

УДК 656.052

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).87-95](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).87-95)**С. І. САЩУК**<https://orcid.org/0000-0002-7246-9110>**В. І. СЛЮСАР**, доктор технічних наук, професор<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>**З. К. ШЕЛЕМІН**<https://orcid.org/0009-0006-7740-2245>**К. В. ДРОГОВОЗ**<https://orcid.org/0009-0002-8785-9805>*(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України, м. Київ)*

ТЕНДЕНЦІЇ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ЗМІН У ПРИЙМАЧАХ СИГНАЛІВ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИСОКОТОЧНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

У статті представлені результати проведених досліджень бортових навігаційних систем безпілотних літальних апаратів та ракет, які застосовувались рф проти України, на прикладі «Shahed-136» («Герань-2»), Х-32. Проаналізовано зміни, які відбувались у будові антенних систем та приймачах сигналів супутникових навігаційних систем. Досліджено тенденції подальшого розвитку перешкодозахищених навігаційних приймачів з малогабаритними адаптивними антенними решітками.

Ключові слова: навігаційна система, бортові системи, безпілотні літальні апарати (БпЛА), спуфінг, радіоелектронна боротьба.

ВСТУП

Тактика регулярного нанесення комбінованих авіаційних ударів рф з 2022 року супроводжується масованим застосуванням високоточних засобів повітряного нападу (ВЗПН), у тому числі «Shahed-136», також відомих як «Герань-2».

Зростання ролі радіоелектронної боротьби (РЕБ) в протидії ВЗПН спонукало противника удосконалювати перешкодозахищеність систем зв'язку та приймачів сигналів (ПС) супутникових радіонавігаційних систем (СРНС). Увага надається захисту ПС СРНС із застосуванням адаптивних антенних решіток, які постійно удосконалюються.

Під час проведених раніше досліджень було виявлено постійні конструктивні зміни ПС СРНС, тому визначена необхідність в проведенні аналізу тенденцій розвитку, технічних можливостей та особливостей функціонування перешкодозахищених навігаційних приймачів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У статті [1] розглядається використання імітаторів сузір'їв супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) для оцінки характеристик удосконалених методів захисту від перешкод та спуфінгу ПС СРНС, які використовують кілька антен в антенній решітці. У статті [2] представлені результати проведених досліджень конструктивних та функціональних особливостей «Комета-М». Визначено структуру побудови, призначення ключових компонентів. Досліджено технічні характеристики та особливості функціонування «Комета-М». У роботі [3] проведено аналіз тенденцій розвитку сучасних засобів радіоелектронного подавлення, джерел ненавмисних перешкод приймачам сигналів СРНС, наведені основні співвідношення, які дозволяють на основі інформації про параметри навігаційних сигналів розглянути критичні ситуації функціонування навігаційної апаратури. У статті [4] здійснюється оцінка потрібного рівня радіоелектронного захисту приймачів сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), що забезпечують застосування наземних платформ озброєння та військової техніки, з урахуванням можливого радіоелектронного подавлення з боку противника.

Метою статті є аналіз еволюційного розвитку та визначення тенденцій побудови ПС СРНС засобів повітряного нападу, зокрема БпЛА типу «Shahed-136», у яких застосовують антенні системи із контрольованою діаграмою спрямованості.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Надійність роботи ПС СРНС у зразках ВЗПН є критичною, але водночас вразливою до цілеспрямованих радіоелектронних впливів. Основними недоліками звичайних ПС є залежність від слабких сигналів супутників (типово $-160 \dots -130$ дБВт), чутливість до радіоелектронного подавлення та спуфінгу, а також відсутність просторового розділення джерел сигналів. За даними, наведеними у [5, 6], навіть малопотужні перешкоди, у діапазонах L1/L2, можуть повністю зірвати навігацію на відстанях у десятки кілометрів. Це обумовлює потребу в інтегрованих рішеннях просторової фільтрації, які формують нулі діаграми спрямованості в напрямках перешкод і зберігають корисний сигнал від супутників. Перші реалізації антени з контрольованою діаграмою направленості (Controlled reception pattern antennas – CRPA) забезпечували просторове придушення джерел завад до 25–30 дБ. Подальші дослідження показали, що збільшення кількості елементів лінійно розширює кількість ступенів свободи, тобто напрямків, у яких можна сформувати нулі діаграми спрямованості [7]. Це стало основним стимулом для розроблення систем із 7–16 елементами.

У сучасній практиці найменші CRPA містять 4 елементи – мінімум, необхідний для ефективного придушення однієї або двох спрямованих перешкод при збереженні сигналів супутників [8, 10]. Такі рішення застосовують у малих БпЛА, керованих боєприпасах, де критичні габарити і енергоспоживання. Системи середнього класу мають 7 або 8 елементів – це компроміс між продуктивністю та складністю калібрування. Для

стратегічних платформ і великих літальних апаратів розроблено масиви з 16 і навіть до 30 елементів, що дає змогу одночасно подавляти велику кількість джерел радіоелектронного випромінювання та компенсувати перевідбитий навігаційний сигнал (мультипас-ефект) [11].

Переваги багатоканальних CRPA очевидні: значне підвищення співвідношення потужності завади до сигналу (J/S), зниження ймовірності втрати фіксації навігаційного сигналу, стабільність трекінгу при наявності складного спектру перешкод [1]. Проте, зі зростанням кількості елементів збільшуються вимоги до фазової стабільності, точності калібрування, обчислювальних ресурсів і, як наслідок, вартості рішення. 16-елементна решітка потребує калібрування в умовах повної симуляції просторово-часових збурень і має ризик деградації через температурні й вібраційні впливи [8]. Досвід експлуатації, узагальнений у Inside GNSS, показує: без високоточної синхронізації фаз навіть великі масиви не забезпечують очікуваного придушення і можуть втратити перевагу над простими 4–7-елементними рішеннями [5].

