

УДК 621.396

канд. техн. наук Панченко І. В. ORCID: 0000-0001-5690-3813 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Бондаренко Д. М. (ДержНДІ технологій кібербезпеки)

канд. техн. наук Липський О. А. ORCID: 0009-0007-7355-4433 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)

Стефанишин Я. І. ORCID: 0000-0002-8317-4131 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)

Ушаков В. Д. (ФОП «Ушаков Віктор Дмитрович»)

АНАЛІЗ ПІДХОДУ ДО ЗАХИСТУ ВІД ЗАВАД СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЙМАЧІВ БПЛА

Розглянуто основні підходи до побудови приймачів сигналів глобальних систем супутникової навігації безпілотних літальних апаратів, захищених від впливу природних чи штучно створених завад. Такі системи оснащуються багатоелементними фазованими антенними решітками та пристроями управління приймальною діаграмою спрямованості антени *Controlled Reception Pattern Antenna*. У процесі оброблення прийнятого інформаційного сигналу пристроєм *Controlled Reception Pattern Antenna* забезпечується селекція завад та їх придушення (компенсація), що еквівалентно формуванню провалів у просторовій діаграмі спрямованості антенної решітки на кутах, що відповідають напрямкам на джерела завад.

Наведено основні засади реалізації адаптивного алгоритму оброблення прийнятого інформаційного сигналу. Розглянуто конструктивне виконання та склад навігаційного приймача безпілотного літального апарата «Орлан-10», оснащеного пристроєм *Controlled Reception Pattern Antenna*. Зроблено висновок щодо принципової можливості створення вітчизняного навігаційного приймача з пристроєм *Controlled Reception Pattern Antenna*.

У перспективі передбачається розгортання робіт щодо створення пристроїв *Controlled Reception Pattern Antenna* з більшою кількістю антенних елементів та використанням принципів оптимізації кількісного складу операцій адаптації, з метою забезпечення роботоспроможності цих пристроїв при більшій кількості одночасно увімкнених джерел завад та більших рівнях потужності їхніх сигналів.

Ключові слова: глобальні системи супутникової навігації, безпілотні літальні апарати, пристрої *Controlled Reception Pattern Antenna*, природні та штучно створені завади.

I. Panchenko, D. Bondarenko, O. Lypskiy, Ya. Stefanyshyn, V. Ushakov Analysis of the approaches to protection against interference of UAV satellite navigation receivers.

The main approaches to the construction of signal receivers of global satellite navigation systems of unmanned aerial vehicles, protected from the influence of artificially created interference, are considered. Such systems are equipped with multi-element phased antenna arrays and devices of controlled reception pattern antenna. In the process of processing the received information signal by the Controlled Reception Pattern Antenna device, the selection of interference and their suppression (compensation) is ensured, which is equivalent to the formation of dips in the spatial pattern of the antenna array at the corners that correspond to the directions of the interference sources.

The basic principles of the implementation of the adaptive algorithm for processing the received information signal are given. The design and composition of the navigation receiver of the «Orlan-10» unmanned aerial vehicle equipped with a Controlled Reception Pattern Antenna device is considered. A conclusion was made regarding the fundamental possibility of creating a domestic navigation receiver with a Controlled Reception Pattern Antenna device.

In the future, it is envisaged to deploy works on the creation of Controlled Reception Pattern Antenna devices with a greater number of antenna elements and the use of optimization principles of the quantitative composition of adaptation operations, in order to ensure the performance of these devices with a greater number of simultaneously enabled sources of interference and higher levels of their signal power.

Keywords: *global satellite navigation systems, unmanned aerial vehicles, Controlled Reception Pattern Antenna devices, natural and man-made obstacles.*

Постановка проблеми

На поточний час уявити собі навігацію безпілотних літальних апаратів (БПЛА) без використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS – Global Navigation Satellite Systems) доволі складно. Особливо, якщо мова іде про необхідність досягнення ними кінцевих пунктів маршруту на земній поверхні, що знаходяться на значних відстанях від місць запуску (початкових пунктів маршруту).

У більшості випадків навігація БПЛА забезпечується за допомогою включення до їх складу бортових навігаційних приймачів GNSS, які задовільно функціонують, але тільки за сприятливих зовнішніх умов. Загалом, приймачі GNSS дуже вразливі до перешкод – навмисно створених завад (глушіння – jamming, імітація, перехоплення – spoofing). Тому, без вжиття заходів щодо боротьби із завадами, ефективно спеціальне використання БПЛА (за широкого застосування засобів РЕБ) у більшості випадків неможливе.

