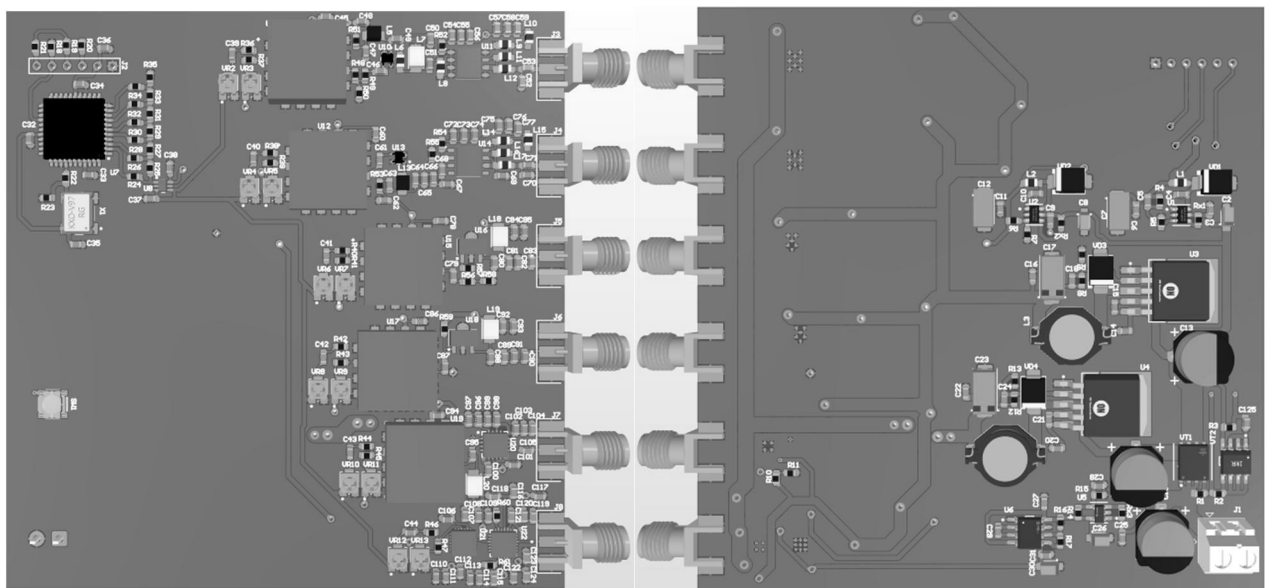
Основою батареї є акумулятори Samsung-INR21700-50E [12], яких загалом використано 15. Вони розміщені по п'ять штук паралельно і по три послідовно. Пристрій вмикають за допомогою електронної кнопки, позначеної на схемі як SW1. Оскільки споживана потужність не повинна перевищувати 60 Вт, то споживаний струм буде доволі великий – до 5 А, тому і використана електронна кнопка, оскільки малогабаритна механічна кнопка спричинить великі втрати за такого струму. Для зменшення втрат електронну кнопку створено на двох польових транзисторах із низьким опором переходу стік–вітік. Ця електронна кнопка також захищає пристрій від помилкового підключення акумуляторної батареї.

Блок DC/DC побудовано на перетворювачах напруги AOZ1282CI, XL4015, MIC5205 MAX1673ESA+. Мікросхема MAX1673ESA+ працює надійно за максимальної вхідної напруги 7 В, а в нашому випадку живлення відбувається від акумуляторної батареї із максимальною напругою 12,6 В. Тому для забезпечення правильного режиму роботи цього стабілізатора напруги використано стабілізатор напруги MIC5205, який додатково зменшує вхідну напругу до 5 В. З відповідних стабілізаторів напруги живлення подаються на шість каналів. Для живлення першого, другого та шостого каналів потрібно 7 В, для другого, третього та четвертого – 5 В.

Шість каналів, як зазначено вище, побудовані на ГКН та ПП. Як ГКН використано генератори серії SVC055. ГКН потрібні для формування сигналів завади в заданих діапазонах (див. табл. 3). Використано підсилювачі потужності SPF5043Z, RFPA3800 та інші. На мікросхеми підсилювачів потужності необхідно встановлювати радіатори, що розсіюють теплову енергію, яка виділяється під час їх роботи. Після синтезу структурної та принципової електричної схем створено друковану плату в середовищі CircuitMaker. Розмір друкованої плати – 94×97 мм, плата двостороння. На рис. 13 та рис. 14 наведено змодельований вигляд друкованої плати пристрою з обох сторін без елементів та з елементами, відповідно.



а б
Рис. 13. Вигляд друкованої плати: а – верхня сторона; б – нижня сторона



а б
Рис. 14. 3Д-модель друкованої плати: а – верхня сторона; б – нижня сторона

У корпус цього пристрою необхідно помістити 15 акумуляторів INR21700-50E вагою 1100 г, а також невеликий вентилятор для охолодження елементів пристрою. Схема охолодження повинна відводити 30 Вт теплової енергії. Корпус, який відповідає цим вимогам, – АWN/AWP21-9-17 [13]. Можлива заміна цього корпусу на інший з аналогічними габаритами. Матеріал корпусу – алюміній, це дає змогу розсіяти частину теплової енергії та забезпечити екранування пристрою.