Одним із ключових етапів еволюції антен із контрольованою діаграмою спрямованості стало створення компактних рішень, здатних забезпечувати рівень завадозахисту, порівняний із великими авіаційними системами. Прикладом таких розробок є результати, представлені у роботі NAVSYS Corporation «Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna» [11], де продемонстровано практичну реалізацію малої семиелементної CRPA (S-CRPA), орієнтованої на застосування в обмежених за простором платформах – ракетах і безпілотних літальних апаратах. Антена виконана у формі планарного кола діаметром близько 7 дюймів, із центральним елементом та шістьма пери-

ферійними, розташованими на відстані приблизно 0,45 λ між сусідніми центрами. Така геометрія забезпечує майже ізотропне покриття небесної півсфери та достатню кількість ступенів свободи для адаптивного формування нулів у напрямках джерел завад. Метою дослідження було оцінити, чи може компактний семиелементний масив забезпечити ефективність придушення понад 30 дБ при одночасному збереженні стабільного прийому супутникових сигналів. Результати показали, що S-CRPA досягає 35–40 дБ придушення при одному джемері та 25–30 дБ при двох одночасних, причому зберігається стійкість трекінгу сигналів. При цьому фазова похибка між елементами не перевищувала 5°, що свідчить про достатню стабільність для використання у високодинамічних сценаріях. Порівняно з класичними авіаційними 7-елементними антенами, нова конструкція мала удвічі менший діаметр і масу, але подібний рівень ефективності. Зазначено, що основними викликами для подальшого вдосконалення є точне калібрування фазових зсувів, температурна компенсація та зниження взаємного впливу елементів у компактному корпусі.

Для подолання систем РЕБ у зразках високоточних засобів повітряного нападу знайшла широке застосування антена з контрольованою спрямованістю прийому сигналу (CRPA), це активна приймальна антена, яка розроблена для захисту від радіоелектронного подавлення, навігаційного сигналу. Антена реалізована у вигляді цифрової антенної решітки, яка має декілька приймаючих елементів. Методом цифрової обробки сигналів антена спроможна відфільтрувати до N-1 нависних сигналів перешкоди [12, 13]. CRPA знайшла широке застосування в навігації високоточних засобів повітряного нападу, баражуючих боєприпасів (ББ) типу «Shahed» («Герань-2»), авіабомб з уніфікованим модулем плане-

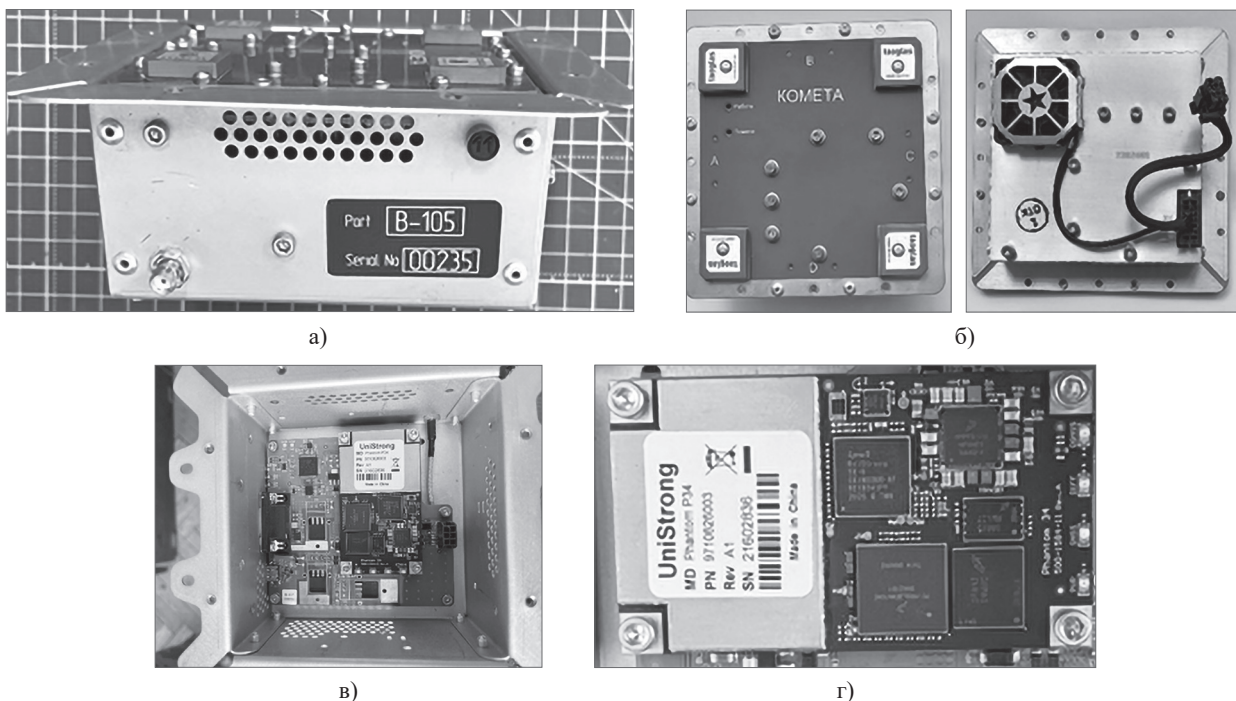


Рис. 1. Приймачі сигналів навігаційних систем, які застосовуються у ББ типу «Shahed» («Герань-2»): а) навігаційний блок В-105; б) малогабаритна адаптивна 4-х елементна антена решітка «КОМЕТА-М»; в) плата комутації; г) навігаційний приймач UniStrong

рування та корекції (УМПК), щоб протистояти радіо-перешкодам та спуфінгу.