На поточний час, що характеризується масовим застосуванням БПЛА на лінії зіткнення, проблема зменшення впливу засобів РЕБ на функціонування GNSS виступає дуже гостро. Особливої актуальності ця проблема набуває при реалізації нагальної потреби налагодження серійного випуску вітчизняних БПЛА та, відповідно, створення сучасної вітчизняної авіоники для них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Принцип дії GNSS заснований на розрахунку географічних координат об'єкта на основі прецизійного вимірювання відстані до кількох супутників (мінімально, більше 3), які знаходяться на орбіті. При цьому, просторове положення супутників з великою точністю відоме у будь-який момент часу.

Наявні GNSS тією чи іншою мірою забезпечують навігацію практично в усіх куточках поверхні земної кулі (включаючи моря і океани). Наразі повноцінно функціонують чотири GNSS: GPS, США; GLONASS, РФ; GALILEO, Європа; BeiDou, Китай та на різних етапах розгортання ще дві (IRNSS, Індія, та QZSS, Японія). Особливістю всіх GNSS є порівняно невеликі рівні потужностей інформаційних сигналів, які досягають вхідних ланцюгів навігаційних приймачів (орієнтовно «мінус» 125 дБм).

Наразі системи GNSS працюють спільно з так званими системами геостаціонарного доповнення або системами супутникової диференціальної навігації (SBAS – Satellite Based Augmentation System), які дають можливість суттєво зменшити локальну похибку визначення геодезичних координат завдяки використанню додаткового наземного компоненту, покликаного у реальному масштабі часу генерувати відповідні поправки та передавати їх на навколишні приймачі GNSS.

На поточний час у світі активізовано роботи щодо створення і постачання на ринок систем захисту приймачів GNSS від дії природних чи штучно створених завад – так званих пристроїв управління діаграмою спрямованості приймальної антени (CRPA – Controlled Reception Pattern Antenna). За принципом функціонування пристрій CRPA є типовою системою адаптивного оброблення інформації, загальні підходи до алгоритмічного забезпечення яких обґрунтовано у роботі [1]. Зокрема, у цій роботі наведено функціональні схеми оброблення вузькосмугового та широкосмугового сигналів, а також визначено цільовий критерій автоматичного функціонування адаптаційного алгоритму. Авторами роботи [2] представлено графік впливу періоду зникнення сигналу GNSS на похибку визначення координат, що, зважаючи на ітераційний характер адаптаційного процесу, дає можливість оцінити завадозахищеність пристрою CRPA. У роботі [3] підтверджено наявність залежності між кількістю елементів антенної решітки та кількістю джерел завад, які можуть бути усунуті пристроєм CRPA. Авторами роботи [4] розглянуто принципи побудови та функціональну схему аналогового пристрою CRPA. Відомості про технічні характеристики пристроїв CRPA, які постачаються на ринок як окремі прилади, наведено у публікаціях [5–10]. Відомості про конструктивно суміщений з приймачем GNSS пристрій CRPA «Комета-М» представлено у роботі [11].

Метою цієї статті є викладення основних підходів до створення алгоритмів адаптивного оброблення сигналів приладами CRPA (які забезпечують успішне функціонування приймачів сигналів GNSS на борту БПЛА в умовах дії природних та штучно створених завад), а також побіжний аналіз конструктивного виконання навігаційного приймача «Комета-М».

Виклад основного матеріалу

Принципи функціонування адаптивних пристроїв придушення завад. При побудові систем придушення сигналів завад (характеристики яких оперативно змінюються) в інформаційному сигналі навігаційного приймача GNSS наразі використовуються адаптивні системи, теоретичні засади яких висвітлено у роботі [1]. Призначення цих систем полягає у формуванні вихідного сигналу з найбільшим (у тому чи іншому сенсі) наближенням до вхідного неспотвореного сигналу (тобто найменшою похибкою між ними).

Загальна схема придушення завад в адаптивній системі, що має 2 вхідні сигнали, наведена на рисунку 1 [1].

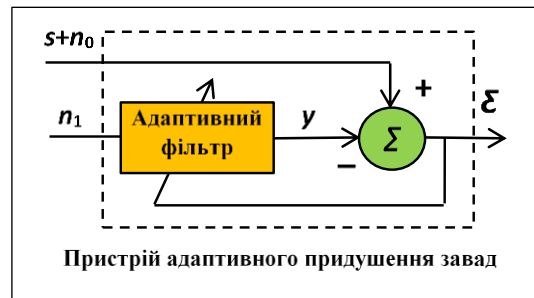


Рис. 1. Функціональна схема адаптивного пристрою придушення завад

Вихідний сигнал адаптивної системи придушення завад, представлений на рисунку 1, записується, як:

$$\xi = s + n_0 - y,$$

де $s + n_0$ – вектор суміші сигналу та завади (вхідний сигнал пристрою адаптивного придушення завад);

n_1 – вектор сигналу завади, некорельованої з сигналом s , але корельованої з сигналом n_0 ;

y – вектор вихідного сигналу адаптивного фільтра, який приблизно відповідає копії сигналу n_0 ;

ξ – вектор сигналу похибки між істинним та прийнятим сигналом s на виході суматора Σ .

