

БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОВТ

УДК 621.396

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.51-55>А.М. Зубков¹, Я.В. Красник¹, С.А. Мартиненко¹, В.А. Юнда¹, С.В. Миронюк²¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів²Державне підприємство “Конструкторське бюро “Південне”, Дніпро

Article history: 23 February 2025; Revised 03 March 2025; Accepted 04 March 2025

УНІФІКОВАНИЙ БОРТОВИЙ РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ КООРДИНАТОР МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНОЇ ЗБРОЇ

Виконаний аналіз наукових і практичних шляхів розвитку всепогодного і цілодобового високоточного ракетно-артилерійського озброєння на основі міжпроектної уніфікації радіолокаційних координаторів ракети (снаряда) за критерієм “ефективність/вартість”. При цьому обґрунтована доцільність використання міліметрового радіодіапазону дякуючи можливостям мінімізації масогабаритних характеристик координаторів і конструктивного їх суміщення з координаторами теплового й оптичного діапазонів в складі багатоспектральних систем самонаведення. Визначені границі практичного застосування координаторів в спектральних “вікнах прозорості” приземного шару атмосфери 36 ГГц і 94 ГГц залежно від моделей ракет і калібрів снарядів для досягнення максимальної дальності ділянки самонаведення і з врахуванням еволюції технічних характеристик елементної бази. Узагальнений досвід вітчизняних досліджень і розробок радіолокаційних координаторів міліметрового діапазону. Визначені перспективні напрями подальшого їх розвитку.

Ключові слова: високоточна зброя, головка самонаведення, радіолокаційний координатор, радіометр, “вікно прозорості” атмосфери, парціальний канал самонаведення.

Постановка проблеми

Координатор цілі є основною інформаційною ланкою системи самонаведення ракети (снаряда), який визначає її потенційну точність. Перспективи розширення бойових можливостей озброєння РВіА, яке самонаводиться, в напрямках всепогодності, цілодобовості і завадостійкості безпосередньо зв’язані з створенням малогабаритних радіолокаційних координаторів.

Практичні міркування, які диктуються експлуатаційними обмеженнями (малі габарити і вага апаратури, мінімізація геометричних розмірів апертури антени), визначають перспективність використання міліметрового діапазону (ММД) радіохвиль для побудови координаторів боєприпасів, які самонаводяться і самоприцілюються. І, дійсно, ММД, займаючи в спектрі електромагнітних хвиль проміжне розташування між ділянками традиційного радіо (довжина хвиль більше 1 см), інфрачервоного (довжина хвиль 1 – 10 мкм) і видимого (довжина хвиль більше ~ 0,5 мкм) діапазонів, оптимальним чином поєднує в собі переваги цих діапазонів. З радіодіапазону він отримав можливість забезпечення інформації в умовах обмеження оптичної прозорості приземного шару атмосфери (ніч, несприятливі

погодні умови, пилові і аерозольні завади), а з інфрачервоного і оптичного діапазонів – можливість побудови апаратури з високою кутовою просторовою роздільною здатністю при обмежених розмірах апертури антени (об’єктива). Проте широке впровадження техніки ММД в практику створення малогабаритних радіолокаційних координаторів стримується високою вартістю надвисокочастотних електронних компонентів ММД і трактив на їх основі. Вказана обставина стимулює створення і дослідження методології і базових підходів до проектування апаратури всепогодних і цілодобових радіолокаційних координаторів, які можуть стати основою для міжпроектної уніфікації бортових систем високоточної зброї на основі критерію “ефективність/вартість”.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Багатолітній досвід наукових організацій і промисловості України в області створення бортової техніки ММД дозволяє сформулювати основні елементи базового підходу до інженерного синтезу уніфікованого радіолокаційного координатора ММД головки самонаведення (ГСН) [1, 2, 3, 4].

1. Вибір оптимального піддіапазону в міліметрових “вікнах прозорості” приземного шару атмосфери для забезпечення енергетичних і точнісних

характеристик режиму самонаведення (гранична дальність, ширина і крутизна пеленгаційної характеристики).