На рис. 1 відображені приймачі сигналів навігаційних систем, які застосовуються у ББ типу «Shahed» («Герань-2»).

Дослідження антени від ракети X-32 з ПС СРНС СН-99 (рис. 2) визначило, що антена краще працює по сигналам супутників GPS та по окремим сигналам СРНС ГЛОНАСС.

Дослідження параметричних особливостей 4-елементної малогабаритної адаптивної антенної решітки

«Комета-М» за допомогою програми ANSYS (рис. 3, 4) показало її високу стійкість до радіоелектронного впливу, а її діаграма спрямованості є оптимальною для роботи з супутниками в умовах впливу РЕБ.

Відповідно до технічних умов на «Комета-М» коефіцієнт підвищення стійкості до перешкод приймальної апаратури супутникової навігації споживача за рахунок застосування перешкодозахищеної антенної системи складає не менше 40 дБ. У першу чергу, а згодом і паралельно із застосуванням рішення на базі «Комета-М» було застосоване на «Shahed-136» рішення з 4-елемент-

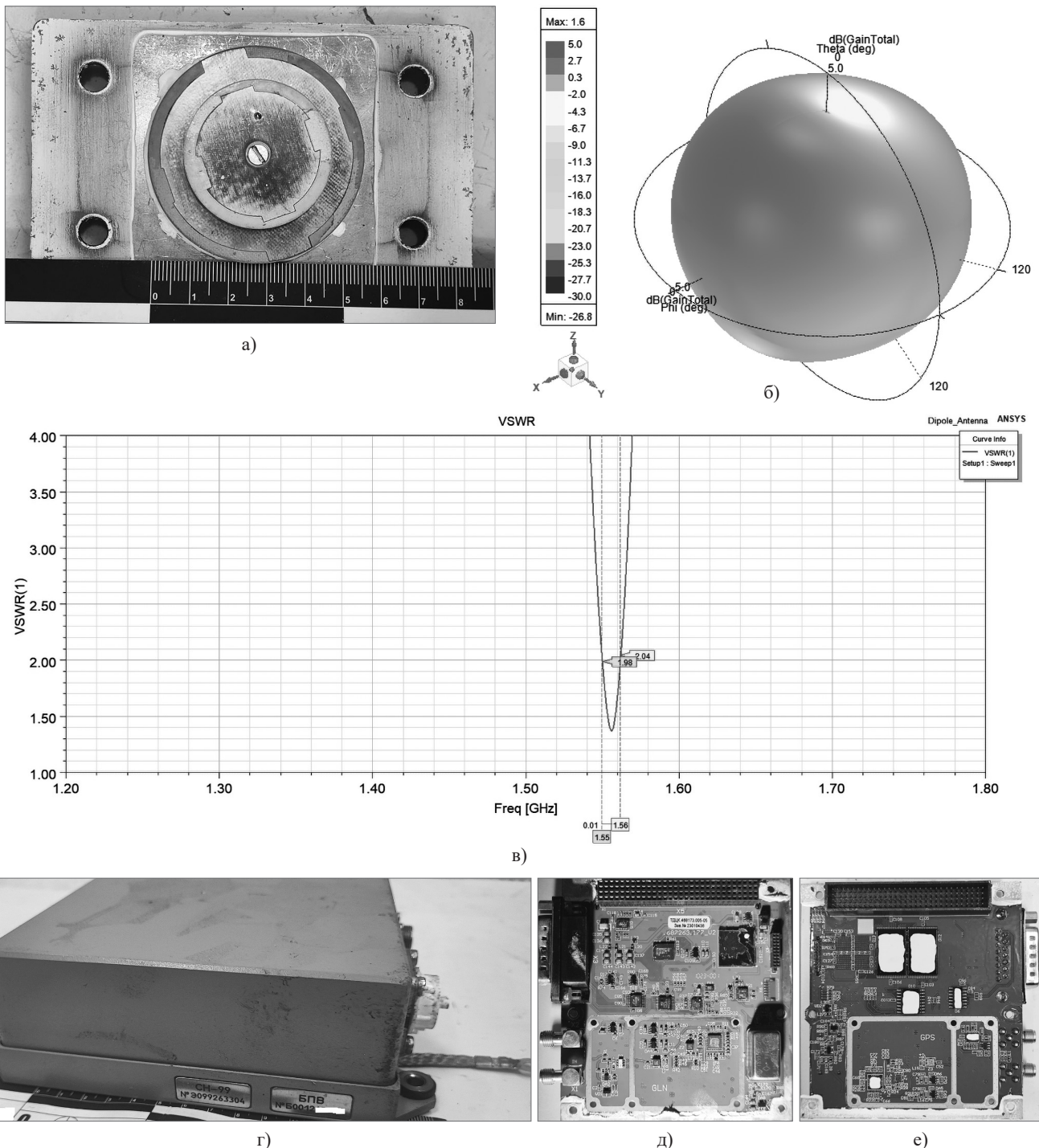
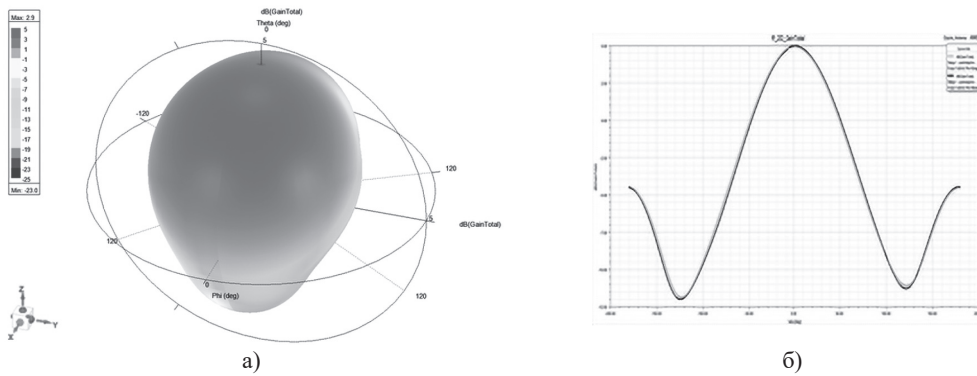
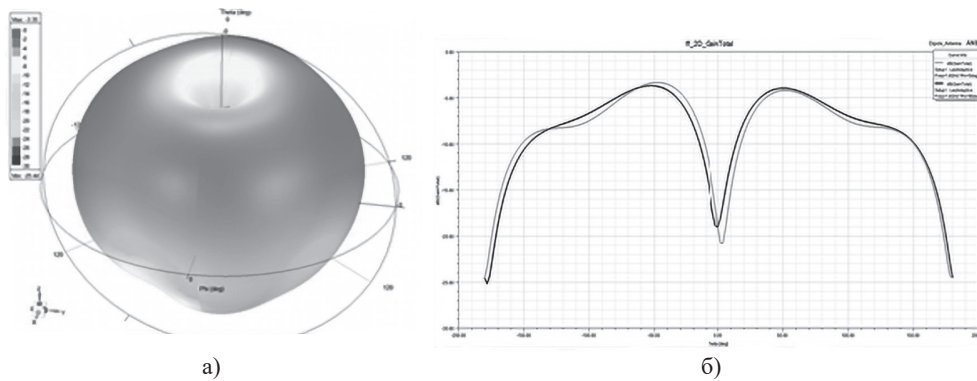


