Напрями розвитку систем постановки перешкод засобам видового космічного спостереження провідних держав світу

Development Trends in Jamming Systems for Space-Based Imagery Intelligence Assets in Leading Countries

Михайло Ракушев [A]
Corresponding author: доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри, e-mail: r16mu0977@meta.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7703-3287

Євген Жуков [B]
старший науковий співробітник, e-mail: zvwork11@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-1251-946X

Ірина Фещенко [B]
старший науковий співробітник, e-mail: griceva.irina@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-8896-1326

Mikhailo Rakushev [A]
Corresponding author: Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department, e-mail: r16mu0977@meta.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7703-3287

Yevhen Zhukov [B]
Senior Researcher, e-mail: zvwork11@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-1251-946X

Iryna Feshchenko [B]
Senior Researcher, e-mail: griceva.irina@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-8896-1326

[A] Національний університет оборони України, м. Київ, Україна
[B] Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, м. Київ, Україна

[A] National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[B] Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine

Received: August 30, 2026 | Revised: September 29, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 355.4:623.62:629.78

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.18

Мета роботи. Систематизувати відомості про наземні системи протидії видовому космічному спостереженню провідних держав світу, порівняти їхні архітектури, фізичні механізми впливу та визначити основні тенденції розвитку.

Метод дослідження. Застосовано структурований огляд наукових публікацій, офіційних документів, аналітичних звітів і матеріалів розробників. Використано системний підхід, класифікацію, порівняльний аналіз, математичне моделювання та узагальнення. Достовірність технічних відомостей оцінено шляхом зіставлення незалежних джерел.

Результати дослідження. Встановлено, що протидія видовому космічному спостереженню передбачає вплив на бортові радари із синтезованою апертурою, оптико-електронні сенсори та радіолінії передавання даних. Розрахункові оцінки засвідчили потенційні енергетичні переваги імітаційних перешкод порівняно із шумовим подавленням за визначених умов моделювання. Виокремлено чотири тенденції: розвиток імітаційного впливу на основі цифрової радіочастотної пам'яті, поширення мобільних і розподілених архітектур, упровадження дистанційного й автоматизованого управління, розширення можливостей подавлення радіоліній передавання видової інформації. Виявлено відмінності в доступності та достовірності відкритих технічних відомостей щодо систем різних держав.

Теоретична цінність дослідження. Уточнено класифікацію наземних систем протидії космічному спостереженню та систематизовано тенденції їх розвитку.

Практична цінність дослідження. Результати можуть використовуватися для обґрунтування вимог до перспективних вітчизняних засобів протидії космічній розвідці та вдосконалення радіоелектронного захисту.

Подальші дослідження. Доцільно спрямувати на оцінювання ефективності імітаційного впливу, автоматизації управління та зниження демаскувальних ознак наземних постановників перешкод.

Тип статті: оглядова.

Purpose. To systematize information on ground-based countermeasures against space-based imagery intelligence, compare their architectures and physical interference mechanisms, and identify major development trends.

Method. A structured review of scientific publications, official documents, analytical reports, and manufacturers' materials was conducted. Systems analysis, classification, comparative assessment, mathematical modeling, and synthesis were applied. Technical information was assessed by cross-checking independent sources.

Results. Countermeasures against space-based imagery intelligence may target spaceborne synthetic aperture radars, electro-optical sensors, and data-transmission links. Model-based estimates demonstrated potential power advantages of deception jamming over noise jamming under specified assumptions. Four development trends were identified: advances in digital radio frequency memory-based deception jamming; adoption of mobile and distributed architectures; implementation of remote and automated control; and expansion of interference capabilities targeting imagery-data transmission links. Differences in the availability and reliability of technical information concerning national systems were also identified.

Theoretical implications. The classification of ground-based countermeasure systems was refined, and their principal development trends were systematized.

Practical implications. The findings may support requirements development for prospective Ukrainian countermeasures against space-based imagery intelligence and improvements in electronic protection capabilities.

Future research. Further studies should assess deception-jamming effectiveness, automated control capabilities, and methods for reducing the detectability of ground-based jamming stations.

Article type: Review Article.

Ключові слова: системи постановки перешкод; видова космічна розвідка; радар із синтезованою апертурою; радіоелектронне подавлення; цифрова радіочастотна пам'ять; імітаційні перешкоди; лазерне засвічування.

Key words: jamming systems; space-based imagery intelligence; synthetic aperture radar; electronic jamming; digital radio frequency memory; deception jamming; laser dazzling.

Вступ

Навколоземний космічний простір перетворився на повноцінний домен воєнних дій. Збройні сили держав світу дедалі більше залежать від систем супутникового зв'язку, навігації та даних космічної розвідки. Розгортання низькоорбітальних супутникових угруповань сприяло підвищенню періодичності космічного спостереження. В окремих районах його здійснюють щонайменше щодня [1]. За таких умов ефективність традиційних засобів маскування (камуфляжу, макетів, димових завіс тощо) може знижуватися, а протидія засобам космічного спостереження набуває дедалі більшого значення для захисту військ і критично важливих об'єктів.

Особливу загрозу становлять космічні апарати (далі – КА), оснащені радарами із синтезованою апертурою (далі – РСА). Вони забезпечують отримання радіолокаційних зображень незалежно від освітлення та за більшості метеорологічних умов, а сучасні комерційні мікросупутникові системи досягають просторової розрізненості 0,25 м [2]. Для України протидія засобам видової космічної розвідки має особливе практичне значення в умовах збройної агресії рф. Ознаки радіоелектронної протидії космічному спостереженню також фіксують дослідники відкритих джерел (далі – OSINT). Зокрема, на радіолокаційних знімках супутника Sentinel-1 поблизу тимчасово окупованого м. Севастополя спостерігалися характерні смуги радіочастотних завад [3], виникнення яких пов'язують із роботою потужних наземних джерел випромінювання [4].

Підходи провідних держав до протидії космічним засобам спостереження поступово змінюються. За оцінками Secure World Foundation (далі – SWF), у сучасних воєнних конфліктах переважно застосовуються засоби протикосмічного впливу, які не передбачають фізичного руйнування КА [5]. Розвідувальне управління Міністерства оборони США відносить до таких засобів, зокрема, наземні лазерні системи, здатні засвічувати оптико-електронні сенсори супутників, і зазначає, що Китайська Народна Республіка (КНР), імовірно, розробляє станції перешкод, спеціально призначені для подавлення РСА [6]. У технічній літературі простежується розвиток методів імітаційного впливу, що ґрунтуються на використанні технології цифрової радіочастотної пам'яті (англ. Digital Radio Frequency Memory, DRFM), поряд із традиційними методами шумового подавлення [7].

Ефективна протидія засобам видового космічного спостереження, як і забезпечення захисту від такого впливу, потребує розуміння фізичних принципів функціонування відповідних систем, механізмів їхнього впливу та особливостей застосування провідними державами світу. Ці знання становлять основу для розроблення методів радіоелектронного захисту (англ. Electronic Counter-Countermeasures, ECCM) та обґрунтування вимог до перспективних вітчизняних засобів протидії.

Водночас наявні дослідження характеризуються певною фрагментарністю. У наукових працях детально розглянуто окремі методи імітаційного та лазерного впливу, проте недостатньо висвітлено їхній зв'язок із конкретними сучасними системами, що перебувають на озброєнні провідних держав світу. Аналітичні звіти переважно містять відомості про склад і призначення таких систем, однак не завжди розкривають фізичні механізми їхнього впливу та ступінь достовірності оприлюднених технічних характеристик. Недостатньо дослідженим залишається порівняльний аналіз наземних систем постановки перешкод засобам видового космічного спостереження, який одночасно враховував би фізичні принципи функціонування радіолокаційних та оптико-електронних сенсорів, типи впливу, архітектуру систем і можливості впливу на радіолінії передавання видової інформації.

Мета статті — систематизувати інформацію про наземні системи постановки перешкод засобам видового космічного спостереження провідних держав світу (рф, КНР, США та Держави Ізраїль), здійснити порівняльний аналіз їхніх архітектур і фізичних механізмів впливу

(шумового радіоелектронного подавлення, імітаційних перешкод на основі технології DRFM, лазерного засвічування) на оптико-електронні та радіолокаційні засоби спостереження, а також на радіолінії передавання видової інформації, і визначити основні тенденції розвитку цих систем.

Огляд літератури

Дослідження наземних засобів протидії космічному спостереженню охоплюють три основні напрями. Перший пов'язаний із воєнно-політичним та аналітичним оцінюванням протикосмічних спроможностей держав. Другий охоплює технічні дослідження методів радіоелектронного подавлення РСА. Третій спрямований на вивчення впливу лазерного випромінювання на оптико-електронні сенсори. В аналітичних дослідженнях переважно розглядають склад і призначення відповідних систем, однак недостатньо висвітлюють фізичні механізми їхнього впливу. Натомість у технічних працях детально досліджують окремі методи протидії, проте не завжди встановлюють їхній зв'язок із конкретними зразками озброєння.