Система керується адаптивними алгоритмами, які автоматично формують її вихідний сигнал із найкращим (зокрема, у середньоквадратичному сенсі) наближенням до вхідного сигналу. У процесі функціонування адаптивний фільтр налаштовується відповідно до цього алгоритму так, щоб мінімізувати загальну потужність вихідного сигналу ξ , який, у свою чергу, є також сигналом похибки адаптивного процесу.

Враховуючи, що середньоквадратичне відхилення (СКВ) вихідного сигналу системи має тільки один мінімум (локальні мінімуми – відсутні) [1], цей процес легко автоматизується.

Крім того, вибір у якості критерія придушення завади мінімуму СКВ вихідного сигналу дає можливість певним чином максимізувати відношення сигнал/шум на виході системи. Це можна пояснити тим, що повної компенсації завади (шуму) у системі досягти неможливо і мінімізація загальної потужності вихідного сигналу призводить, в основному, до мінімізації його шумової складової.

Адаптивні системи придушення завад, які використовуються у приймальних пристроях GNSS, призначені для оброблення сигналів, прийнятих елементами фазованих антенних решіток, що мають просторове рознесення (орієнтовно, на половину довжини робочої хвилі) і іменуються адаптивними просторовими решітками.

На рисунку 2 наведено функціональну схему одного із варіантів адаптивної просторової решітки – пристрою адаптивного оброблення вузькосмугового сигналу [1]. У цій схемі кожний елемент антенної решітки ($1 \dots k$) з'єднаний з перемножувачами на змінні вагові коефіцієнти ($w_{11} \dots w_{k1}$), а також з фазообертачами на 90 градусів, які, у свою чергу, з'єднані з

перемножувачами на змінні вагові коефіцієнти ($w_{21} \dots w_{k2}$). Таким чином, перебираючи значення вагових коефіцієнтів (за критерієм мінімізації СКВ вихідного сигналу), можна вибрати будь-які фазові значення кута та амплітуди комплексного коефіцієнта передачі вхідного сигналу, що дає можливість принципово отримати компенсацію завади на виході суматора (Σ).

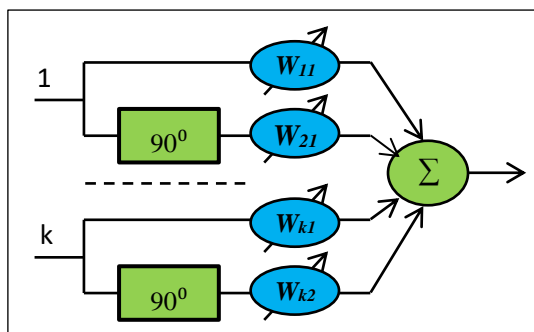


Рис. 2. Функціональна схема пристрою адаптивного оброблення вузькосмугового сигналу

За необхідності забезпечити адаптивне приймання сигналів у певному діапазоні частот, кожний фазообертач, як показано на рисунку 3, замінюється адаптивним трансверсальним фільтром з відводами [1]. Вибір якомога більшої кількості відводів, чи іншими словами менших фазових затримок (Δ), дає можливість наблизитися до ідеального фільтра, який дає можливість регулювати амплітуду і фазу сигналу на кожній частоті у смузі пропускання.

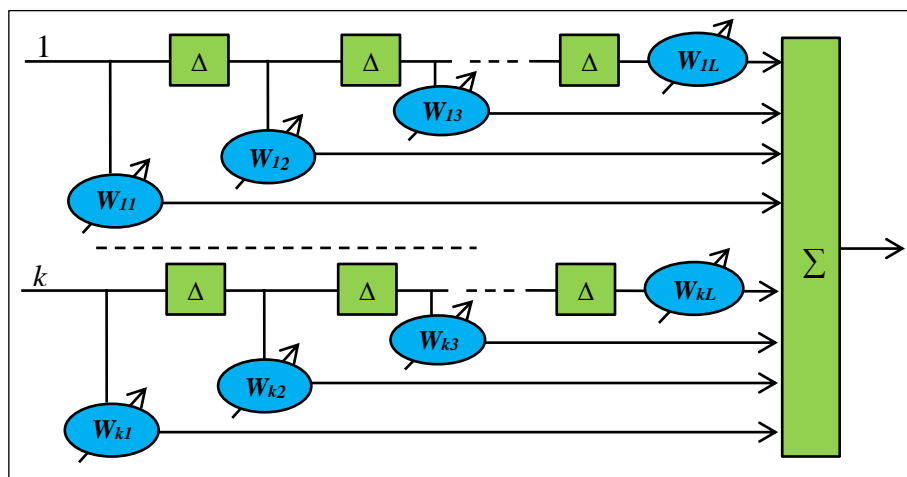


Рис. 3. Функціональна схема пристрою адаптивного оброблення широкосмугового сигналу