6. Розроблення антенної системи для пристрою подавлення

Для роботи розробленого пристрою потрібно шість антен. Вони однотипні, але налаштовані на різні частоти, а також забезпечують підсилення на 3 дБ, відповідно до табл. 3. Зовнішній вигляд

розробленої антени зображено на рис. 15. Довжина антени 50 см за робочої частоти 433 МГц. Вона забезпечує підсилення 3 дБ (удвічі) за потужністю.

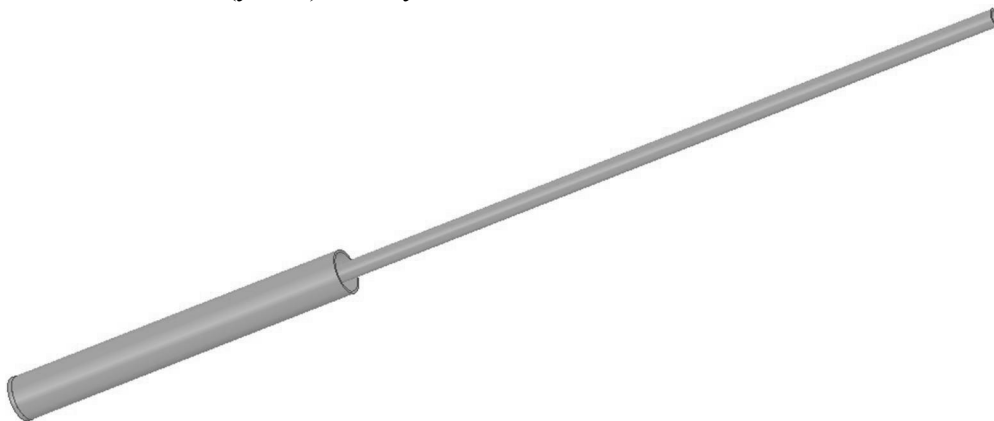


Рис. 15. Зовнішній вигляд розробленої антени

На рис. 16 зображено результати вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) для розробленої та виготовленої антени.

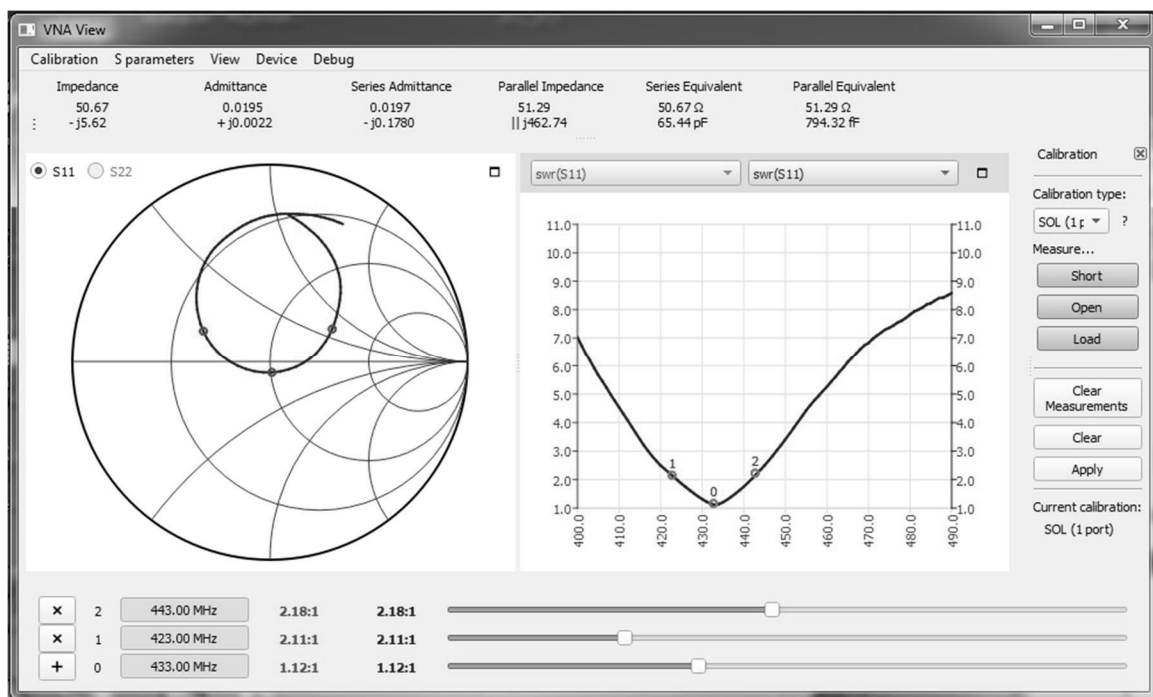


Рис. 16. Результати експериментального дослідження антени на 433 МГц – вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі

Як видно з рис. 16, антена достатньо добре узгоджена у всьому робочому діапазоні 433÷434,79 МГц, її КСХ не перевищує 1,15.