Роль боротьби в електромагнітному спектрі як чинника забезпечення інформаційної переваги в сучасних воєнних конфліктах досліджують вітчизняні науковці. Д. Козін [8] зазначає, що за умов динамічних змін обстановки на полі бою здатність контролювати електромагнітний спектр набуває визначального значення, а протидія системам противника охоплює як радіоелектронне подавлення, так і боротьбу із засобами супутникової навігації. Р. Бибик та І. Опірський [9], а також Д. Шаманов і А. Сорокін [10] аналізують вплив електромагнітних загроз на автоматизовані системи управління військами та системи наведення високоточної зброї, акцентуючи увагу на використанні хибних цілей і спотворенні сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (англ. Global Navigation Satellite Systems, GNSS). Досвід застосування збройними силами рф засобів радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ), зокрема комплексів "Красуха-4" і "Мурманськ-БН", для приховування об'єктів від засобів спостереження, у тому числі КА з РСА, аналізують О. Казіміров, К. Власов, А. Куртов та А. Потіхенський [11]. Т. Вакалюк зі співавторами [12] досліджують імовірність виявлення сигналів наземних радіолокаційних станцій космічними апаратами з пасивним синтезуванням апертури антени.

У звіті Secure World Foundation [5] систематизовано відомості про протикосмічні засоби за п'ятьма категоріями: кінетична зброя, коорбітальні засоби, засоби РЕБ, зброя спрямованої енергії та кіберзасоби. Аналогічні аналітичні звіти публікує Center for Strategic and International Studies (далі – CSIS) [13]. Офіційні оцінки загроз космічним системам США з боку КНР і рф наведено в матеріалах Розвідувального управління Міністерства оборони США [6]. Інституційні зміни в Народно-визвольній армії КНР, зокрема створення Сил інформаційного забезпечення, аналізують фахівці CNA [14]. Окремі системи протикосмічного впливу досліджують із використанням методів аналізу відкритих джерел. Зокрема, Б. Хендрікс [15] на основі супутникових знімків, публікацій і патентних матеріалів розглянув призначення та особливості застосування комплексу "Пересвет".

Теоретичні засади імітаційного впливу на РСА сформовано в наукових працях початку 2000-х років. П. Пейс зі співавторами [16] запропонували цифровий синтезатор зображень хибних цілей для протидії радарам з інверсною синтезованою апертурою, а В. Ванг і Дж. Цай [17] розробили спосіб постановки перешкод бістатичним і багатопозиційним РСА. Основні підходи до розвитку методів подавлення РСА систематизовано в дослідженні [18]. Ю. Пан зі співавторами [7] запропонували узагальнену математичну модель сигналів перешкод і проаналізували розвиток методів впливу від шумових до когерентних, які дають змогу поєднувати імітаційний та маскувальний вплив.

Значну частину сучасних досліджень присвячено методам протидії космічним РСА. Зокрема, запропоновано метод швидкого формування сигналів імітаційних перешкод із

рекурсивним обчисленням передавальної функції постановника перешкод [19], способи створення хибної радіолокаційної обстановки [20], а також методи формування багатоцільових перешкод із використанням антен із частотним рознесенням [21]. У праці [22] розглянуто спосіб формування тривимірних хибних цілей для РСА-інтерферометрів за допомогою кількох просторово рознесених постановників перешкод. С. Кім зі співавторами [23] запропонували метод випромінювання імітаційного сигналу до моменту перехоплення зондувального сигналу РСА на основі прогнозування часу його випромінювання. Водночас удосконалюються засоби радіоелектронного захисту. Зокрема, антенні решітки з частотним рознесенням у поєднанні з архітектурою з багатьма входами та виходами розглядають як один зі способів протидії імітаційним перешкодам [24]. Вплив наземних джерел радіочастотного випромінювання на космічні РСА досліджено також із використанням реальних даних. А. Монті-Гуарньєрі зі співавторами [25] та М. Тао зі співавторами [26] запропонували методи виявлення й компенсації радіочастотних завад на зображеннях, отриманих супутниками Sentinel-1.

Співвідношення потужностей шумового та імітаційного впливу досліджено переважно методами математичного моделювання. За результатами аналізу праці М. Ханафі зі співавторами [27], для досягнення порівнянного рівня спотворення радіолокаційного зображення імітаційна перешкода може потребувати на два–три порядки меншої потужності, ніж шумова. Т. Цю зі співавторами [28] зазначають, що формування загороджувальних шумових перешкод потребує значної потужності випромінювання та супроводжується підвищеною ймовірністю виявлення джерела перешкод.

Фізичні основи лазерного впливу на космічні оптико-електронні сенсори розглянуто в праці С. Ванга та Л. Го [29]. На основі моделювання поширення лазерного випромінювання від поверхні Землі автори дійшли висновку, що засвічування фотоприймача космічного апарата є більш імовірним, ніж його незворотне пошкодження. Порогові значення засвічування та пошкодження матриць із зарядовим зв’язком (ПЗЗ, CCD) і комплементарних метал-оксид-напівпровідникових матриць (КМОН, CMOS) експериментально досліджено в працях [30, 31]. Особливості розвитку елементної бази потужних лазерів середнього інфрачервоного діапазону, зокрема нелінійно-оптичних кристалів $BaGa_4Se_7$, висвітлено у праці В. Петрова зі співавторами [32] та публікації дослідників Аньхойського інституту оптики та точної механіки Академії наук КНР [33].

Отже, аналіз наукових публікацій засвідчив, що в наявних дослідженнях детально розглянуто окремі методи імітаційного та лазерного впливу, однак недостатньо висвітлено їхній зв’язок із конкретними системами, які перебувають на озброєнні провідних держав світу. Аналітичні звіти, своєю чергою, містять відомості про склад і призначення таких систем, проте не завжди розкривають фізичні механізми їхнього впливу. Недостатньо дослідженим залишається комплексний порівняльний аналіз наземних систем постановки перешкод засобам видового космічного спостереження, який одночасно враховував би фізичні принципи функціонування радіолокаційних та оптико-електронних сенсорів, типи впливу, архітектуру систем і можливості впливу на радіолінії передавання видової інформації.

Методологія дослідження

Методологія дослідження ґрунтується на системному підході, що дає змогу розглядати засоби постановки перешкод у взаємозв’язку з фізичними принципами функціонування орбітальних сенсорів, на які спрямовано відповідний вплив. Інформаційну базу дослідження становлять наукові праці, присвячені методам радіоелектронного подавлення та імітаційного впливу на РСА, офіційні документи державних установ, матеріали компаній-розробників, звіти аналітичних центрів, а також відкриті джерела, що висвітлюють досвід застосування засобів РЕБ під час російсько-української війни.

Пошук наукових публікацій здійснено з використанням Google Scholar, IEEE Xplore, ResearchGate та електронних ресурсів вітчизняних фахових видань. Пошукові запити формували на основі поєднання термінів “synthetic aperture radar”, “spaceborne SAR”, “deceptive jamming”, “DRFM”, “laser dazzling”, “uplink jamming”, “counterspace” та їхніх українських відповідників. Основну увагу приділено публікаціям за 2019–2026 рр. Пошук відомостей в офіційних документах, матеріалах компаній-розробників (L3Harris, CACI International, Israel Aerospace Industries) і звітах аналітичних центрів (SWF, CSIS, CNA, RAND) здійснювали за назвами відповідних систем. Медіапублікації використовували переважно для встановлення фактів проведення випробувань, прийняття систем на озброєння, їхньої публічної демонстрації або за відсутності інших доступних відкритих відомостей.

Відбір джерел здійснено у три етапи. На першому етапі за сформованими пошуковими запитами виявлено 312 записів. На другому етапі після вилучення дублікатів і попереднього аналізу назв та анотацій відібрано 94 публікації для повнотекстового опрацювання. На третьому етапі відповідно до встановлених критеріїв включення та виключення до огляду відібрано 54 джерела.

До аналізу включали публікації, присвячені наземним засобам впливу на КА видового спостереження або на радіолінії передавання видової інформації та команд управління, які містили технічні характеристики, опис принципів функціонування або відомості про практичне застосування відповідних систем. Не включали публікації без зазначення авторства чи першоджерела інформації, повторні публікації без нових відомостей, а також дослідження, присвячені виключно кінетичним протисупутниковим засобам.

Метод аналізу застосовано для дослідження фізичних принципів функціонування оптико-електронних і радіолокаційних космічних сенсорів та визначення їхньої вразливості до різних видів впливу. Енергетичний баланс шумових та імітаційних перешкод оцінено на основі рівняння радіолокації з урахуванням виграшу когерентного оброблення сигналів і відкритих технічних параметрів РСА супутників Sentinel-1 [34, 35]. Математичні вирази (1)–(4) та обґрунтування вибору розрахункових параметрів наведено в розділі “Результати дослідження”.

Метод систематизації використано для класифікації засобів постановки перешкод за такими ознаками: об’єкт впливу (бортовий РСА, бортова оптико-електронна апаратура, радіолінії передавання даних та управління); тип впливу (шумове подавлення, імітаційний вплив на основі технології цифрової радіочастотної пам’яті (DRFM), вплив спрямованою енергією); архітектура системи (стаціонарний комплекс, мобільний комплекс, розподілена мережа); рівень автоматизації управління.

Для оцінювання достовірності відомостей із відкритих джерел застосовано метод зіставлення незалежних інформаційних джерел. Технічні характеристики систем розподілено за чотирма рівнями достовірності: підтверджені офіційними документами або результатами публічних випробувань; заявлені розробником чи державою-власником; наведені в аналітичних матеріалах або наукових публікаціях; отримані з поодиноких медіаджерел чи сформульовані як авторські припущення. Характеристику вважали узгодженою за умови її підтвердження щонайменше двома незалежними джерелами.