2. Застосування в координаторі в загальному випадку двох паралельних каналів: активного і радіометричного (радіотеплового). Перший забезпечує надійний пошук і захват на граничній дальності ділянки самонаведення, а другий підвищує точність самонаведення шляхом виключення впливу “кутових шумів” цілі на кінцевій ділянці.

3. Застосування в активному каналі зонduючого сигналу і алгоритмів обробки ехо-сигналу, інваріантних до доплерівських ефектів взаємного руху ракети (снаряда) і цілі на фоні підстильної поверхні, які дозволяють здійснювати самонаведення як на рухомі, так і на нерухомі цілі.

4. Забезпечення чутливості радіометричного каналу виявлення цілі з мінімальним тепловим контрастом до $0,1^\circ\text{K}$.

5. Використання в конструкції апаратури координатора тільки твердотільної елементної бази для мінімізації масогабаритних параметрів.

Формулювання мети статті

Обґрунтування технічних шляхів удосконалення за критерієм “ефективність/вартість” ракетно-артилерійського озброєння цілодобового і всепогодного застосування на основі уніфікації апаратури радіолокаційних координаторів.

Виклад основного матеріалу

Послідовний розвиток результатів проаналізованих вище досліджень, які підтверджені теоретичним і експериментальними шляхами, дає підставу констатувати:

енергетичні розрахунки, які визначають граничні дальності активного самонаведення, доцільно проводити для ефективної поверхні розсіювання цілі $\sim 10\text{ м}^2$, що характерна для типових наземних цілей (бойова техніка, опорний пункт, командний пункт тощо);

при граничній дальності ділянки самонаведення до 1300–1500 м і діаметрах апертури антени до 100 мм оптимальним піддіапазоном виявляється “вікно прозорості” атмосфери, яке центрується навколо частоти 94 ГГц (довжина хвилі 3 мм). При цьому із міркувань забезпечення роздільної здатності за дальністю не гірше 0,5 м і електромагнітної сумісності “вікно прозорості” призначається в рамках смуги 4 ГГц ділянками по 300 МГц. Додатковими аргументом на користь вибору цього діапазону є підвищений радіометричний контраст типових наземних цілей на фоні підстильної поверхні, що дозволяє оптимально поєднувати методи активної радіолокації і радіометрії;

для граничної дальності ділянки самонаведення більше 1500 м, незалежно від діаметру апертури

антени, оптимальним піддіапазоном являється “вікно прозорості” атмосфери, яке центрується навколо частоти 36 ГГц (довжина хвилі 8 мм) і також деталізується ділянками по 300 МГц;

наявність активного (радіолокаційного) каналу є обов’язковою для граничних дальностей самонаведення при заданій моделі ракети (снаряду);

радіометричний канал є основним для малих дальностей самонаведення або додатковим на кінцевій ділянці самонаведення (для виключення впливу “кутових шумів” цілі в контурі управління ракетою (снарядом));

комплексування радіотехнічних каналів самонаведення з тепловими або оптичними доцільно для досягнення граничних точностей попадання ракети (снаряда) в геометричні контури “картинної проєкції” цілі.

Таким чином, критерієм вибору спектральної ділянки роботи координатора ГСН в міліметровому діапазоні хвиль є дальність самонаведення, що вимагається.

Як кількісні критерії ефективності координатора ГСН пропонуються:

мінімальний енергетичний цілефононий контраст, при якому забезпечується надійне виявлення наземних цілей заданого класу з ймовірністю правильного виявлення не нижче 0,8 і ймовірності хибної тривоги не вище 10^{-5} на максимальній дальності самонаведення