Незважаючи на те, що схема, представлена на рисунку 3, принципово не передбачає включення ланцюжка зі зсувом фаз на 90 градусів, інтуїтивно видається доцільним його залишити (хоча б із міркувань більш точного підбору вагових коефіцієнтів). Таке рішення дещо збільшує апаратні витрати, але при цифровому обробленні сигналу такий недолік можна вважати несуттєвим. Загалом, це питання потребує остаточного вирішення у процесі порівняльних випробувань макетних зразків.

Для реалізації в адаптивному алгоритмі основної мети підбору вагових коефіцієнтів (забезпечення максимально швидкого досягнення мінімуму СКВ вихідного сигналу) використовуються алгоритми градієнтного спуску, найменших квадратів та інші. Відмінність між алгоритмами полягає у реалізації тих чи інших заходів щодо зменшення загального

терміну адаптації, в основному завдяки збільшенню кроку підбору вагових коефіцієнтів на певних кроках адаптації за певним критерієм (наприклад, відповідно до величини першої похідної на кожному кроці адаптації).

Зазвичай, у складі переважної більшості навігаційних приймачів GNSS використовуються багатоелементні (більше 4) антенні решітки, які дають можливість забезпечити адаптивну компенсацію природних чи штучно створених завад. При цьому селекція завад, яка забезпечується у процесі оброблення прийнятих від багатоелементної антени сигналів, еквівалентна формуванню провалів у просторовій діаграмі спрямованості антенної решітки, на кутах, що відповідають напрямкам на джерела завад.

Видається, що детальне практичне відпрацювання алгоритмів адаптації буде досягнуто у процесі проєктування пристрою. Загалом, максимальний цикл адаптації визначається кількістю елементів антенної решітки k , кількістю відводів трансверсального фільтра L , похибкою визначення вагових коефіцієнтів w , проміжною частотою, на якій реалізується адаптивне оброблення сигналу, а також прийнятим алгоритмом адаптації. Наприклад, якщо припустити, що антенна решітка 4-елементна ($k = 4$), трансверсальні фільтри мають $L = 360$ відводів кожний, вагові коефіцієнти змінюються у межах $w = (0 \pm 1)$ і визначаються з похибкою не більше 10^{-4} , кожний антенний елемент має квадратурний канал, а проміжна частота (ПЧ) складає 10 МГц, то будемо мати близько $576 \cdot 10^5$ операцій адаптації і загальний максимальний цикл адаптації – близько 6 с (передбачається, що одна ітерація відбувається за один період робочої частоти). При менших частотах проміжної частоти та виконанні циклу адаптації за один період робочої частоти загальний термін адаптації значно зростає (зокрема, для частоти ПЧ 1 МГц термін адаптації може становити орієнтовно 1 хвилину), що диктує необхідність пошуку певного компромісу (реалізація, за можливості, циклу адаптації не за один період ПЧ, а за частину цього періоду, зменшення кількості відводів трансверсального фільтра, дискретності вагового коефіцієнта чи оптимізації самої кількості циклів адаптації).

Оцінити практичну прийнятність терміну адаптації можна аналізуючи дані, наведені у роботі [2], щодо залежності СКВ похибки визначення координат об'єкта від терміну зникнення сигналу GNSS (за умови комплексування на борту системи GPS та інерційної навігаційної системи), які представлено у таблиці 1. Видається, що для практичного використання, при ураженні БпЛА достатньо протяжних цілей, термін затримки до 10 с, який визначає рівень СКВ величиною 5–6 м, цілком задовільний, а от термін затримки близько 1 хвилини (величина СКВ складає 50–60 м) можна вважати прийнятним тільки при створенні макетного зразка, що демонструє принцип роботи.

Таблиця 1

**Похибка визначення координат
при зникненні сигналу GNSS**

Час зникнення даних GNSS, с	СКВ визначення координат, м
10	5–6
20	7–15
40	20–40
60 (1 хв)	50–60
300 (5 хв)	300

Як наголошується у роботі [3], максимальна кількість джерел завад, яка може бути скомпенсована, не перевищує кількості використовуваних елементів антенної решітки (на практиці, в технічних характеристиках вказується величина на одиницю менша).

Функціональні схеми пристроїв CRPA. Конструктивно пристрої CRPA можуть будуватися як у аналоговому, так і у цифровому вигляді.