Порівняльний метод застосовано для зіставлення підходів рф, КНР, США та Держави Ізраїль до створення й використання наземних систем постановки перешкод за визначеними класифікаційними ознаками. Результати порівняння узагальнено в таблиці 1.

Метод узагальнення використано для визначення основних тенденцій розвитку систем постановки перешкод засобам видового космічного спостереження. Тенденцією вважали зміну значення певної класифікаційної ознаки, яку було зафіксовано щонайменше у двох державах або у двох послідовних поколіннях систем однієї держави.

Результати дослідження

Результати дослідження викладено в такій послідовності: спочатку розглянуто фізичні передумови протидії засобам видового космічного спостереження, далі — засоби впливу на бортові РСА, бортову оптико-електронну апаратуру та радіолінії передавання даних і управління.

Фізичні передумови протидії засобам видового космічного спостереження

Ефективна протидія засобам видового космічного спостереження потребує врахування фізичних принципів функціонування орбітальних сенсорів. Актуальність цього питання зростає зі збільшенням кількості КА, яка на початок 2026 р. перевищила 14 тис. [36]. У дослідженні розглянуто два основні види космічного спостереження – оптико-електронне та радіолокаційне, які відрізняються фізичними принципами формування зображень і характером вразливостей до зовнішнього впливу.

КА оптико-електронної розвідки формують зображення шляхом реєстрації відбитого сонячного випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах або власного теплового випромінювання об’єктів у тепловому інфрачервоному діапазоні. Для цього використовують високочутливі матриці із зарядовим зв’язком (ПЗЗ, CCD) або комплементарні метал-оксид-напівпровідникові матриці (КМОН, CMOS). Основними обмеженнями таких систем є залежність від умов освітлення та хмарності, а також вразливість фотоприймачів до засвічування потужним лазерним випромінюванням.

Космічні апарати з РСА належать до активних засобів спостереження: вони випромінюють послідовність зондувальних імпульсів, найчастіше з лінійною частотною модуляцією в X-, C- або S-діапазонах, і приймають відбиті сигнали. Завдяки цьому знімання можливе незалежно від часу доби та за більшості метеорологічних умов. Високу просторову розрізненість РСА забезпечують два етапи оброблення сигналів: стиснення імпульсу за дальністю та когерентне накопичення сигналу за азимутом з урахуванням доплерівської зміни фази під час руху КА. Це еквівалентно синтезуванню антени, ефективна довжина якої значно перевищує фізичну довжину антени.

Когерентне оброблення забезпечує РСА значний виграш, який можна оцінити за формулою (1).

$$G \approx \Delta f \cdot \tau_{\text{і}} \cdot N_{\text{а}} \quad , \tag{1}$$

де Δf – ширина спектра зондувального сигналу;
τ_i – тривалість імпульсу;
N_a – кількість імпульсів, когерентно накопичених на інтервалі синтезування.

Корисний сигнал, когерентний із зондувальним, повністю отримує цей виграш, тоді як некорельована з ним шумова перешкода — ні. Натомість імітаційна перешкода, сформована на основі перехопленого та збереженого зондувального сигналу, є когерентною з ним, тому отримує такий самий виграш оброблення, як і корисний сигнал. Для оцінювання впливу цієї асиметрії на необхідну потужність перешкоди розглянуто постановник перешкод, розміщений поблизу об’єкта прикриття, тобто в головній пелюстці діаграми спрямованості антени РСА. За таких умов відношення потужностей перешкоди та корисного сигналу на вході приймача РСА визначається за формулою (2).

$$q = \frac{P_j G_j \cdot 4\pi R^2 \cdot \Delta f}{P_t G_a \cdot \sigma \cdot \Delta f_j} \quad , \tag{2}$$

де P_jG_j – ефективна випромінювана потужність постановника перешкод;
R – похила дальність;
P_t – імпульсна потужність передавача РСА;
G_a – коефіцієнт підсилення антени РСА;
σ – ефективна площа розсіювання об’єкта;
Δf_j – ширина спектра перешкоди ($\Delta f_j \geq \Delta f$).

Множник R^2 у чисельнику виразу (2) відображає перевагу постановника перешкод: його сигнал проходить шлях один раз, тому послаблюється пропорційно R^2, тоді як відбитий сигнал проходить цей шлях двічі й послаблюється пропорційно R^4. Після оброблення шумова перешкода послаблюється відносно корисного сигналу в G разів. Тому для маскування об'єкта із заданим відношенням q_0 на виході оброблення необхідна ефективна випромінювана потужність визначається за формулою (3).

$$\left(P_j G_j\right)_{\text{ш}} \geq q_0 \cdot G \cdot \frac{P_t G_a \sigma \cdot \Delta f_j}{4\pi R^2 \cdot \Delta f} \quad . \tag{3}$$

Імітаційна перешкода отримує виграш G, тому для формування хибної цілі з ефективною площею розсіювання σ_x достатня потужність визначається за формулою (4).

$$\left(P_j G_j\right)_{\text{і}} \approx \frac{P_t G_a \sigma_{\text{x}}}{4\pi R^2} \quad . \tag{4}$$

Для оцінювання використано відкриті параметри РСА Sentinel-1: імпульсну потужність 4,4 кВт; розміри антени 12,3 × 0,821 м; ширину діаграми спрямованості 0,23° × 3,43°; ширину спектра сигналу до 100 МГц; тривалість імпульсу 5–100 мкс; частоту повторення імпульсів 1–3 кГц [34]; висоту орбіти 693 км [35].

За Δf = 50 МГц, τі = 50 мкс, частоти повторення імпульсів 1,7 кГц та інтервалу синтезування близько 0,5 с, що відповідає проходженню об'єкта через головну пелюстку в смуговому режимі, отримано $\Delta f \cdot \tau_i$ = 2 500, $N_a \approx 850$ і $G \approx 2 \cdot 106$ (≈ 63 дБ).

Коефіцієнт підсилення антени, оцінений за шириною діаграми спрямованості з коефіцієнтом використання апертури 0,6, становить $G_a \approx 3 \cdot 104$ (≈ 45 дБі). Для об'єкта з σ = 10 м^2 на дальності 850 км за q_0 = 1 і $\Delta f_j = \Delta f$ вираз (3) дає ефективну випромінювану потужність шумового постановника близько 0,3 кВт, а вираз (4) для хибної цілі з тією самою ефективною площею розсіювання – близько 0,15 мВт.

Отже, шумове подавлення РСА є енергетично досяжним навіть для мобільного засобу за умови, що постановник перешкод перебуває в головній пелюстці діаграми спрямованості антени разом з об'єктом прикриття. Якщо перешкода надходить через бічні пелюстки, необхідна ефективна випромінювана потужність зростає пропорційно рівню їхнього подавлення.

Водночас для досягнення однакового ефекту шумова перешкода потребує приблизно в G разів більшої потужності, ніж імітаційна. На практиці ця перевага є меншою, оскільки потужність імітаційної перешкоди розподіляється між багатьма елементами хибної обстановки. За результатами моделювання, різниця становить два–три порядки [27].

Крім того, шумова перешкода формує на радіолокаційному знімку характерні смуги, які свідчать про факт протидії та дають змогу локалізувати постановник перешкод [4, 25]. Натомість імітаційна перешкода може залишатися непоміченою. Саме енергетична та інформаційна асиметрія, а не принципова неможливість шумового подавлення, пояснює перехід від шумових до когерентних методів радіоелектронного впливу [7, 28].

Протидія КА оптико-електронної розвідки та КА з РСА, з огляду на відмінності фізичних принципів їхнього функціонування, потребує застосування різних засобів і методів впливу.

Засоби впливу на бортові РСА

У збройних силах рф наземні засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) розглядають як інструмент приховування важливих об'єктів від радіолокаційної розвідки, зокрема космічної. Аналітики Center for Strategic and International Studies (CSIS) відносять до засобів, здатних створювати перешкоди космічним апаратам (КА) радіолокаційної розвідки, комплекси "Красуха-2" і "Красуха-4" [13].

Комплекс "Красуха-4" (1Л257) призначений для радіолокаційного маскування об'єктів, зокрема від низькоорбітальних КА з радарами із синтезованою апертурою, наприклад апаратів серії Lacrosse (Onyx). Розробник заявляв про можливість повного прикриття об'єктів

від радіолокаційного виявлення на відстанях 150–300 км. Водночас щодо космічних РСА військові посадовці у 2015 р. [37] зазначали зону прикриття лише 15–25 км, що зумовлює необхідність розміщення комплексу поблизу об'єкта прикриття.

За оприлюдненими даними, комплекс працює в S-, X- і Ku-діапазонах та здатний здійснювати випромінювання в усьому секторі азимутальних кутів і за кутом місця до 90°, що необхідно для супроводження КА під час його прольоту [38]. Комплекс реалізує шумове подавлення, яке передбачає перевантаження приймального тракту радара. Як випливає з виразів (1)–(4), такий спосіб потребує приблизно в *G* разів більшої ефективної випромінюваної потужності, ніж імітаційний вплив. Водночас потужне випромінювання демаскує станцію РЕБ і підвищує її вразливість до протирадіолокаційних ракет. Обмежена зона прикриття від космічних РСА узгоджується з оцінкою за формулою (3), відповідно до якої подавлення є ефективним за умови перебування постановника перешкод у головній пелюстці діаграми спрямованості антени РСА разом з об'єктом прикриття.