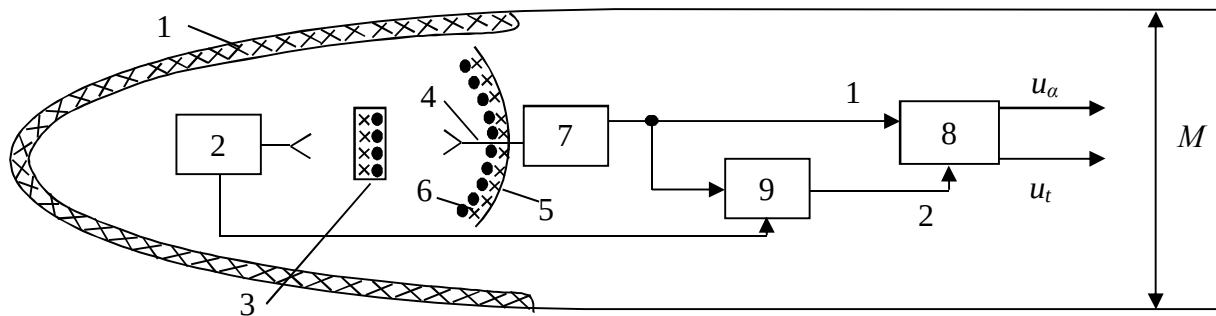
$$E = \frac{P_{\text{ц}}}{P_{\text{ф}}} \Big|_{r_{\text{max}}},$$

де $P_{\text{ц}}$, $P_{\text{ф}}$ – потужність ехо-сигналу цілі і фону на вході ГСН; r_{max} – максимальна дальність ділянки самонаведення, яка повинна складати не менше 5% від граничної дальності стрільби.

Принципове значення при створенні радіолокаційних координаторів цілі має місце фундаментальний фізичний ефект, який полягає в тому, що в радіодіапазоні металеві елементи поверхні цілі мають високий коефіцієнт відображення $\rho \gg V$, а діелектричні і напівпровідникові елементи поверхні, навпаки, мають високий коефіцієнт поглинання $V \gg \rho$. Цей факт дозволяє розглядати з точки зору отримання інформації про ціль активний радіолокаційний і радіометричний канали як такі, що формують “позитив” і “негатив” цілі, відповідно. На практиці це дозволяє суттєво підвищити бойову ефективність самонаведення за рахунок конструктивно-функціонального комплексування радіолокаційного і радіометричного каналів самонаведення [5]. Під конструктивним комплексуванням передбачається, перш за все, реалізація просторових каналів обробки шляхом створення єдиної антенно-фідерної системи для радіолокаційного та радіометричного режиму наведення ракети (снаряда) [6]. При цьому

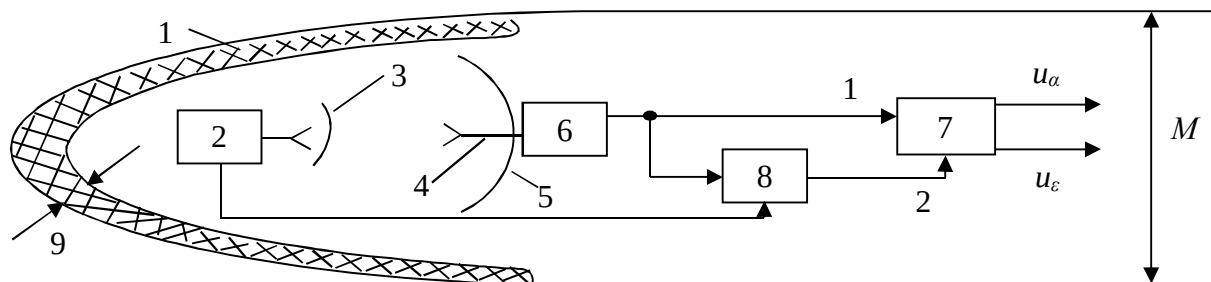
функціональне комплексування забезпечується в процесорній частині координатора. В роботі [7] обґрунтовані два технічних варіанти комплексування

радіолокаційного і радіометричного каналів бортового координатора системи самонаведення ракети (снаряда), що наведені на рис. 1, 2.