Наприклад, у роботі [4] представлена структурна схема 4-канального аналогового пристрою CRPA, яка у спрощеному варіанті наведена на рисунку 4. Вихідний сигнал пристрою CRPA, який не містить сигналу завади взагалі (або інтенсивність завади суттєво зменшена внаслідок реалізації адаптивного алгоритму), подається на антенний вхід штатного навігаційного приймача.

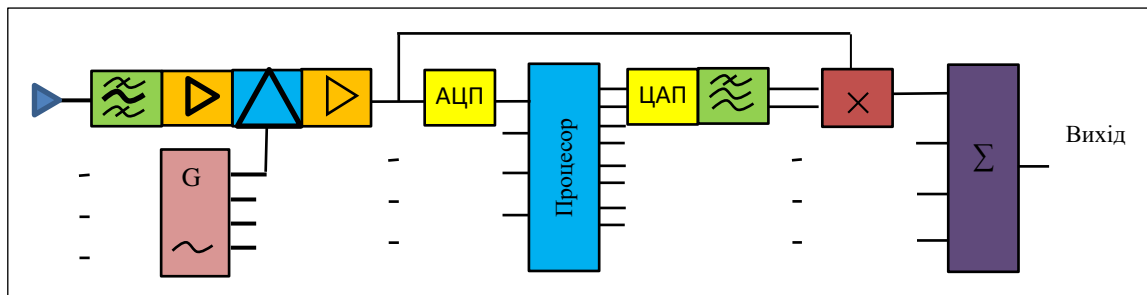


Рис. 4. Функціональна схема аналогового пристрою CRPA

Особливістю наведеної схеми є подача на перемножувачі сигналів кожного із антенних каналів сигналів квадратурних вагових коефіцієнтів, які формуються процесором, що дає можливість не втратити їх комплексний характер і підбирати амплітуду та фазу цих сигналів так, щоб забезпечити точну компенсацію сигналів завад. До недоліків наведеної аналогової схеми побудови CRPA можна віднести використання аналогових перемножувачів, які апаратно достатньо громіздкі. Крім того, реалізація трансверсального фільтра у аналоговому варіанті (при спробі побудови пристрою адаптивного оброблення широкосмугового сигналу) також становить певні труднощі.

Цифровий пристрій CRPA (що є фактично певною модифікацією аналогового пристрою CRPA) забезпечує цифрове оброблення прийнятого аналогового сигналу на ПЧ.

Функціональна схема цифрового пристрою CRPA представлена на рисунку 5.

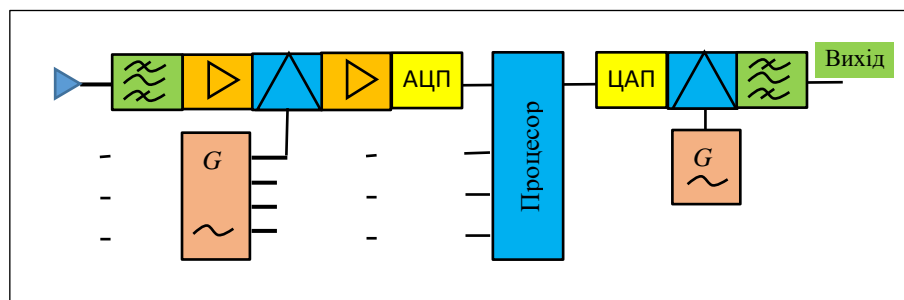


Рис. 5. Функціональна схема цифрового пристрою CRPA

Особливістю цієї схеми побудови CRPA є необхідність зворотнього перенесення обробленого вихідного сигналу з проміжної на робочу частоту перед поданням його на вхід штатного приймача сигналу GNSS. До переваг цифрового пристрою CRPA можна віднести можливості реалізувати адаптивне оброблення широкополосного сигналу з довільною кількістю відводів та оперативно корегувати програмне забезпечення (при необхідності врахування конкретних умов експлуатації).

Крім того, якщо необхідно реалізувати роботу системи CRPA від декількох GNSS, що мають різні робочі частоти, їх розділення достатньо просто забезпечується цифровими фільтрами, реалізованими за допомогою процесора, що загалом дає помітну економію апаратних ресурсів.

Серед недоліків цифрового оброблення сигналів можна назвати дещо більше енергоспоживання, але переваги, які надає мінімізація габаритно-масових показників та пристосованість до серійного виробництва, нівелюють цей недолік.

Приклади пристроїв CRPA, представлених на ринку. Загалом, на поточний час на світовому ринку у модульному виконанні предсталено навігаційні приймачі GNSS, які широко використовуються у приладах і системах різного призначення. При цьому, із комерційних міркувань не кожний навігаційний приймач GNSS потребує компенсації завад і тому не всі вони обладнуються пристроями CRPA.

Зважаючи на те, що пристрій CRPA має функціональну завершеність, він може підключатися до будь-якого штатного навігаційного приймача, суттєво покращуючи його роботу в умовах дії завад.