Комплекс "Дивноморье" розробляли як засіб радіоелектронного подавлення, зокрема космічних засобів спостереження, який у перспективі має замінити комплекси "Красуха-2" і "Красуха-4" та поєднати їхні функції з можливостями радіотехнічної розвідки комплексу "Москва-1". За даними [37], дальність його дії становить кілька сотень кілометрів, а управління є повністю автоматизованим.

Розвідувальне управління Міністерства оборони США припускає, що КНР, імовірно, розробляє станції перешкод, спеціально призначені для подавлення РСА [6]. Конкретні наземні зразки таких засобів у відкритих джерелах не названо. Тому про напрями їхнього розвитку свідчать насамперед наукові публікації китайських дослідників, присвячені імітаційним перешкодам на основі технології цифрової радіочастотної пам'яті (DRFM).

Зокрема, запропоновано метод швидкого формування сигналів імітаційних перешкод для космічних РСА з рекурсивним обчисленням передавальної функції постановника перешкод [19]. Також розроблено методи створення хибної радіолокаційної обстановки [20] та формування багатоцільових імітаційних перешкод із використанням антен із частотним рознесенням [21]. Крім того, запропоновано спосіб формування тривимірних хибних цілей для однопрохідного космічного РСА-інтерферометра (InSAR) за допомогою двох просторово рознесених постановників перешкод. Цей спосіб дає змогу формувати хибну фазу інтерферограми [22].

Обмеження механізму модуляції та ретрансляції полягає в тому, що перешкода формується лише після перехоплення імпульсу РСА в кожному періоді його повторення, що звужує можливості розміщення хибних цілей. Для подолання цього обмеження запропоновано випромінювати імітаційний сигнал ще до перехоплення зондувального імпульсу, прогнозуючи момент його випромінювання РСА [23].

Водночас розвиток зазначених технологій супроводжується вдосконаленням засобів радіоелектронного захисту. Зокрема, антенні решітки з частотним рознесенням у поєднанні з архітектурою з багатьма входами та виходами дають змогу радару фільтрувати імітаційні перешкоди завдяки розбіжностям за дальністю [24]. Отже, удосконалення засобів імітаційного впливу відбувається паралельно з розвитком засобів протидії таким перешкодам.

Ізраїльський концерн Israel Aerospace Industries (підрозділ ELTA Systems) розробив сімейство систем РЕБ Scorpius. Наземний комплекс Scorpius-G (ELL-8256SB) поєднує функції радіоелектронної розвідки та радіоелектронного подавлення [39].

Розробник виокремлює такі особливості комплексу: активну фазовану антенну решітку (AESA) з підсилювачами на основі нітриду галію (GaN); просторове розділення цілей завдяки цифровому багатопроменевому прийманню та випромінюванню; високу чутливість і значну ефективну випромінювану потужність; здатність виявляти радари з низькою ймовірністю

перехоплення сигналів; формування електронної бойової обстановки в режимі часу, близькому до реального; можливість подавлення з використанням технології DRFM.

Серед об'єктів впливу розробник насамперед виокремлює РСА. Це узгоджується з висновками SWF щодо значних протикосмічних спроможностей засобів РЕБ Ізраїлю [5].

Засоби впливу на бортовий оптико-електронний сенсор

Бойовий лазерний комплекс "Пересвет" належить до зброї спрямованої енергії. Одним із його завдань є приховування переміщень мобільних ракетних комплексів. Розвідувальне управління Міністерства оборони США відносить "Пересвет" до наземних лазерних систем, здатних засліплювати сенсори космічних апаратів (КА) [6].

За наявними даними [40], комплекс може впливати на КА на висотах 200–1100 км, забезпечувати прикриття зони діаметром 130–180 км, наведення за азимутом у межах 360° та за кутом місця від 21° до 155°. В інших російських джерелах зазначено висоту до 1500 км, що свідчить про розбіжності в оприлюднених характеристиках. Цілевказання комплекс отримує від системи контролю космічного простору [15].

Фізичний механізм впливу полягає в перенасиченні пікселів матриць із зарядовим зв'язком (ПЗЗ, CCD) або комплементарних метал-оксид-напівпровідникових матриць (КМОН, CMOS) сфокусованим лазерним випромінюванням, що спричиняє тимчасову втрату здатності формувати зображення.

Результати модельного оцінювання свідчать, що через значну відстань пошкодження фотоприймача КА лазерним випромінюванням із поверхні Землі є складним завданням. Водночас засвічування фотоприймача можливе завдяки значному оптичному підсиленню приймальної системи КА [29]. Порогові значення засвічування та пошкодження матриць залежать від довжини хвилі випромінювання, тривалості імпульсу й особливостей оптичної схеми сенсора [30, 31]. Тому можливість незворотного пошкодження сенсорів КА наземними лазерними системами залишається предметом наукових дискусій.

Застосування лазерної зброї має фізичні обмеження, пов'язані з проходженням випромінювання крізь атмосферу, де воно зазнає розсіювання, поглинання та теплового розфокусування. Ефективність лазерного впливу знижується за умов туману, опадів і суцільної хмарності. Крім того, функціонування комплексу "Пересвет" характеризується значним енергоспоживанням. З огляду на зазначені обмеження комплекс доцільно розглядати як засіб прикриття окремих об'єктів за сприятливих метеорологічних умов, а не як універсальний засіб протидії космічному спостереженню.

Щодо КНР, у відкритих джерелах відсутні підтверджені відомості про технічні характеристики наземних протисупутникових лазерних комплексів. Водночас у 2025 р. дослідники Аньхойського інституту оптики та точної механіки Академії наук КНР повідомили про вирощування монокристалів $BaGa_4Se_7$ діаметром 60 мм [33]. Матеріал $BaGa_4Se_7$ відомий із 2010 р. [41]. Його використовують для перетворення випромінювання лазерів ближнього інфрачервоного діапазону на випромінювання середнього та дальнього інфрачервоних діапазонів [32, 42, 43].

Ще одним прикладом розвитку лазерних технологій у КНР є комплекс LY-1 (Liaoyuan-1), який публічно продемонстрували у вересні 2025 р. Однак його офіційні технічні характеристики не було оприлюднено [44]. За повідомленням китайського військового видання, потужність комплексу становить 180–250 кВт [45].

Засоби впливу на радіолінії передавання даних і управління

Видова інформація має практичну цінність за умови її своєчасного надходження до споживача. Тому до засобів протидії видовому космічному спостереженню належать також засоби впливу на радіолінії, через які передаються зібрані дані та команди управління. Такий вплив може здійснюватися двома способами: подавленням бортового приймача КА з поверхні Землі або подавленням наземних приймачів, які отримують дані з КА.

Мобільний комплекс рф “Тирада-2С” призначений для подавлення бортових ретрансляторів супутників зв’язку. Його призначення підтверджується офіційними російськими джерелами. У грудні 2018 р. Міністерство оборони рф оголосило про заплановане прийняття комплексу на озброєння у 2019 р. [37, 46]. Комплекс створює спрямовану перешкоду, за якої відношення потужності перешкоди до потужності корисного сигналу на вході приймача КА перевищує допустиме значення, унаслідок чого порушується приймання сигналів. За даними підприємства-виробника [37], передбачено налаштування апаратури на частотах до 14 ГГц, тобто в сантиметровому діапазоні. Блокування радіоліній затримує передавання зібраної інформації та порушує цикл управління противника “спостереження — орієнтація — рішення — дія” (англ. Observe–Orient–Decide–Act, OODA).

У рф також розроблено комплекс “Былина-ММ”, до складу якого входять мобільні автоматизовані станції Ka- та V/Ka-діапазонів, призначені для подавлення бортових ретрансляторів супутників зв’язку міліметрового діапазону. Відомості про фактичне розгортання цього комплексу у використаних джерелах відсутні. Назву “Былина” також пов’язують з автоматизованою системою управління засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ), яка, за повідомленнями [37], використовує алгоритми штучного інтелекту для розпізнавання цілей і вибору способів їх подавлення.

США офіційно визнають розроблення протикосмічних засобів наступального характеру [5]. До них належить наземна система подавлення супутникового зв’язку Counter Communications System (CCS), яку експлуатують приблизно з 2004 р. [47]. Модифікація CCS 10.2 досягла початкової операційної готовності в березні 2020 р. [48]. Її модернізацію здійснила компанія L3Harris у межах програми Meadowlands з метою підвищення мобільності, забезпечення подавлення в S- та X-діапазонах і впровадження дистанційного керування [47]. Система має відкриту програмну архітектуру, що спрощує її оновлення [49]. За повідомленнями медіа, кількість транспортних модулів скорочено приблизно з 23 контейнерів у попередній версії до семи [50]. Перші дві системи Meadowlands Космічні сили США отримали від розробника у квітні 2025 р. Після державних випробувань було надано дозвіл на їх розгортання [48]. Перший серійний зразок поставлено в грудні 2025 р. [49], а в червні 2026 р. США оголосили про прийняття системи до бойового застосування [51].

Систему Remote Modular Terminal (RMT) розробили компанії Northstrat і CACI. Її концепція передбачає використання значної кількості недорогих малогабаритних станцій постановки перешкод із дистанційним керуванням [52]. Під час перших випробувань у квітні 2024 р. двома станціями, розміщеними в різних місцях, керували з третього пункту [53]. У жовтні 2024 р. повідомлялося про завершення виготовлення перших 11 із 24 станцій та початок їх передавання військам [52]. Призначення RMT безпосередньо пов’язане з протидією видовій космічній розвідці: станції мають блокувати передавання даних від КА, які здійснюють спостереження за військами, до вузлів бойового управління. Серед основних об’єктів впливу названо китайські розвідувальні супутники Yaogan [54]. Дистанційне керування усуває необхідність постійного перебування операторів на позиціях розгортання станцій, що сприяє підвищенню живучості особового складу.