Рис. 2. Досліджена антена з ПС СРНС СН-99 ракети X-32: а) зовнішній вигляд антени; б) 3D – діаграма направленості антени; в) коефіцієнт стоячої хвилі за напругою антени; г) зовнішній вигляд ПС СРНС СН-99; д) топологія плати GLN; е) топологія плати GPS



Р и с . 3. Діаграма спрямованості 4-елементної антенної решітки без перешкод: а) 3D-модель; б) 2D-модель



Р и с . 4. Діаграма спрямованості 4-елементної антени при дії перешкоди (формування нуля діаграми спрямованості у напрямку перешкоди): а) 3D-модель; б) 2D-модель

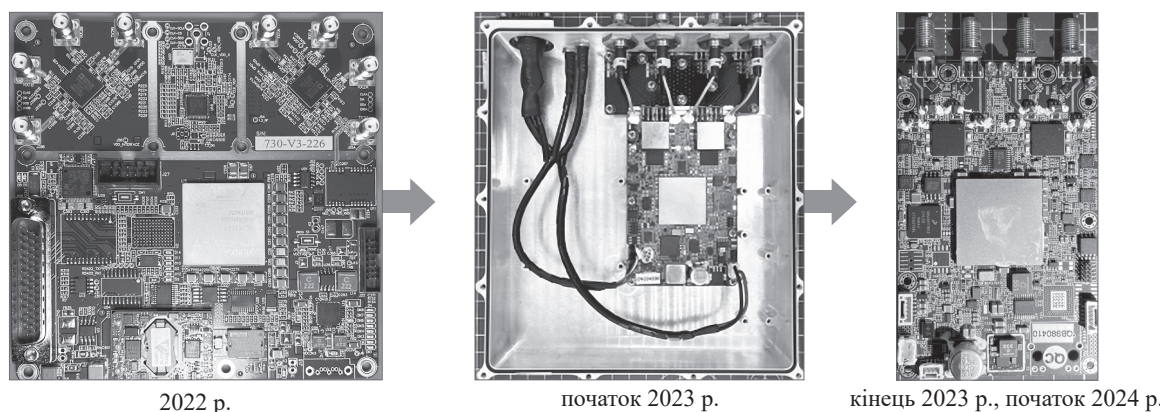
ною CRPA іншої реалізації. Аналіз динаміки структурних змін її блоку перешкодозахисту наведено на рис. 5, при цьому зафіксовані зміни:

– у 2022 р. конструктивна плата займала практично весь блок. Ключові елементи на платі – це FPGA «Xilinx» серії «Kintex-7» для реалізації просторової фільтрації та високопродуктивні трансивери від Analog Devices AD9361;

– у 2023 р. даний блок набув суттєвих змін, він реалізований на значно меншій платі, у перехідному варіанті із платою додаткових фільтрів (початок 2023 р.) та у одноплатному, компактному виконанні (кінець 2023 – початок 2024 р.). Маркування на ключових елементах у новіших версіях відсутнє, але за візуальними ознаками продовжують застосовуватись FPGA «Xilinx» або їх копії.

Вимірювання параметрів перешкодозахисту свідчать, що підвищилась не тільки технологічність, а й рівень перешкодозахисту даного блоку. Параметричний аналіз антен показав, що версії антен як 2022 р., так і 2023 р. призначені для тих самих частот та мають схожі характеристики, що підтверджено вимірюваннями та моделюванням.