Враховуючи, що автори не ставили за мету ґрунтовно проаналізувати ринок пристроїв CRPA, для прикладу наводиться тільки декілька найпоширеніших пропозицій.

Турецькою компанією Tualcom пропонується декілька модифікацій функціонально закінчених пристроїв CRPA [5–8], загальний вигляд яких представлено на рисунку 6, а основні технічні характеристики – у таблиці 2.



Рис. 6. Загальний вигляд CRPA пристроїв компанії Tualcom, Туреччина

Таблиця 2

Основні технічні характеристики пристроїв CRPA компанії Tualcom, Туреччина

Найменування параметру	Тип пристрою CRPA			
	Tualaj 8100	Tualaj 8200	Tualaj 8300-D	Tualaj 8300
1. Типи сумісних GNSS приймачів	BeiDou (B1C), Galileo (E1), SBAS, GLONASS (L1), GPS (L1)		BeiDou (B1C), Galileo (E1, 5a), SBAS, GLONASS (L1, L2), GPS (L1, L2), QZSS (L1)	
2. Кількість сигналів завад	не більше 7			
3. Чутливість приймача, дБм	«мінус» 164			
4. Придушення сигналу завади, дБ	не менше 50			
5. Смуга частот, МГц	не менше 30			
6. Напруга живлення, В	12–28			
7. Потужність споживання, Вт	не більше 12		не більше 24	
8. Форм-фактор, мм	70 × 139 × 21	90 × 110 × 23	Ø250, h = 98	70 × 139 × 210
9. Маса, г	320	380	4150	380
10. Діапазон робочих температур, градуси	від «мінус» 40 до 85			

Компанією Height Technologies, Нідерланди [9], пропонується недорогий (\$ 50) CRPA-пристрій GPS DOME для навігаційних систем БПЛА, загальний вигляд якого наведено на рисунку 7. Основними особливостями пристрою, окрім підключення додаткової антени, є невеликі габарити (форм-фактор) – 70 мм × 48 мм × 24 мм та маса – 150 г.

Компанією Hexagon Novatel, Канада [10], пропонується декілька варіантів антенних решіток (власне CRPA-пристроїв для GNSS), до складу яких включаються 4- та 7-елементні фазовані антенні решітки. Зокрема, на рисунку 8 представлено загальний вигляд 7-елементної антенної решітки GALT-710ML, а на рисунку 9 – CRPA-пристрою GAJT-AE-N, які призначені для використання у складі колісної та гусеничної техніки.

Антенна решітка GALT-710ML обладнана малошумним підсилювачем з коефіцієнтом підсилення 30 дБ та має діаметр 289 мм, висоту 120 мм і масу 7,5 кг. CRPA-пристрій GAJT-AE-N забезпечує роботу з сигналами наступних GNSS: GPS (L1, L2), QZSS (L1, L2) SBAS (L1), Galileo (E1), споживає 15 Вт електроенергії від джерела живлення 10–32 В, має габаритні розміри 179,5 мм × 155,5 мм × 39 мм та масу не більше 1,2 кг.



Рис. 7. Загальний вигляд CRPA-пристрою GPS DOME компанії Height Technologies, Нідерланди



Рис. 8. Антенна решітка GALT-710ML компанії Hexagon Novatel, Канада



Рис. 9. CRPA-пристрій GAJT-AE-N компанії Hexagon Novatel, Канада

З метою оптимізації масогабаритних характеристик БпЛА його навігаційний приймач GNSS можна виготовляти у вигляді єдиного конструктиву з інтеграцією антенної решітки та CRPA-пристрою. Таке технічне рішення прийняте, зокрема, у системі GPS «Комета–М», якою оснащується більшість військової техніки рф (у тому числі і БпЛА «Орлан-10»).

Технічні характеристики системи GPS «Комета–М» наведено у роботі [11]:

кількість антенних елементів – 4;

робоча температура – від «мінус» 40 до 60 градусів;

потужність споживання, не більше – 12 Вт;

кількість супутникових каналів – 32;

підтримувані сигнали GPS/GALILEO/SBAS L1 – 1575,42 МГц, ГЛОНАСС L1 – 1597,5 МГц, 1609,5 МГц;

діапазон навігаційних сигналів, який захищається: ГЛОНАСС L1 – (1593–1610) МГц, GPS L1, GALILEO E1/ SBAS L1 – 1573–1578 МГц;

придушення широкосмугових перешкод – 40–50 дБ;

перешкодозахищеність (завада/сигнал) J/S = 90 дБ;

інтерфейс RS422/RS485, PPS, ВЧ-вихід;

протокол обміну даними – NMEA (за замовчуванням), BINR.