Порівняльна характеристика систем, наведена в таблиці 1, свідчить про істотні відмінності в рівні підтвердженості відомостей із відкритих джерел. Технічні характеристики американських систем переважно підтверджуються офіційними повідомленнями, тоді як інформація про російські комплекси здебільшого походить із медіапублікацій і виставкових матеріалів.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика наземних систем постановки перешкод засобам видового космічного спостереження (станом на 2026 р.)

Назва системи	Країна-розробник	Об'єкт впливу	Тип впливу	Архітектура та управління	Основні характеристики	Підтвердженість
"Красуха-4"	рф	Бортовий РСА	Шумове подавлення	Мобільний комплекс; цілевказання від комплексу "Москва-1"	Радіус дії до 300 км; *S*-, *X*-, *Ku*-діапазони	Медіа
"Дивноморье"	рф	Космічні РСА	Подавлення	Мобільний комплекс; автоматизоване управління	Радіус дії – кілька сотень км	Медіа
Методи імітаційного впливу на РСА	КНР	Бортовий РСА, *InSAR*	Імітаційний вплив на основі *DRFM*	–	Хибні обстановки, тривимірні хибні цілі, швидке формування сигналу	Наукові публікації; впровадження не підтверджено
"Scorpius-G" (*ELL-8256SB*)	Держава Ізраїль	Бортовий РСА	Імітаційний вплив на основі *DRFM*	Мобільний комплекс; автоматизоване управління	*AESA* на *GaN*, цифрове багатопроменеве приймання та випромінювання	Заявлено розробником
"Пересвет"	рф	Бортовий оптико-електронний сенсор	Вплив спрямованою енергією	Мобільний комплекс; цілевказання від системи контролю за космічним простором	Висота цілей 200–1100 км; зона 130–180 км; кут місця 21–155°	Заявлено державою-розробником; дані щодо висоти різняться
Елементна база лазерів (кристали *BGSe*)	КНР	Бортовий оптико-електронний сенсор (потенційно)	Вплив спрямованою енергією	–	Кристали діаметром 60 мм	Наукова публікація
"Тирада-2С"	рф	Радіолінії (бортові приймачі)	Шумове подавлення	Мобільний комплекс / –	Сантиметровий і міліметровий діапазони	Медіа
"Былина-ММ"	рф	Радіолінії: ретранслятори супутників міліметрового діапазону	Подавлення	Мобільні автоматизовані станції	*Ka*- і *V/Ka*-діапазони	Медіа
CCS Meadowlands	США	Радіолінії супутникового зв'язку	Подавлення	Мобільний комплекс / дистанційне управління	*S*- та *X*-діапазони; відкрита програмна архітектура	Підтверджено в офіційних джерелах
RMT	США	Радіолінії розвідувальних КА	Подавлення	Розподілена мережа / дистанційне управління	24 станції	Підтверджено в офіційних джерелах

Джерело: складено за [5, 6, 13, 15, 19 – 22, 33, 37 – 40, 46 – 54].

Результати порівняння характеристик показують, що рф має засоби для впливу на бортові РСА, оптико-електронні сенсори та радіолінії. Водночас офіційно підтверджено лише факт розгортання окремих систем, а більшість технічних характеристик наводиться у інформації з відкритих медіа або виставок. Для КНР найбільший масив відкритих даних становлять наукові публікації щодо імітаційного впливу на космічні РСА, тоді як відомостей про конкретні наземні зразки мало. США зосереджені на подавленні радіоліній і переходять від використання окремих мобільних комплексів до розподіленої мережі з дистанційним управлінням, що підтверджується відповідними відомостями. Ізраїльський комплекс "*Scorpius-G"* поєднує цифрову багатопроменеву архітектуру з імітаційним впливом.

Обговорення

Результати проведеного аналізу дали змогу сформулювати низку висновків, які доповнюють результати попередніх досліджень. По-перше, класифікація за об'єктом впливу засвідчила, що протидія видовому космічному спостереженню не обмежується впливом на бортові сенсори. Засоби подавлення радіоліній, які в науковій літературі зазвичай розглядають окремо як засоби протидії супутниковому зв'язку, можуть також використовуватися для протидії видовій космічній розвідці, оскільки перешкоджають передаванню зібраної інформації споживачеві. По-друге, оцінювання достовірності відомостей виявило нерівномірність доступності даних із відкритих джерел. Інформація про американські системи здебільшого підтверджується офіційними джерелами, про російські — переважно медіапублікаціями, тоді як щодо КНР доступні насамперед наукові праці без підтвердження практичного впровадження відповідних розробок. По-третє, зіставлення відомостей із першоджерелами дало змогу уточнити окремі поширені твердження. Зокрема, досягнення КНР у вирощуванні кристалів $BaGa_4Se_7$ полягають у збільшенні їхніх розмірів [33, 41]. Водночас заявлені технічні характеристики комплексу "Пересвет" у різних російських джерелах не збігаються [40].

Отримані результати загалом узгоджуються з висновками SWF щодо застосування в сучасних воєнних конфліктах засобів протикосмічного впливу, які не передбачають фізичного руйнування КА [5]. Розглянуті наземні системи постановки перешкод засобам видового космічного спостереження призначені для радіоелектронного подавлення, формування хибної радіолокаційної обстановки або засвічування сенсорів. Висновок про перехід від шумових до когерентних перешкод, сформульований на основі аналізу сигналів перешкод [7], у цьому дослідженні доповнено фізичним обґрунтуванням із використанням виграшу когерентного оброблення сигналів РСА (формули (1)–(4)) та зіставленням із характеристиками конкретних систем. Водночас уточнено уявлення про обмежену ефективність шумового подавлення космічних РСА. За умови перебування постановника перешкод у головній пелюстці діаграми спрямованості антени РСА розрахункова ефективна випромінювана потужність становить кілька сотень ват. Отже, основними обмеженнями шумового подавлення є демаскування постановника перешкод і неможливість формування правдоподібної хибної радіолокаційної обстановки, що узгоджується з оцінками Т. Цю зі співавторами [28]. Це також доповнює висновки О. Казімірова зі співавторами [11], які розглядають комплекс "Красуха-4" як ефективний засіб протидії космічним РСА: відповідна ефективність є досяжною насамперед за умови розміщення комплексу поблизу об'єктів прикриття. Висновки щодо лазерного впливу узгоджуються з оцінками С. Ванга та Л. Го [29], згідно з якими засвічування сенсорів КА з поверхні Землі є більш імовірним, ніж їхнє незворотне пошкодження. Це також відповідає офіційно заявленому призначенню комплексу "Пересвет" — приховуванню переміщень мобільних ракетних комплексів, а не фізичному ураженню КА [15].

За результатами аналізу виокремлено чотири основні тенденції розвитку систем постановки перешкод. Перша полягає в переході від шумового подавлення до імітаційного

впливу на основі технології цифрової радіочастотної пам'яті (DRFM), реалізованої, зокрема, в ізраїльському комплексі Scorpius-G. Друга тенденція характеризується переходом від великогабаритних комплексів до мобільних і розподілених архітектур. У США цей напрям розвитку простежується на прикладі систем CCS 10.2, Meadowlands і Remote Modular Terminal (RMT). Третя тенденція полягає в переході від безпосереднього управління на позиції до дистанційного та автоматизованого управління. Відповідні рішення реалізовано в системах Meadowlands і RMT [47, 52], а також в ізраїльському комплексі Scorpius-G, який забезпечує автоматизоване формування електронної бойової обстановки. Четверта тенденція передбачає розширення об'єктів впливу від бортових сенсорів до радіоліній передавання видової інформації. Цей напрям простежується у США на прикладі RMT та в рф на прикладі комплексів "Тирада-2С" і "Былина-ММ". Водночас перехід від широкосмугового випромінювання до селективного багатопроменевого подавлення підтверджено лише для ізраїльського комплексу, тому його доцільно розглядати як перспективний напрям розвитку.

Відмінності в підходах до розроблення систем постановки перешкод можуть бути зумовлені особливостями воєнно-стратегічних завдань відповідних держав. Для рф одним із пріоритетних напрямів є приховування стратегічних об'єктів, насамперед позиційних районів мобільних ракетних комплексів, від космічної розвідки США та НАТО [15]. США розробляють системи постановки перешкод із розподіленою архітектурою на основі комерційних компонентів [52], що створює передумови для масштабування мережі та підвищення її живучості. У КНР досліджують можливості створення спеціалізованих засобів подавлення РСА та засвічування бортових оптико-електронних сенсорів КА. Однак обмеженість доступної інформації не дає змоги достовірно оцінити рівень практичного впровадження відповідних розробок. Ізраїль, імовірно, зосереджує увагу на розвитку універсальних комплексів радіоелектронної боротьби, однією з функцій яких може бути протидія космічним засобам спостереження.