Висновки

Розроблено пристрій подавлення каналів зв'язку БПЛА. В роботі проаналізовано сучасні пристрої та системи для створення завад, засоби радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам, вказано їхні особливості та принципи функціонування. У статті поставлено завдання створити малогабаритний пристрій РЕП для боротьби із розвідувальними та ударними БПЛА.

Визначено, що цей пристрій має працювати в діапазоні від 0,433 ГГц до 6 ГГц. Для зменшення випромінюваної потужності виділено шість окремих діапазонів електромагнітних хвиль, які використовують канали БПЛА найчастіше. Виконано розрахунки для визначення необхідної потужності передавача завади для різних каналів подавлення: подавлення сигналів навігаційної системи, пристроїв, які працюють на частотах 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, а саме квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro. Також досліджено, що для подавлення наявних систем супутникової навігації необхідно сформувати заваду в двох діапазонах: перший діапазон з частотою від 1559 до 1610 МГц, другий діапазон – від 1165 до 1300 МГц. Потужність передавача завади для першого діапазону повинна бути не меншою, ніж 100 мВт, для другого – 30 мВт, відповідно. Для каналу подавлення від 2400 до 2500 МГц та каналу від 5725 до 5850 МГц, за умови, що оператор БПЛА перебуває на віддалі не менше ніж 1 км, та коефіцієнта подавлення 0,398, достатньо потужності передавача завад 2 Вт у кожному з двох каналів.

У середовищі CircuitMaker створено схему, друковану плату та її 3Д-вигляд. Розроблено та виготовлено антену для першого каналу подавлення, а також виконано її дослідження із вимірюванням коефіцієнта стоячої хвилі.

Список використаних джерел

- [1] Іценко Д. А., Кирилюк В. А. (2017), “Застосування малогабаритних передавачів перешкод для радіоелектронного подавлення безпілотних літальних апаратів – носіїв радіокерованих підривних засобів”, *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*, вип. 14, С. 116–129.
- [2] *Fight against UAVs: made in Ukraine*. Available at: <https://old.defence-ua.com/index.php/statti/6114-borotba-z-bpla-zrobleno-v-ukrayini> (Accessed 8 June 2022).
- [3] Shao, S., Zhu, W. and Li, Y. (2022), “Radar Detection of Low-Slow-Small UAVs in Complex Environments”, *2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, pp. 1153–1157.
- [4] Rizqi, M., Rahardi, R., Lukito, W. D., Kornel, F. A. P., Santiko, A. B. and Munir, A. (2020), “Development of Compact Wilkinson Power Divider Using Meander Line for UAV Telemetry Application”, *2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, pp. 107–110.
- [5] *GNSS signal*, available at: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal (Accessed 8 June 2022).
- [6] *Noise-immune equipment of the GLONASS global navigation system for modern weapons, military and special equipment*. Available at: <https://oborona.ru/includes/periodics/defense/2014/0703/175313689/detail.shtml> (Accessed 8 June 2022).
- [7] Дворников, С. В. и Духовницкий, О. Г. (2015). “Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС”, *Информация и Космос*, № 4, С. 73–77.
- [8] Brown, Alison, Reynolds, Dale, Darren Roberts, Capt. and Serie, Major Steve (1999), “Jammer and interference location system – design and initial test results”, *Proceedings of the ION GPS’99*, 14–17 Sept. 1999, Nashville, TN
- [9] Палуй А. И. (1989), “Радиоэлектронная борьба”, Москва: Воениздат, 350 с.
- [10] *Adaptive Modulation and Coding*, Available at: https://gtas.unican.es/files/docencia/TAC/apuntes/adaptive_modulation_and_codingwp_0.pdf (Accessed 8 June 2022).
- [11] *Mavic 2 – Specifications, FAQs, Videos, Tutorials, Manuals – DJI*. Available at: <https://www.dji.com/mavic-2/info> (Accessed 8 June 2022).
- [12] *INR21700-50E Cell Specification*. Available at: <https://batteryservice.bg/wp-content/uploads/2018/12/INR21700-50E.pdf> (Accessed 8 June 2022).
- [13] *AWN*. Available at: http://www.takachi-enclosure.com/data/c16-17/AWN_for_Web_180416.pdf (Accessed 8 June 2022).

CONSTRUCTION OF SMALL-SIZED DEVICES FOR RADIO-ELECTRONIC SUPPRESSION OF COMPACT UNMANNED AERIAL VEHICLES

S. Fabirovskyy, V. Storozh, I. Prudyus, I. Gerey

¹ *Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine*

This article is devoted to the solving task of developing a jamming device for suppressing small-sized unmanned aerial vehicles. The paper analyzes modern devices and systems for jamming, means of electronic countermeasures for unmanned aerial vehicles, their features and the principle of operation are indicated. The relevance of these devices to date is substantiated. A small-sized device for jamming in the frequency range from 433 to 6 GHz has been developed. Its structural and circuit diagram has been synthesized, the printed circuit board of this device has been designed on a modern element base. Designed, manufactured and tested a transmitting antenna for this device.

Key words: *electronic warfare; jamming; GPS; voltage-controlled generator.*