1 – діелектричний аеродинамічний обтікач; 2 – приймач теплового випромінювання; 3 – поляризаційний селектор на гіперболічній діелектричній підкладці; 4 – опромінювач радіолокаційного діапазону; 5 – параболічне дзеркало; 6 – поляризаційний селектор на параболічній діелектричній підкладці; 7 – приймач-передавач міліметрового діапазону; 8 – процесорний блок формування сигналів управління польотом ракети; 9 – перемикач управління;
 u_α , u_t – сигнали управління за курсом і тангажем; M – розмір моделі ракети

Рис. 1. Перший варіант технічної реалізації єдиного діаграмоутворення парціальних спектральних каналів



1 – діелектричний аеродинамічний обтікач; 2 – приймач теплового випромінювання; 3 – дзеркало теплового каналу (одночасно контррефлектор радіолокаційного каналу); 4 – опромінювач радіолокаційного діапазону; 5 – параболічне дзеркало радіолокаційного каналу; 6 – приймач-передавач міліметрового діапазону; 7 – процесорний блок формування сигналів управління польотом ракети; 8 – перемикач управління; u_α , u_ϵ – сигнали управління за курсом і тангажем; 9 – змінна товщина; M – розмір моделі ракети

Рис. 2. Другий варіант технічної реалізації єдиного діаграмоутворення парціальних спектральних каналів

Переваги першого варіанта:

- слабка залежність характеристик парціальних каналів (ПК) самонаведення від конструкції обтікача;
- можливість роздільного налаштування і регулювання обтікача та апертурної частини ПК.

Недоліком є складність виготовлення і налаштування поляризаційних селекторів на параболічній і гіперболічній поверхнях.

Перевагою другого варіанта є більша енергетична ефективність і менша складність виготовлення і налаштування.

Недоліки другого варіанта:

- неможливість роздільного налаштування і регулювання обтікача та апертурної частини ПК;

- порівняна складність розрахунку геометричного профілю внутрішньої поверхні обтікача.

Ефективність запропонованих практичних рішень щодо реалізації уніфікованого бортового радіолокаційного координатора обґрунтована методом комп'ютерного моделювання в роботі [8].

У роботах [9, 10] обґрунтована структура і оптимальна сукупність тактико-технічних характеристик двоспектрального (94 ГГц + 30 ТГц) координатора цілі, яка представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики двоспектрального координатора цілі

Характеристики	Радіолокаційний канал	Інфрачервоний канал
Дальність r , м	500-10000	
Ефективна поверхня розсіювання цілі σ_c , m^2	20	
Ефективна поверхня розсіювання фону σ_f , m^2	$10^{-3}-10^{-1}$	
Кут візування цілі α , град	80	
Довжина хвилі λ , мм	3	0,10
Частота f , ГГц, (ТГц)	95	30
Частота повторення імпульсів τ , Гц	$7,7 \cdot 10^{-8}$	–
Потужність приймача-передавача P , Вт	17	–
Коефіцієнт підсилення антени, Га	0,4	–
Температура цілі T_1 , К	301	301
Температура фону T_2 , К	300	300
Коефіцієнт шуму, N	10	5
Добротність відпрацювання сигналу, Q	644	$1 \cdot 10^{10}$
Коефіцієнт прозорості обтікача, k_{pf}	0,85	

Висновки

1. Уніфікація бортових радіолокаційних координаторів міліметрового діапазону для високоточного ракетного і артилерійського озброєння досягається шляхом:

використання єдиної схеми діаграмоутворення для різних за спектром радіолокаційних каналів (діапазон 8 мм – для оперативно-тактичних ракет, діапазон 3 мм – для тактичних ракет і артилерійського озброєння);

трансформації габаритно-вагових параметрів приймача-передавача при збереженні енергетики для максимальної дальності дії координатора, пропорційно відношенню робочих частот радіолокаційних каналів;

використання універсальної цифрової елементної бази, інваріантної до діапазону роботи радіолокаційного каналу.

2. Універсальність практичного застосування підходу, що пропонується, забезпечується можливістю включення в структуру уніфікованого координатора приймача теплового випромінювання в інфрачервоному діапазоні (блок 2 на рис. 1, 2).