Отримані результати мають практичне значення для обґрунтування вимог до перспективних вітчизняних засобів протидії видовому космічному спостереженню. Зокрема, під час їх розроблення доцільно враховувати потенційні переваги імітаційного впливу порівняно із шумовим подавленням. Водночас інтерпретація результатів потребує врахування обмежень дослідження. Аналіз ґрунтується виключно на відомостях із відкритих джерел, тоді як значна частина технічних характеристик військових систем залишається засекреченою.

Висновки

У результаті проведеного дослідження систематизовано відомості про наземні системи постановки перешкод засобам видового космічного спостереження провідних держав світу та здійснено порівняльний аналіз їхніх архітектур, фізичних механізмів впливу й особливостей застосування. Встановлено, що протидія видовому космічному спостереженню передбачає вплив на бортові РСА, оптико-електронну апаратуру та радіолінії передавання даних і управління. Залежно від об'єкта впливу застосовують шумове радіоелектронне подавлення, імітаційні перешкоди, лазерне засвічування та подавлення радіоліній.

На основі аналізу фізичних принципів функціонування РСА встановлено, що імітаційні перешкоди на основі DRFM мають потенційні енергетичні переваги порівняно із шумовим подавленням завдяки використанню виграшу когерентного оброблення сигналів. Водночас ефективність обох способів впливу залежить від характеристик радара, умов поширення сигналів, розташування постановника перешкод та алгоритмів оброблення радіолокаційної інформації. Аналіз лазерного впливу засвідчив, що засвічування оптико-електронних сенсорів є більш імовірним результатом застосування наземних лазерних систем, ніж їхнє незворотне пошкодження.

За результатами порівняльного аналізу визначено чотири основні тенденції розвитку систем постановки перешкод: перехід від шумового подавлення до імітаційного впливу на

основі технології DRFM; розвиток мобільних і розподілених архітектур; упровадження дистанційного та автоматизованого управління; розширення можливостей впливу на радіолінії передавання видової інформації. Ступінь підтвердження цих тенденцій відрізняється залежно від держави, типу системи та доступності технічних відомостей.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання під час обґрунтування вимог до перспективних вітчизняних засобів протидії видовому космічному спостереженню. Доцільними напрямами їх розвитку є застосування технологій імітаційного впливу, створення мобільних і розподілених систем, упровадження відкритої програмної архітектури, дистанційного управління та засобів впливу на радіолінії передавання видової інформації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне оцінювання ефективності різних способів протидії космічному спостереженню, визначення вимог до енергетичних і просторових характеристик постановників перешкод, а також дослідження стійкості перспективних космічних сенсорів до імітаційного та лазерного впливу.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють, що використовували ШІ для перевірки правопису та пошуку ресурсів.

Список використаних джерел

1. SAR Data Brochure. ICEYE. 2025. URL: https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/SAR_Data_Brochure_ICEYE.pdf (дата звернення: 10.10.2026).
2. ICEYE Microsatellite SAR Constellation Status Update: Evaluation of First Commercial Imaging Modes / V. Ignatenko, P. Laurila, A. Radius et al. IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2020. P. 3581–3584. DOI: https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324531.
3. Russia covers Sevastopol Bay with electronic warfare: satellite images. Espreso Global. 2023. URL: https://global.espreso.tv/russia-covers-sevastopol-bay-with-electronic-warfare-images-from-space (дата звернення: 10.10.2026).
4. Radar Interference Tracker: A New Open Source Tool to Locate Active Military Radar Systems. Bellingcat. 2022. URL: https://www.bellingcat.com/resources/2022/02/11/radar-interference-tracker-a-new-open-source-tool-to-locate-active-military-radar-systems/ (дата звернення: 10.10.2026).
5. Global Counterspace Capabilities: An Open Source Assessment / ed. by V. Samson, L. Cesari. Secure World Foundation, 2025. URL: https://www.swfound.org/publications-and-reports/2025-global-counterspace-capabilities-report (дата звернення: 16.03.2026).
6. Challenges to Security in Space 2022. Defense Intelligence Agency. Washington, 2022. URL: https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-D5_200-PURL-gpo177437/pdf/GOVPUB-D5_200-PURL-gpo177437.pdf (дата звернення: 10.10.2026).
7. Overview of Radar Jamming Waveform Design / Y. Pan, D. Xie, Y. Zhao et al. Remote Sensing. 2025. Vol. 17, no. 7. Art. 1218. https://doi.org/10.3390/rs17071218.
8. Козін Д. В. Роль радіоелектронної боротьби у забезпеченні інформаційної переваги на полі бою. Міжнародний науковий журнал “Грааль науки”. 2025. № 55. С. 355–362. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.08.2025.041.

9. Бибик Р. Т., Опірський І. Р. Електромагнітні загрози в сучасних конфліктах: аналіз характеристик джерел РЕБ та їх вплив на ефективність систем засобів ураження. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 3 (27). С. 193–204. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.748.
10. Шаманов Д. О., Сорокін А. Р. Аналіз сучасних методів радіоелектронної боротьби. Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. № 1. С. 211–214. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.211.
11. Аналіз застосування засобів радіоелектронної боротьби збройними силами російської федерації у ході збройної агресії проти України / О. О. Казіміров, К. В. Власов, А. І. Куртов, А. І. Потіхенський. Scientific Trends and Trends in the Context of Globalization : proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference. Umea, Sweden, 2024. С. 670–680. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.04.2024.063.
12. Виявлення сигналів наземних РЛС космічним апаратом із пасивним синтезом апертури антени / Т. А. Вакалюк, О. В. Андреєв, О. Ф. Дубина та ін. Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2023. № 2 (65). URL: https://eir.zp.edu.ua/handle/123456789/26480 (дата звернення: 10.10.2026).
13. Space Threat Assessment 2021 / T. Harrison, K. Johnson, J. Moye, M. Young. Washington : CSIS, 2021. URL: https://aerospace.csis.org/space-threat-assessment-2021/ (дата звернення: 10.10.2026).
14. The Chinese Military's New Information Support Force. CNA. 2024. URL: https://www.cna.org/our-media/indepth/2024/08/chinese-information-support-force (дата звернення: 16.03.2026).
15. Hendrickx B. Peresvet: a Russian mobile laser system to dazzle enemy satellites. The Space Review. 2020. URL: https://thespacereview.com/article/3967/1 (дата звернення: 10.10.2026).
16. Digital false-target image synthesiser for countering ISAR / P. E. Pace, D. J. Fouts, S. Ekestorm, C. Karow. IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation. 2002. Vol. 149, no. 5. P. 248. https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20020635.
17. Wang W., Cai J. A technique for jamming bi- and multistatic SAR systems. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2007. Vol. 4, no. 1. P. 80–82. https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.886036.
18. A Review of Synthetic Aperture Radar Jamming Technique / Y. Li, D. Huang, S. Xing, X. Wang. Journal of Radars. 2020. Vol. 9, no. 5. https://doi.org/10.12000/JR20087.
19. Fast Generation of Deceptive Jamming Signal Against Space-Borne SAR / K. Yang, W. Ye, X. Wu et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. Vol. 13. P. 5580–5596. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3025217.
20. A Large-Scene Deceptive Jamming Method for Space-Borne SAR Based on Time-Delay and Frequency-Shift with Template Segmentation / K. Yang, W. Ye, F. Ma et al. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 1. Art. 53. https://doi.org/10.3390/rs12010053.
21. Multi-scene deception jamming on SAR imaging with FDA antenna / H. Wang, S. Zhang, W.-Q. Wang et al. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 7058–7069. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963042.
22. Research of 3-D Deceptive Interfering Method for Single-Pass Spaceborne InSAR / Z.-F. Wu, H.-P. Xu, J.-W. Li, W. Liu. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2015. Vol. 51, no. 4. P. 2834–2846. https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140325.
23. Deceptive Jamming for Spaceborne SAR Using Estimated Signal Parameters and Intercepted Signal Phase / S. Kim, D. Lee, Y. Park et al. IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 169388–169403. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3498456.