Структурний аналіз компонентів антенних решіток типу «Комета» версій «Комета-М», «Комета-М8», «Комета-М12» показав, що вони подібні за конструкцією та мають практично однакову елементну базу, проте суттєво відрізняються кількістю антенних елементів та кількістю синхронізованих приймальних каналів: 4, 8 та 12 відповідно. Конструкція більше 4 каналів вимагає використання більшої кількості чипів для обробки аналогового сигналу, при цьому зберігаючи синхронність між каналами.



Р и с . 5. Динаміка структурних змін блоку перешкодозахисту навігаційної системи БПЛА «Shahed 136» серія «БІ»

«Комета» складається із ПС СРНС, системи адаптивної фільтрації, на базі потужної FPGA (програмованої логічної матриці) Altera Cyclone V, яка має у своєму складі двухядерний процесор Cortex-A9 та широкі можливості по обробці сигналу. Ключовими елементами решітки «Комета» є:

1) ПЛІС ALTERA Cyclone V виробництва США (Intel) та пам'ять EPCQ виробництва США (Intel) для високошвидкісної обробки цифрових даних;

2) 14-розрядний аналого-цифровий перетворювач LTC2174 виробництва США (Linear Technology Corporation з 2017 року – частина компанії Analog Devices);

3) 14-розрядний високошвидкісний ЦАП AD 9755 виробництва США (Analog Devices);

4) GNSS приймач для кінцевого приймання сигналів та визначення місця положення на базі модуля U-blox.

За результатом порівняння основних компонентів решітки «Комета» (табл. 1) можна відмітити, що з появою нових версій збільшується кількість приймальних елементів (каналів) – це тягне за собою необхідність використання більшої кількості 4-канальних АЦП та ПЛІС із більшою кількістю логічних елементів. Інтегрований ПС СРНС на відміну від версії застосування в 2022 році U-blox MAX-M10S набув тенденції постійного застосування у 2023–2025 рр.

Подальший розвиток захисту ПС СРНС від перешкод полягав у збільшенні кількості каналів антенних решіток (рис. 6, 7), удосконалення алгоритмів перешкодозахисту, використання високопродуктивних модулів приймачів (рис. 8).

В цілому ПС СРНС ударного БПЛА типу «Shahed-136» пройшла еволюційні зміни, які можна умовно поділити на такі етапи:

1) 2022 рік – навігаційна система у складі: інерціального модуля із двома приймачами Ublox-M8 (Швейцарія), навігаційного приймача Hemisphere H220 (США), з використанням іранської 4-канальної CRPA, яка має антенні елементи компанії «Taoglas» (Ірландія);

2) кінець 2023 року – 2024 рік – поява удосконаленої 4-канальної CRPA на Shaded-136, яка застосовувалась із GNSS приймачами Ublox M9;

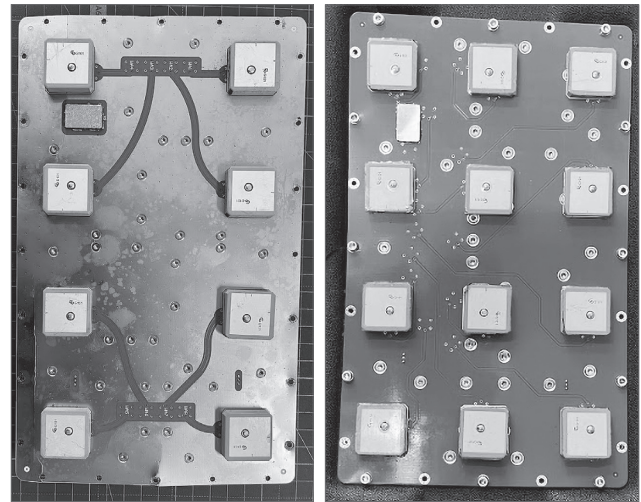


Рис. 6. Решітки «Комета-М8» та «Комета-М12»

3) кінець 2023 року – 2024 рік – поява «Герань-2» (російська версія «Shahed-136») з ПС СРНС у складі: інерціальний модуль, малогабаритна антенна решітка Комета-М (4-канальна), мультидіапазонний (L1, L2, L5) ПС СРНС Unistrong P20 (P327) (Китай);

4) кінець 2024 року – початок 2025 року – використання на Shahed-136 виробництва «Алабуга» круглої 8-канальної CRPA (Китай), у якій виявлені китайські копії компонентів США, наприклад, FPGA Xilinx виробництва ВМТІ;

5) 2025 рік – застосування різних варіантів CRPA: наряду із 8-канальними круглими CRPA та 4-канальними іранського походження, застосовувались: кругла 16-канальна CRPA (Китай), квадратна 16-канальна (Китай) з елементами антенної решітки власного виготовлення, «Комета-М8» та «Комета-М12» (8-ми та 12-елементна антенні решітки відповідно), застосування приймачів Unicore UM982 (Китай).