Список літератури

1. Зубков А.М., Мартиненко С.А. Синтез і аналіз структури координатора цілі багатоспектральної системи самонаведення. *Артилерійське і стрілецьке озброєння*. 2010. № 2. С. 11-14.
2. Розвиток систем самонаведення високоточних босприпасів РВіА СВ ЗС України. *Збірник тез науково-практичного семінару*. Львів: АСВ, 2010. 85 с.
3. Зубков А.М., Мартиненко С.А., Сірий Ю.І., Красник Я.В., Юнда В.А. Фізичні основи ракетної зброї. Львів: АСВ, 2012. 459 с.
4. Системи самонаведення для сучасних ТР (ОТР) та їх високоточного бойового оснащення. *Вісник воєнно-наукової інформації*. Суми: Науковий центр бойового застосування ракетних військ і артилерії Сумського державного університету, 2012. 28 с.

5. Обґрунтування і розробка принципів побудови комплексованої ГСН. Звіт про НДР (заклучний). Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного № 111/0031. Львів: АСВ, 2014. 128 с.

6. Дослідження і оцінка науково-технічного рівня, а також ефективності високоточних засобів озброєння з комплексованими головками самонаведення. Звіт про НДР (заклучний). Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. Львів: АСВ, 2014. 119 с.

7. Zubkov A., Yunda V., Kashin S. Comparative analysis of options for homing channels integration for operational – tactical and tactical missiles. *International Conference Microwave and Radar Week*. 2015.

8. Розробка методу комп'ютерного моделювання мультиспектральної фоноцільової обстановки для наведення (самонаведення) оперативно-тактичних (тактичних) ракет нового покоління. Звіт про НДР (заклучний). Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного № 0101U001572. Львів: АСВ, 2014. 124 с.

9. Спосіб наведення ракети на наземну ціль при зна-козмінному цілефоновому контрасті і координатор цілі для його реалізації: пат. 109052 Україна: МПК G01S13/00, G01S13/28, № 201311910; заявл. 10.10.2013; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13.

10. Юнда В.А., Зубков А.М., Косовцов Ю.М., Атаманюк В.В., Мочерад В.С. Комп'ютерне моделювання мультиспектральної цілефонової обстановки при самонаведенні ракети на наземну ціль. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016, № 1 (22). С. 151-155.

References

1. Zubkov A.M. and Martynenko S.A. (2010), "Syntez i analiz struktury koordynatora tsili bahatospektralnoyi systemy samonavedennya" [Synthesis and analysis of the structure of the target coordinator of the multispectral homing system] *Artillery and small arms*. № 2. pp. 11–14. [in Ukrainian]

2. (2010), "Rozvytok system samonavedennya vysokotochnykh boyeprypasyv RViA SV ZS Ukrayiny" [Development of homing systems for precision munitions RViA SV Armed Forces of Ukraine]. *Collection of abstracts of the scientific and practical seminar*. Lviv: NAA. 85 p. [in Ukrainian]

3. Zubkov A.M., Martynenko S.A., Gray Y.I., Krasnik Y.V. and Yunda V.A. (2012), "Fizychni osnovy raketnoyi zbroyi" [Physical foundations of missile weapons]. Lviv: NAA. 459 p. [in Ukrainian]

4. (2012), "Systemy samonavedennya dlya suchasnyh TR (OTR) ta yih vysokotochnoho boyovoho osnashchennya" [Homing systems for modern TR (OTR) and their high-precision combat equipment] *Bulletin of Military Scientific Information*. Sumy: Scientific Center for Combat Use of Missile Forces and Artillery of Sumy State University. 28 p. [in Ukrainian]

5. (2014), "Obhruntuvannya i rozrobka printsypiv pobudovy kompleksovanoyi HSN" [Justification and development of principles for building a comprehensive GOS] Research report (final). Hetman Petro Sahaidachnyi Army Academy. № 111/0031. Lviv: AA. 128 p. [in Ukrainian]