24. Research on main-lobe deceptive jamming against FDA-MIMO radar / Y. Zhao, B. Tian, C. Wang et al. IET Radar, Sonar & Navigation. 2021. Vol. 15, no. 6. P. 641–654. https://doi.org/10.1049/rsn2.12070.
25. Monti-Guarnieri A., Giudici D., Recchia A. Identification of C-Band Radio Frequency Interferences from Sentinel-1 Data. Remote Sensing. 2017. Vol. 9, no. 11. Art. 1183. https://doi.org/10.3390/rs9111183.
26. Extraction and Mitigation of Radio Frequency Interference Artifacts Based on Time-Series Sentinel-1 SAR Data / M. Tao, S. Lai, J. Li et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3126485.
27. Performance evaluation of deceptive and noise jamming on SAR focused image / M. E. Hanafy, H. E. A. Hassan, M. S. Abdel-Latif, S. A. Elgamel. Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG 2018). 2018. P. 1–11. https://doi.org/10.21608/iceeng.2018.30137.
28. A Complex Intrapulse Modulation Jamming Scheme for Spaceborne SAR / T. Qiu, Y. Zhang, S. Cheng et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2024. Vol. 17. P. 15942–15956. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3450204.
29. Wang S., Guo L. Analysis of laser jamming to satellite-based detector. Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7382. Art. 73822W. https://doi.org/10.1117/12.835863.
30. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-optoelectromechanical systems / B. Schwarz, G. Ritt, M. Koerber, B. Eberle. Optical Engineering. 2017. Vol. 56, no. 3. Art. 034108. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.034108.
31. Ritt G., Eberle B. Evaluation of protection measures against laser dazzling for imaging sensors. Optical Engineering. 2017. Vol. 56, no. 3. Art. 033108. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.033108.
32. Petrov V., Kato K., Miyata K. Barium chalcogenides for nonlinear optics in the mid-IR: properties and applications. Optical Materials: X. 2024. Vol. 22. Art. 100319. https://doi.org/10.1016/j.omx.2024.100319.
33. Fabrication of ϕ60 mm Large-Size Infrared Nonlinear $BaGa_4Se_7$ Crystals and Devices / Z. Wang, C. Mao, W. Chen et al. Journal of Synthetic Crystals. 2025. Vol. 54, no. 6. P. 909. https://doi.org/10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2025.6001.
34. Sentinel-1 SAR Technical Guide: SAR Instrument. European Space Agency. URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument (дата звернення: 10.10.2026).
35. GMES Sentinel-1 mission / R. Torres, P. Snoeij, D. Geudtner et al. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 9–24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028.
36. McDowell J. General Catalog of Artificial Space Objects (GCAT). URL: https://planet4589.org (дата звернення: 10.10.2026).
37. Hendrickx B. Russia gears up for electronic warfare in space (part 1). The Space Review. 2020. URL: https://thespacereview.com/article/4056/1 (дата звернення: 10.10.2026).
38. рф у цьому році має поставити в Білорусь комплекс РЕБ “Красуха-4”. Defense Express. URL: https://defence-ua.com/news/rf_u_tsomu_rotsi_maje_postaviti_v_bilorus_komlpeks_reb_krasuha_4-14108.html (дата звернення: 28.03.2026).
39. Scorpius-G EW AESA Ground System ELL-8256SB : datasheet. IAI ELTA. 2025. URL: https://www.iai.co.il/wp-content/uploads/2025/10/ELTA-ELL-8256SB-Scorpius-G-EW-AESA-Ground-System.pdf (дата звернення: 10.10.2026).
40. New details emerge on Russia’s secret laser weapon system. Defence Blog. URL: https://defence-blog.com/new-details-emerge-on-russias-secret-laser-weapon-system/ (дата звернення: 10.10.2026).

41. $BaGa_4Se_7$: a new congruent-melting IR nonlinear optical material / J. Y. Yao, D. J. Mei, L. Bai et al. Inorganic Chemistry. 2010. Vol. 49. P. 9212–9216. https://doi.org/10.1021/ic1006742.
42. Laser-induced damage threshold of $BaGa_4Se_7$ and $BaGa_2GeSe_6$ nonlinear crystals at 1.053 μm / N. Y. Kostyukova, A. A. Boyko, E. Y. Erushin et al. Journal of the Optical Society of America B. 2019. Vol. 36, no. 8. P. 2260. https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.002260.
43. High-pressure synthesis, growth and characterization of large-size $BaGa_4Se_7$ crystals / C. X. Li, Z. Li, M. R. Sun et al. Journal of Crystal Growth. 2022. Vol. 577. Art. 126405. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126405.
44. China's Imposing LY-1 High-Power Laser Weapon Unveiled at Huge Military Parade. The War Zone. 2025. URL: https://www.twz.com/news-features/chinas-imposing-ly-1-high-power-laser-weapon-unveiled-at-huge-military-parade (дата звернення: 28.03.2026).
45. China's LY-1 Naval Laser Claims 180–250kW Outmuscling US HELIOS. Army Recognition. 2025. URL: https://www.armyrecognition.com/archives/archives-land-defense/defense-news-army-2025/chinas-ly-1-naval-laser-claims-180-250kw-outmuscling-us-helios (дата звернення: 10.10.2026).
46. Global Counterspace Capabilities: An Open Source Assessment / ed. by B. Weeden, V. Samson. Secure World Foundation, 2021. URL: https://www.swfound.org/publications-and-reports/2021-global-counterspace-capabilities-report (дата звернення: 10.10.2026).
47. Space Force takes ownership of first Meadowlands satellite jammer. Breaking Defense. 2025. URL: https://breakingdefense.com/?p=39113 (дата звернення: 10.10.2026).
48. Field approval for USSF Space Electromagnetic Warfare system upgrade expands warfighting capabilities. Space Systems Command, U.S. Space Force. 2025. URL: https://www.ssc.spaceforce.mil/Newsroom/Article/4196523/field-approval-for-ussf-space-electromagnetic-warfare-system-upgrade-expands-wa (дата звернення: 10.10.2026).
49. US Space Force Accepts L3Harris' Meadowlands for Operational Use. Executive Gov. 2026. URL: https://www.executivegov.com/articles/ussf-meadowlands-l3harris-counter-communication-systems (дата звернення: 10.10.2026).
50. Star Wars gets a step closer with new Space Force satellite jamming capabilities. Nextgov/FCW. 2025. URL: https://www.nextgov.com/emerging-tech/2025/06/star-wars-gets-step-closer-new-space-force-satellite-jamming-capabilities/405810/ (дата звернення: 16.03.2026).
51. Space Force Approves New Satellite Jammer for Operational Use. Air & Space Forces Magazine. 2026. URL: https://www.airandspaceforces.com/space-force-approves-meadowlands-satellite-jammer-operational-use/ (дата звернення: 10.10.2026).
52. Innovative Testing and Skilled Personnel Drive Space RCO's Newest Success. Kirtland Air Force Base. URL: https://www.kirtland.af.mil/News/Article-Display/Article/3928036/innovative-testing-and-skilled-personnel-drive-space-rcos-newest-success/ (дата звернення: 10.10.2026).
53. STARCOM tests RMT system for Space Rapid Capabilities Office. Space Training and Readiness Command. URL: https://www.starcom.spaceforce.mil/News/Article-Display/Article/3747374/starcom-tests-rmt-system-for-space-rapid-capabilities-office/ (дата звернення: 19.03.2026).
54. Albon C. New US Space Force jammers aim to disrupt China's satcom signals. Defense News. 2024. URL: https://www.defensenews.com/space/2024/12/19/new-us-space-force-jammers-aim-to-disrupt-chinas-satcom-signals/ (дата звернення: 10.10.2026).

References

1. ICEYE. (2025). SAR data brochure. https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/SAR_Data_Brochure_ICEYE.pdf

2. Ignatenko, V., Laurila, P., Radius, A., Lamentowski, L., Antropov, O., & Muff, D. (2020). ICEYE microsatellite SAR constellation status update: Evaluation of first commercial imaging modes. In IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3581–3584). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324531
3. Russia covers Sevastopol Bay with electronic warfare: Satellite images. (2023). Espreso Global. https://global.espreso.tv/russia-covers-sevastopol-bay-with-electronic-warfare-images-from-space
4. Radar interference tracker: A new open source tool to locate active military radar systems. (2022, February 11). Bellingcat. https://www.bellingcat.com/resources/2022/02/11/radar-interference-tracker-a-new-open-source-tool-to-locate-active-military-radar-systems/
5. Samson, V., & Cesari, L. (Eds.). (2025). Global counterspace capabilities: An open source assessment. Secure World Foundation. https://www.swfound.org/publications-and-reports/2025-global-counterspace-capabilities-report
6. Defense Intelligence Agency. (2022). Challenges to security in space 2022. https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-D5_200-PURL-gpo177437/pdf/GOVPUB-D5_200-PURL-gpo177437.pdf
7. Pan, Y., Xie, D., Zhao, Y., Wang, X., & Huang, Z. (2025). Overview of radar jamming waveform design. Remote Sensing, 17(7), 1218. https://doi.org/10.3390/rs17071218
8. Kozin, D. V. (2025). Rol radioelektronnoi borotby u zabezpechenni informatsiinoi perevahy na poli boiu [The role of electronic warfare in ensuring information superiority on the battlefield]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal “Hraal nauky”, (55), 355–362. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.08.2025.041
9. Bybyk, R. T., & Opirskyi, I. R. (2025). Elektromahnitni zahrozy v suchasnykh konfliktakh: Analiz kharakterystyk dzherel REB ta yikh vplyv na efektyvnist system zasobiv urazhennia [Electromagnetic threats in modern conflicts: Analysis of the characteristics of electronic warfare sources and their impact on the effectiveness of weapon systems]. Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika, 3(27), 193–204. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.748
10. Shamanov, D. O., & Sorokin, A. R. (2024). Analiz suchasnykh metodiv radioelektronnoi borotby [Analysis of modern electronic warfare methods]. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, (1), 211–214. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.211
11. Kazimirov, O. O., Vlasov, K. V., Kurtov, A. I., & Potikhenskyi, A. I. (2024). Analiz zastosuvannia zasobiv radioelektronnoi borotby zbroinymy sylamy rosiiskoi federatsii u khodi zbroinoi ahresii proty Ukrainy [Analysis of the use of electronic warfare assets by the armed forces of the russian federation during the armed aggression against Ukraine]. In Scientific Trends and Trends in the Context of Globalization: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference (pp. 670–680). Mondial. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.04.2024.063
12. Vakaliuk, T. A., Andreiev, O. V., Dubyna, O. F., Nikitchuk, T. M., & Puleko, I. V. (2023). Vyiavlennia syhnaliv nazemnykh RLS kosmichnym aparatom iz pasyvnym syntezom apertury anteny [Detection of the signals of the terrestrial radar stations by spacecraft with a passive synthesis of the antenna aperture]. Radioelektronika, informatyka, upravlinnia, 2(65). https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-2
13. Harrison, T., Johnson, K., Moye, J., & Young, M. (2021). Space threat assessment 2021. Center for Strategic and International Studies. https://aerospace.csis.org/space-threat-assessment-2021/
14. CNA. (2024). The Chinese military’s new Information Support Force. https://www.cna.org/our-media/indepth/2024/08/chinese-information-support-force
15. Hendrickx, B. (2020a). Peresvet: A Russian mobile laser system to dazzle enemy satellites. The Space Review. https://thespacereview.com/article/3967/1