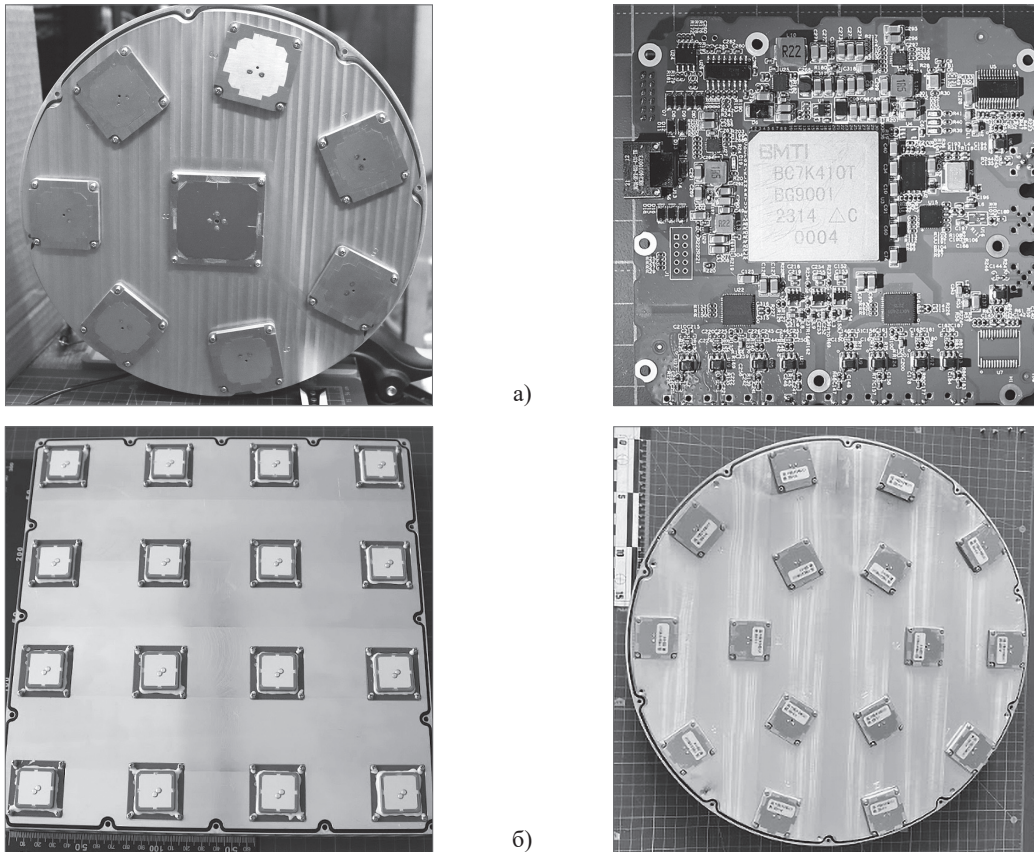
ВИСНОВОК

Таким чином, для вирішення завдань перешкодозахисту ПС СРНС використано наступні рішення:

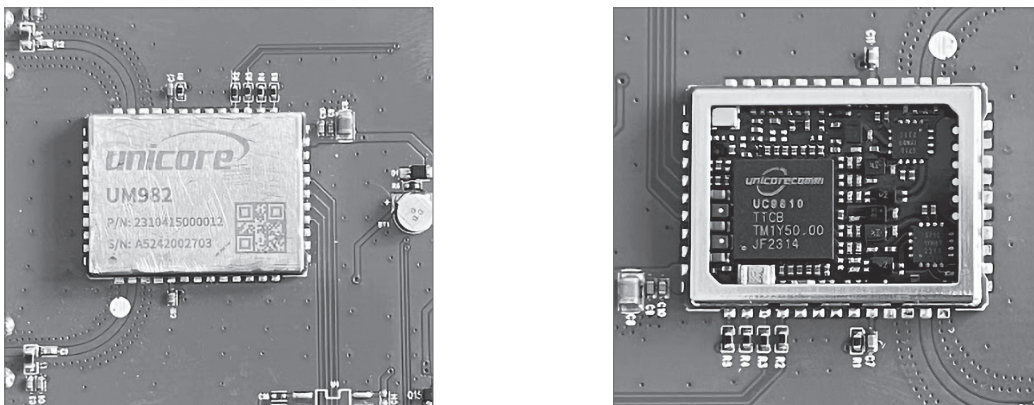
– мультидіапазонність (з приймачем Unistrong);

Таблиця 1. Зміни компонентів «Комета»

	Призначення компонента	2022 рік	2023 рік	2024 рік	2025 рік
		«Комета-М»	«Комета-М»	«Комета-М8»	«Комета-М12»
1	ПЛІС	ALTERA Cyclone V	ALTERA Cyclone V	ALTERA Cyclone V	ALTERA Cyclone V
		5CEFA7F2317N	5CEFA7F2317N	5CEFA9F2317N	Невизначено
2	Пам'ять для ПЛІС	EPCQ64A	EPCQ128	EPCQ128	Невизначено
3	14-розрядний ЦАП	TxDAC AD9755	TxDAC AD9755	TxDAC AD9755	Невизначено
4	14-розрядний АЦП	4-канальний АЦП LTC2174	4-канальний АЦП LTC2174	2 шт. 4-канальних АЦП AD9253	3 шт. 4-канальних АЦП AD9253
5	Вбудований навігаційний приймач	GNSS приймач ПР0-04 від АО «НИИМА «Прогрес»»	GNSS модуль MAX-M10S на базі U-blox M10050-KB (Швейцарія)	GNSS модуль MAX-M10S на базі U-blox M10050-KB (Швейцарія)	GNSS модуль MAX-M10S на базі U-blox M10050-KB (Швейцарія)
		Модуль приймача NV08C-CSM від КБ «Навис»			
		GNSS приймач U-blox M8			



Р и с . 7. CRPA китайського виробництва: а) 8-елементна CRPA;
б) 16-елементна CRPA (круглої та квадратної форми)



Р и с . 8. Модуль UNICORE UM982 (Китай)

- використання нових версій антенних решіток «Ко-мета»;
- поява нових рішень на базі китайських CRPA з 8, 16 каналами.