6. (2014), "Doslidzhennya i otsinka naukovo-tekhnichnoho rivnia, a takozh efektyvnosti vysokotochnykh zasobiv ozbroynennya z kompleksovanyimi holovkami samonavedennya" [Research and evaluation of the scientific and technical level, as well as the effectiveness of high-precision weapons with integrated homing heads]. Research report (final). Hetman Petro Sahaidachnyi Army Academy. Lviv: AA. 119 p. [in Ukrainian]

7. Zubkov A., Yunda V. and Kashin S. (2015), Comparative analysis of options for homing channels integration for operational – tactical and tactical missiles. *International Conference Microwave and Radar Week*.

8. (2014), "Rozrobka metodu kompyuternoho modelyuvannya multyspektralnoyi fonotsilovoyi obstanovky dlya navedennya (samonavedennya) operatyvno-taktychnykh (taktychnykh) raket novoho pokolinnya" [Development of a method for computer modeling of multispectral phono-target environment for guidance (homing) of new generation operational-tactical (tactical) missiles]. Research report (final). Hetman Petro Sahaidachnyi Academy of Ground Forces № 0101U001572. Lviv: DIA,. 124 p. [in Ukrainian]

9. (2015), Sposib navedennya rakety na nasemnu tsil pry znakozminnomu tsilefonovomu kontrasti i koordynator tsili dyja yoho realizatsiyi: [Method of missile guidance to ground target at sign-changing tselefon contrast and target coordinator for its implementation] pat. 109052 Ukraine: IPC G01S13/00, G01S13/28, № 201311910; declared. 10.10.2013; publ. 10.07.2015, Bul. № 13. [in Ukrainian]

10. Yunda V.A., Zubkov A.M., Kosovtsov Y.M., Atamanyuk V.V. and Mocherad V.S. (2016), "Kompyuterne modelyuvannya multispektralnoyi tsilefonovoyi obstanovky pry samonavedenni rakety na nasemnu tsil" [Computer modeling of multispectral round-ephone situation during self-guidance of a missile to a ground target]. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. № 1 (22). pp. 151-155. [in Ukrainian]

SIDE RADIOLOCATION CO-ORDINATOR OF MILLIMETRIC RANGE IS COMPATIBLE FOR HIGH-FIDELITY WEAPON

A. Zubkov, Y. Krasnik, S. Martynenko, V. Yunda, S. Mironyuk

Executed analysis of scientific and practical ways of development of all-weather and twenty-four-hour high-fidelity rocket-artillery armament on the basis of interproject unitization of radiolocation coordinators of rocket(to the projectile) on a criterion "efficiency/cost". Thus reasonable expediency of the use of millimetric radiorange, thanking possibilities of minimization of масогабаритних descriptions of coordinators and their structural combination with the coordinators of thermal and optical ranges in composition many spectral systems of homing. Set borders of practical application of coordinators in spectral "window of the ground layer of atmosphere regions" 36 ГГц and 94 ГГц depending on міделіе of rockets and calibers of projectiles for the achievement of maximal distance of area of homing and taking into account the evolution of technical descriptions of element base. Generalized experience of home research-and-developments radiolocation coordinators of millimetric range. Certain perspective directions further. The technical ways of improving the rocket-artillery weapons of round-the-clock and all-term use on the basis of the unification of the equipment of radar coordinators controlled ammunition were conducted according to the criterion "Efficiency/value". The unification of the onboard radar coordinators of the millimeter range for high -precision rocket and artillery weapons is achieved by: use of a single diagram of diagram for different radar channels (8 mm range-for operative-tactical missiles, 3 mm range-for tactical missiles and artillery weapons); transformation of the overall and weight parameters of the receiver-transmitter while maintaining energy for the maximum range of the coordinator, proportional to the ratio of the operating frequencies of the radar channels; use of a universal digital elemental base, invariant to the range of radar channel.

Keywords: precision weapon, homing head, radar coordinator, radiometer, atmospheric "transparency window", partial homing channel.