16. Pace, P. E., Fouts, D. J., Ekestorm, S., & Karow, C. (2002). Digital false-target image synthesiser for countering ISAR. IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation, 149(5), 248. https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20020635
17. Wang, W., & Cai, J. (2007). A technique for jamming bi- and multistatic SAR systems. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 4(1), 80–82. https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.886036
18. Li, Y., Huang, D., Xing, S., & Wang, X. (2020). A review of synthetic aperture radar jamming technique. Journal of Radars, 9(5). https://doi.org/10.12000/JR20087
19. Yang, K., Ye, W., Wu, X., Ma, F., & Li, F. (2020). Fast generation of deceptive jamming signal against space-borne SAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 5580–5596. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3025217
20. Yang, K., Ye, W., Ma, F., Li, G., & Tong, Q. (2020). A large-scene deceptive jamming method for space-borne SAR based on time-delay and frequency-shift with template segmentation. Remote Sensing, 12(1), 53. https://doi.org/10.3390/rs12010053
21. Wang, H., Zhang, S., Wang, W.-Q., Huang, B., Zheng, Z., & Lu, Z. (2020). Multi-scene deception jamming on SAR imaging with FDA antenna. IEEE Access, 8, 7058–7069. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963042
22. Wu, Z.-F., Xu, H.-P., Li, J.-W., & Liu, W. (2015). Research of 3-D deceptive interfering method for single-pass spaceborne InSAR. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 51(4), 2834–2846. https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140325
23. Kim, S., Lee, D., Park, Y., Joo, J., Kim, J., Kim, J., & Bang, J.-H. (2024). Deceptive jamming for spaceborne SAR using estimated signal parameters and intercepted signal phase. IEEE Access, 12, 169388–169403. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3498456
24. Zhao, Y., Tian, B., Wang, C., Gong, J., Tan, M., & Zhou, C. (2021). Research on main-lobe deceptive jamming against FDA-MIMO radar. IET Radar, Sonar & Navigation, 15(6), 641–654. https://doi.org/10.1049/rsn2.12070
25. Monti-Guarnieri, A., Giudici, D., & Recchia, A. (2017). Identification of C-band radio frequency interferences from Sentinel-1 data. Remote Sensing, 9(11), 1183. https://doi.org/10.3390/rs9111183
26. Tao, M., Lai, S., Li, J., Su, J., Fan, Y., & Wang, L. (2022). Extraction and mitigation of radio frequency interference artifacts based on time-series Sentinel-1 SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3126485
27. Hanafy, M. E., Hassan, H. E. A., Abdel-Latif, M. S., & Elgamel, S. A. (2018). Performance evaluation of deceptive and noise jamming on SAR focused image. In Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG 2018) (pp. 1–11). Military Technical College. https://doi.org/10.21608/iceeng.2018.30137
28. Qiu, T., Zhang, Y., Cheng, S., Zheng, H., & Zhao, H. (2024). A complex intrapulse modulation jamming scheme for spaceborne SAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17, 15942–15956. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3450204
29. Wang, S., & Guo, L. (2009). Analysis of laser jamming to satellite-based detector. Proceedings of SPIE, 7382, 73822W. https://doi.org/10.1117/12.835863
30. Schwarz, B., Ritt, G., Koerber, M., & Eberle, B. (2017). Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-optoelectromechanical systems. Optical Engineering, 56(3), 034108. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.034108
31. Ritt, G., & Eberle, B. (2017). Evaluation of protection measures against laser dazzling for imaging sensors. Optical Engineering, 56(3), 033108. https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.033108

32. Petrov, V., Kato, K., & Miyata, K. (2024). Barium chalcogenides for nonlinear optics in the mid-IR: Properties and applications. Optical Materials: X, 22, 100319. https://doi.org/10.1016/j.omx.2024.100319
33. Wang, Z., Mao, C., Chen, W., Xu, J., Yu, X., & Wu, H. (2025). Fabrication of ϕ60 mm large-size infrared nonlinear BaGa4Se7 crystals and devices. Journal of Synthetic Crystals, 54(6), 909. https://doi.org/10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2025.6001
34. European Space Agency. (n.d.). Sentinel-1 SAR technical guide: SAR instrument. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument
35. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., … Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment, 120, 9–24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028
36. McDowell, J. (n.d.). General catalog of artificial space objects (GCAT) [Data set]. Retrieved October 10, 2026, from https://planet4589.org
37. Hendrickx, B. (2020b). Russia gears up for electronic warfare in space (part 1). The Space Review. https://thespacereview.com/article/4056/1
38. rf u tsomu rotsi maie postavyty v Bilorus kompleks REB "Krasukha-4" [This year the russian federation is to deliver the Krasukha-4 electronic warfare system to Belarus]. (n.d.). Defense Express. https://defence-ua.com/news/rf_u_tsomu_rotsi_maje_postaviti_v_bilorus_komlpeks_reb_krasuha_4-14108.html
39. IAI ELTA. (2025). Scorpius-G EW AESA ground system ELL-8256SB [Datasheet]. https://www.iai.co.il/wp-content/uploads/2025/10/ELTA-ELL-8256SB-Scorpius-G-EW-AESA-Ground-System.pdf
40. New details emerge on Russia's secret laser weapon system. (n.d.). Defence Blog. https://defence-blog.com/new-details-emerge-on-russias-secret-laser-weapon-system/
41. Yao, J., Mei, D., Bai, L., Lin, Z., Yin, W., Fu, P., & Wu, Y. (2010). BaGa4Se7: A new congruent-melting IR nonlinear optical material. Inorganic Chemistry, 49(20), 9212–9216. https://doi.org/10.1021/ic1006742
42. Kostyukova, N. Y., Boyko, A. A., Erushin, E. Y., Kostyukov, A. I., Badikov, V. V., Badikov, D. V., & Kolker, D. B. (2019). Laser-induced damage threshold of BaGa4Se7 and BaGa2GeSe6 nonlinear crystals at 1.053 µm. Journal of the Optical Society of America B, 36(8), 2260. https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.002260
43. Li, C., Li, Z., Sun, M., Huang, C., & Yao, J. (2022). High-pressure synthesis, growth and characterization of large-size BaGa4Se7 crystals. Journal of Crystal Growth, 577, 126405. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126405
44. China's imposing LY-1 high-power laser weapon unveiled at huge military parade. (2025). The War Zone. https://www.twz.com/news-features/chinas-imposing-ly-1-high-power-laser-weapon-unveiled-at-huge-military-parade
45. China's LY-1 naval laser claims 180–250kW outmuscling US HELIOS. (2025). Army Recognition. https://www.armyrecognition.com/archives/archives-land-defense/defense-news-army-2025/chinas-ly-1-naval-laser-claims-180-250kw-outmuscling-us-helios
46. Weeden, B., & Samson, V. (Eds.). (2021). Global counterspace capabilities: An open source assessment. Secure World Foundation. https://www.swfound.org/publications-and-reports/2021-global-counterspace-capabilities-report
47. Space Force takes ownership of first Meadowlands satellite jammer. (2025). Breaking Defense. https://breakingdefense.com/2025/04/space-force-takes-ownership-of-first-meadowlands-satellite-jammer/
48. Space Systems Command. (2025). Field approval for USSF space electromagnetic warfare system upgrade expands warfighting capabilities. U.S. Space Force.

https://www.ssc.spaceforce.mil/Newsroom/Article/4196523/field-approval-for-ussf-space-electromagnetic-warfare-system-upgrade-expands-wa

49. US Space Force accepts L3Harris' Meadowlands for operational use. (2026). Executive Gov. https://www.executivegov.com/articles/ussf-meadowlands-l3harris-counter-communication-systems
50. Star Wars gets a step closer with new Space Force satellite jamming capabilities. (2025). Nextgov/FCW. https://www.nextgov.com/emerging-tech/2025/06/star-wars-gets-step-closer-new-space-force-satellite-jamming-capabilities/405810/
51. Space Force approves new satellite jammer for operational use. (2026). Air & Space Forces Magazine. https://www.airandspaceforces.com/space-force-approves-meadowlands-satellite-jammer-operational-use/
52. Teston, B. (2024). Innovative testing and skilled personnel drive Space RCO's newest success. Kirtland Air Force Base. https://www.kirtland.af.mil/News/Article-Display/Article/3928036/innovative-testing-and-skilled-personnel-drive-space-rcos-newest-success/
53. Space Training and Readiness Command Public Affairs. (2024). STARCOM tests RMT system for Space Rapid Capabilities Office. Space Training and Readiness Command. https://www.starcom.spaceforce.mil/News/Article-Display/Article/3747374/starcom-tests-rmt-system-for-space-rapid-capabilities-office/
54. Albon, C. (2024, December 19). New US Space Force jammers aim to disrupt China's satcom signals. Defense News. https://www.defensenews.com/space/2024/12/19/new-us-space-force-jammers-aim-to-disrupt-chinas-satcom-signals/

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons "Attribution" 4.0.