Основними трендами розвитку CRPA-систем є:

- зменшення габаритів при збереженні ефективності;
 - удосконалення формування діаграми спрямованості;
 - інтеграція обчислювальних модулів у корпус антени;
 - зростання ролі алгоритмічного забезпечення (формування променів, калібрування);
 - збільшення антенних масивів [6];
 - підвищення співвідношення J/S, зниження ймовірності втрати фіксації GNSS, стабільність трекінгу при наявності складного спектру перешкод [7].
- Сучасні тенденції полягають у наступному:

- поєднання апаратного захисту (CRPA) з алгоритмічними засобами – адаптивними фільтрами, машинним навчанням для виявлення аномалій (GPS World [10]);
 - використання гібридних архітектур GNSS/INS, які забезпечують навігацію навіть за повної втрати GNSS-сигналів;
 - автоматизація калібрування масивів антен та використання цифрових процесорів формування променів у компактних корпусах, що дасть змогу створювати перешкодозахищені ПС СРНС для малогабаритних платформ (Safran [5] і Spirent [2]).
- Таким чином, ПС СРНС з CRPA перетворюються з окремого вузла на елемент повністю цифрового ПС СРНС, здатного пристосовуватись до змінного радіочастотного середовища.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Konovaltsev, Andriy. Development of Array Receivers with Anti-Jamming and Anti-Spoofing Capabilities with Help of Multi-Antenna GNSS Signal Simulators. Germany. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/337669170> (дата звернення: 25.10.2025).
2. Конструктивні та функціональні особливості малогабаритної антенної решітки «Комета-М» / Шелемін З.К., Слюсар В.І., Сащук С.І., Голенковська Т.І. *Озброєння та військова техніка*. 2025. № 1(45). С. 45—55. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1\(45\).45-55](https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1(45).45-55).
3. Карлов Д.В., Коробецький О.В., Резніков 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). С. 60—66.
4. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Забезпечення заводозахисності приймачів сигналів GNSS шляхом використання алгоритмів просторової фільтрації. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 3(23). С. 62—67. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.3\(23\).62-67](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.3(23).62-67).
5. Inside GNSS. CRPA for GNSS: Benefits, Challenges and Testing. *Inside GNSS Magazine*. 2023. Vol. 19. No. 3. Available at: <https://insidengss.com>; <https://insidengss.com/crpa-for-gnss-benefits-challenges-and-testing/> (дата звернення: 22.10.2025).
6. Spirent Communications. CRPA Antennas Explained: Understanding Controlled Reception Pattern Antennas. Spirent White Paper. 2023. Available at: <https://www.spirent.com> (дата звернення: 18.10.2025).
7. Fante, R. L. (2002). Effect of Adaptive Array Processing on GPS Signals. The MITRE Corporation Technical Report MTR 02W0000211. Bedford, MA, USA.
8. Safran Electronics & Defense. An Engineer's Guide to CRPA Testing. Safran Technical White Paper. 2022. Available at: <https://www.safran-electronics-defense.com> (дата звернення: 02.10.2025).
9. Schirmer, C., Zibold, R. & Konovaltsev, A. (2018). Evaluation of Array Antenna Systems for Global Navigation Satellite System Receivers. *IET Radar, Sonar & Navigation*. Vol. 12. No. 2. Pp. 201—210. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0310>.
10. Sun, L., Wang, H., Zhang, Y. & Chen, J. (2022). Anti-Jamming Method for Array Antenna Receivers Based on Adaptive Beamforming. *Remote Sensing (MDPI)*. Vol. 14. No. 3. Article 562. <https://doi.org/10.3390/rs14030562>.
11. NAVSYS Corporation. Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna. *ION GNSS Proc*. 2014. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1488.0968>.
12. Anti-jam technology: Demystifying the CRPA – GPS World. *GPS World – The Business and Technology of Global Navigation and Positioning*. 12 квітня 2017. <https://www.gpsworld.com/anti-jam-technology-demystifying-the-crpa/> (дата звернення: 20.10.2025).
13. What are CPRA or Controlled Reception Pattern Antennas? <https://www.everythingrf.com/community/what-are-controlled-reception-pattern-antennas> (дата звернення: 15.10.2025).