Конструктивно, приймач GPS «Комета-М» складається із 2 плат (антенна 4-елементна решітка та навігаційний модуль з CRPA-пристроєм). Загальний вигляд (з лицьової та тильної сторін) антенної решітки БПЛА «Орлан-10» наведено на рисунку 10, а графік залежності коефіцієнту підсилення її антенного елементу (Patch Antenna Taolas CGGP 18.4.C.02) від частоти, який входить до її складу, – на рисунку 11.

Розмір плати антенної решітки складає 100×100 мм, антенні елементи розташовані по кутах квадрату розміром 85 мм × 85 мм. Враховуючи представлену на рисунку 11 залежність, орієнтовний коефіцієнт підсилення елементу антенної решітки на робочій частоті 1575,42 МГц можна оцінити величиною «мінус» 1,5–2 дБі, що загалом свідчить про його переважальну роль у якості не стільки антени, як частотно- та просторово-селективного засобу.

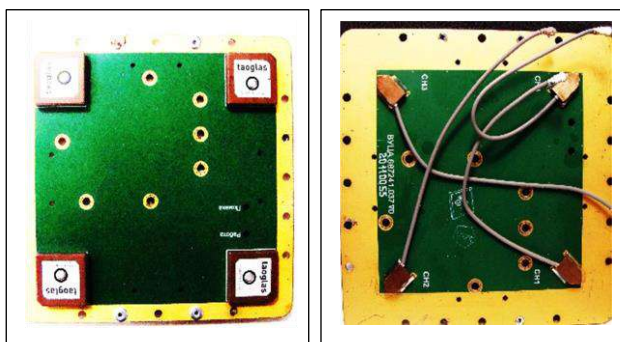


Рис. 10. Загальний вигляд антенної 4-елементної решітки навігаційного приймача БПЛА «Орлан-10», рф

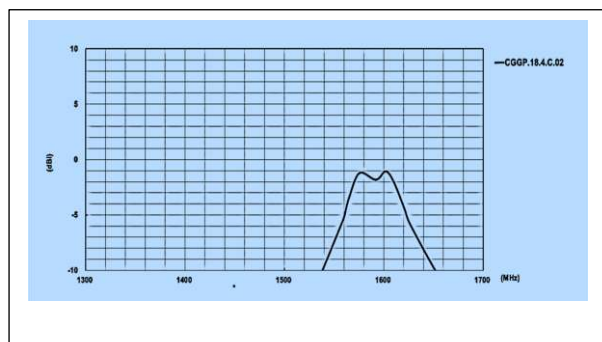


Рис. 11. Залежність коефіцієнта підсилення антенного елементу Patch Antenna Taolas CGGP 18.4.C.02 від частоти

Загальний вигляд (з двох сторін) дещо пошкодженої (відсутність деяких комплектувальних приладів) плати навігаційного модуля з CRPA-пристроєм БПЛА «Орлан-10» наведено на рисунку 12.

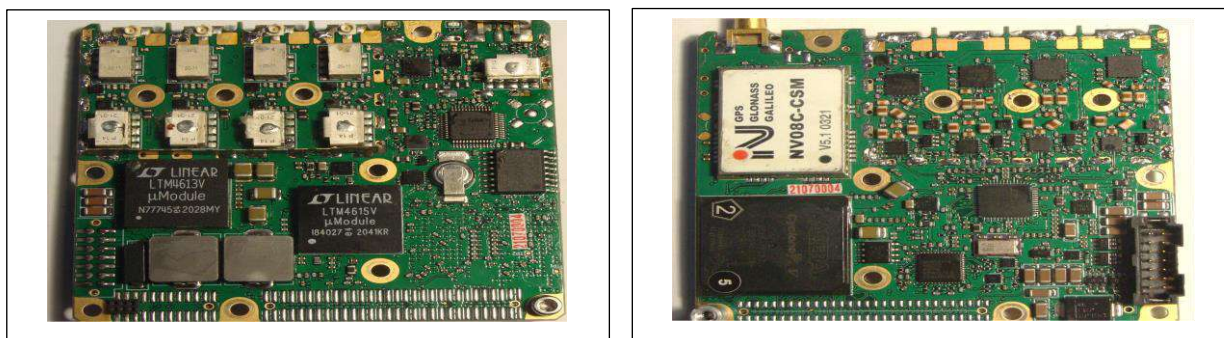


Рис. 12. Загальний вигляд плати навігаційного модуля БПЛА «Орлан-10»: а – вид спереду; б – вид з тильної сторони

Аналіз конструктивного виконання плати дає можливість зробити висновок, що приймач GNSS побудований за функціональною схемою з цифровим обробленням інформації, представленою на рисунку 5.