REFERENCES

1. Konovaltsev, Andriy. Development of Array Receivers with Anti-Jamming and Anti-Spoofing Capabilities with Help of Multi-Antenna GNSS Signal Simulators. Germany. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/337669170>.
2. Shelemin, Z.K., Slyusar, V.I., Sashchuk, S.I. & Holenkovska, T.I. (2025). “Konstruktyvni ta funktsionalni osoblyvosti malohabarytnoi antennoi reshitky «Kometa-M»” [Structural and Functional Features of the Compact Antenna Array «Kometa-M»]. *Weapons and Military Equipment*. No. 1(45). Pp. 45—55. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1\(45\).45-55](https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1(45).45-55).
3. Karlov, D.V., Korobetskyi, O.V. & Rieznikov, Yu.V. (2020). “Rekomendatsii shchodo rozrobky zakhyshchenoho vid zavad priimacha hlobalnykh navihatsiinykh suputnykovykh system dlia vyrishennia zavdan Zbroinykh Syl Ukrainy” [Recommendations for Developing an Interference-Resistant GNSS Receiver for the Armed Forces of Ukraine]. *Weapons Systems and Military Equipment*. No. 4(64). Pp. 60—66.
4. Zibin, S.D., Popov, A.O. & Tverdokhlibov, V.V. (2019). “Zabezpechennia zavadozakhyshchenosti priimachiv signaliv GNSS shliakhom vykorystannia alhorytmiv prostorovoi filtratsii” [Ensuring GNSS Receiver Interference Protection by Using Spatial Filtering Algorithms]. *Weapons and Military Equipment*. No. 3(23). Pp. 62—67.
5. Inside GNSS. CRPA for GNSS: Benefits, Challenges and Testing. *Inside GNSS Magazine*. 2023. Vol. 19. No. 3. Available at: <https://insidengss.com>; <https://insidengss.com/crpa-for-gnss-benefits-challenges-and-testing/> (accessed: 22.10.2025).
6. Spirent Communications. CRPA Antennas Explained: Understanding Controlled Reception Pattern Antennas. Spirent White Paper. 2023. Available at: <https://www.spirent.com> (accessed: 18.10.2025).
7. Fante, R. L. (2002). Effect of Adaptive Array Processing on GPS Signals. The MITRE Corporation Technical Report MTR 02W0000211. Bedford, MA, USA.
8. Safran Electronics & Defense. An Engineer's Guide to CRPA Testing. Safran Technical White Paper. 2022. Available at: <https://www.safran-electronics-defense.com> (accessed: 02.10.2025).
9. Schirmer, C., Zibold, R. & Konovaltsev, A. (2018). Evaluation of Array Antenna Systems for Global Navigation Satellite System Receivers. *IET Radar, Sonar & Navigation*. Vol. 12. No. 2. Pp. 201—210. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0310>.
10. Sun, L., Wang, H., Zhang, Y. & Chen, J. (2022). Anti-Jamming Method for Array Antenna Receivers Based on Adaptive Beamforming. *Remote Sensing (MDPI)*. Vol. 14. No. 3. Article 562. <https://doi.org/10.3390/rs14030562>.
11. NAVSYS Corporation. Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna. *ION GNSS Proc*. 2014. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1488.0968>.
12. Anti-jam technology: Demystifying the CRPA – GPS World. *GPS World – The Business and Technology of Global Navigation and Positioning*. April, 12. 2017. <https://www.gpsworld.com/anti-jam-technology-demystifying-the-crpa/>

www.gpsworld.com/anti-jam-technology-demystifying-the-crpa/ (accessed: 20.10.2025).

13. What are CPRA or Controlled Reception Pattern Antennas? <https://www.everythingrf.com/community/what-are-controlled-reception-pattern-antennas> (accessed: 15.10.2025).

Saschuk S.I., Slyusar V.I., Shelemin Z.K., Drogozov K.V.

EVOLUTIONARY TRENDS IN SATELLITE RADIO NAVIGATION SIGNAL RECEIVERS FOR HIGH-PRECISION AIRBORNE WEAPON SYSTEMS

The article presents the results of research conducted on-board navigation systems of unmanned aerial vehicles and missiles used by the Russian Federation against Ukraine, using the example of «Shahed-136» (Geran-2), X-32. The changes that have occurred in the structure of antenna systems and signal receivers of satellite navigation systems are analyzed.

The trends in the further development of interference-protected navigation receivers with small-sized adaptive antenna arrays are studied. 3D models of antennas created using ANSYS software are presented. The work includes a parametric and structural analysis of navigation receivers, with special attention paid to antennas with a controlled radiation pattern. The article draws attention to the further development of protection of navigation receivers from interference, which consist in increasing the number of antenna array channels, as well as in improving interference protection algorithms.

The conclusions draw attention to the interference protection of receivers, which consist of multi-band and integration with inertial modules. Trends in the development of antennas with a controlled directional pattern are identified, which are aimed at reducing dimensions while maintaining efficiency, improving the formation of the directional pattern, integrating computing modules into the antenna body, increasing the role of algorithmic support (beamforming, calibration), increasing antenna arrays, increasing the signal-to-noise ratio, reducing the probability of GNSS fixation loss, tracking stability in the presence of a complex spectrum of interference.

Keywords: navigation system, airborne systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), spoofing, electronic warfare, antenna with a controlled directional pattern.

Відомості про авторів:

Сащук Святослав Іванович

начальник науково-дослідної лабораторії розвитку засобів навігаційного та топогеодезичного забезпечення науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7246-9110>
svyatoslavsaschuk@gmail.com

Слюсар Вадим Іванович

доктор технічних наук, професор
начальник групи головних наукових співробітників
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
e-mail: swadim@ukr.net

Шелемін Захар Костянтинів

молодший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії розвитку засобів навігаційного та топогеодезичного забезпечення науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-7740-2245>
e-mail: zarshel@gmail.com

Дрогозов Костянтин Віталійович

науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку засобів радіоелектронної боротьби науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-8785-9805>
kostya19712109@gmail.com

Information about the authors:

Saschuk Svyatoslav

Head of the Research Laboratory for the Development of Navigation and Topogeodetic Support Tools of the Research Department for the Development of Weapons and Military Equipment of the Support Forces Scientific Research Department for the Development of Armament and Military Equipment of the Special Forces Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7246-9110>
svyatoslavsaschuk@gmail.com

Slyusar Vadym

Doctor of Technical Sciences
Professor, Group of Chief Research Scientists for Scientific Research Management
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
email: swadim@ukr.net

Shelemin Zakhar

Junior Research Fellow at the Research Laboratory for the Development of Navigation and Topogeodetic Support Tools of the Research Department for the Development of Weapons and Military Equipment of the Support Forces Scientific Research Department for the Development of Armament and Military Equipment of the Special Forces Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-7740-2245>
e-mail: zarshel@gmail.com

Drogovoz Kostyantyn

Research Fellow of the Research Department for the Development of Electronic Warfare Equipment of the Research Administration for the Development of Armaments and Military Equipment of the Special Troops Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-8785-9805>
kostya19712109@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 04.11.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.