Зокрема, у якості навігаційного приймача використано малогабаритний мультисистемний модуль GPS/GLONASS/GALILEO/COMPASS типу NV08C–CSM [13]. Процесор CRPA, виконаний на базі пристрою Altera Cyclone V компанії Intel [14]. Змішувачі

LTC5541 компанії LT Linear Technology [15] включені у сигнальних ланцюгах кожного із 4 приймальних каналів та у вихідному сигнальному ланцюгу. Гетеродин виконаний на базі 12-вихідного тактового генератора з інтегрованим 1,6 GHz керованим напругою генератором AD9517-4 компанії Analog Devices [16]. Перетворення цифрового сигналу в аналоговий забезпечується 14-розрядним мультиплексованим цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) AD9759-4 компанії Analog Devices [17]. Зворотне перетворення аналогового сигналу у цифровий (АЦП) забезпечується 14-розрядним аналогово-цифровим 4-канальним перетворювачем LTC2175-14 компанії LT Liner Technology [18].

Таким чином, з урахуванням розглянутих принципів функціонування пристрою CRPA видається цілком можливим створення вітчизняного приймача GNSS для систем БпЛА. Побудова макетного зразка цього приймача (за сприятливих умов, в основному економічного характеру) дала б можливість практично відпрацювати алгоритми оброблення сигналів GNSS, методи ефективного придушення роботи джерел перешкод, і, тим самим, створити передумови його серійного виробництва.

Успішне створення приймача GNSS з пристроєм CRPA можна розглядати як важливий крок у напрямі забезпечення вітчизняною авіонікою створюваних перспективних БпЛА.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Селекція природних чи штучно створених завад та їх придушення забезпечується пристроями CRPA, що еквівалентно формуванню провалів у просторовій діаграмі спрямованості антенної решітки, на кутах, що відповідають напрямам на джерела завад.

Оброблення прийнятого сигналу пристроями CRPA забезпечується адаптивними алгоритмами, у якості цільової функції автоматичного функціонування яких виступає досягнення мінімуму СКВ вихідного сигналу. При цьому, окрім придушення завад також максимізується відношення сигнал/шум.

Реалізація адаптивного алгоритму у більшості випадків забезпечується у цифровому вигляді з використанням програмно реалізованих трансверсальних фільтрів.

З високою ймовірністю можна сказати, що саме таким чином побудований приймач GNSS «Комета–М» (до складу якого включено 4-елементну антенну решітку).

Загалом, при наявності зацікавленості і відповідного фінансування, вітчизняний приймач GNSS для БпЛА може бути створений (із налагодженням його серійного виробництва) в осяжні терміни.

У перспективі передбачається розгортання робіт щодо створення пристроїв CRPA з більшою кількістю антенних елементів та використанням принципів оптимізації кількісного складу операцій адаптації, з метою забезпечення роботоспроможності цих пристроїв при більшій кількості одночасно увімкнених джерел завад та більших рівнях потужності їхніх сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Уидроу Б., Стирз С. Адаптивная обработка сигналов. Перевод с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
2. Карпов Д. В., Коробецкий О. В., Резников Ю. В. Рекомендації щодо розробки захищеного від завад приймача глобальних навігаційних супутникових систем для вирішення завдань Збройних сил України // Системи, озброєння і військова техніка. 2020. № 4 (64). URL: <https://www.C:/Users/Користувач/Downloads/455-Текст%20статті-814-1-10-20210114.pdf>.
3. Теоретические основы радиолокации / перев. Я. Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
4. Швець В. А. Структурна схема завадостійкої антенної решітки навігаційних систем GPS, ГЛОНАСС, ГАЛІЛЕО. URL: <https://www.core.ac.uk/download/pdf/286628241.pdf>.
5. <https://www.tualcom/gps-gnss-anti-jam-crpa/tualaj-8200>.

6. <https://www.tualcom/gps-gnss-anti-jam-crpa/tualaj-8100>.
7. <https://www.tualcom/gps-gnss-anti-jam-crpa/tualaj-8300>.
8. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/tualcom/tualaj-8300-d-gnss-crpa-anti-jam-system>.
9. https://gpsdome.nl/wp-content/uploads/2021/02gps-dome_UAS-datasheet.pdf.
10. <https://novatel.com/products>.
11. Сафронов Тарас. «Комета» – проблема для РЕБ України. URL: <https://www.mil.in.ua/uk/articles/kometa-problema-dlya-reb-ukrayiny/> (дата звернення: 01.08.2023).
12. <https://allaboutcircuits.com/electronic-components/datasheet/CGGP.18.4.C.02-Taolas>.
13. <https://famell.com/datasheets/1792091.pdf>, 12/01/2023.
14. <https://intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683694/current/cyclon-v-device-overview.html>.
15. <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/5541f.pdf>.
16. <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9517-4.pdf>.
17. <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9755-4.pdf>.
18. <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/21754314fa.pdf>.