

УДК 355/359.07

А. О. Зінченко,

кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри зв'язку та АСУ інституту інформаційних технологій Національного університету оборони України імені Івана Черняховського, полковник,

В. І. Слюсар,

доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, головний науковий співробітник – начальник групи головних наукових співробітників – керівників наукових програм Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, полковник

Концепція інформаційно-сенсорної решітки на основі технології МІМО

Уперше запропонована концепція інтеграції інформаційної та сенсорної підсистем мережецентричного ведення бойових дій у єдину інформаційно-сенсорну підсистему з перетворенням інформаційної компоненти на інформаційно-сенсорну решітку. Створення радарно-телекомунікаційної мережі інформаційно-сенсорної решітки має стати початком подальшої інтеграції інформаційної підсистеми із системою систем різнотипних сенсорів, які функціонують за різноманітними фізичними принципами. Це дасть можливість охопити розгалуженим інформаційно-сенсорним контролем весь космічний, повітряний, наземний, надводний та підводний простір у відведеній операційній зоні. На початковому етапі синтезу радарно-телекомунікаційної мережі запропоновано створення багатопозиційної інтегрованої системи зв'язку та радіолокації із застосуванням у кожній позиції мобільної станції зв'язку та радіолокації, оснащеної цифровою антенною решіткою з режимом роботи МІМО та використанням сигналів неортогональної частотної дискретної модуляції.

Ключові слова: технічна система, телекомунікації, радіолокація, цифрові антенні решітки.

Як відомо, останнім часом для вирішення завдань радіозв'язку та радіолокації широке застосування знаходять системи МІМО (множинний вхід – множинний вихід). Використання технології МІМО стало невід'ємним атрибутом усіх нових стандартів передачі даних та радіолокації. Зважаючи на спорідненість апаратної побудови радіотехнічних пристроїв різного призначення, в роботах [1–3] була запропонована інтеграція окремих засобів телекомунікації та радіолокаційної розвідки в єдині системи та розроблене теоретичне підґрунтя створення відповідної інтегрованої радарно-телекомунікаційної системи. Такий підхід підтверджується поглядами на розвиток телекомунікаційних і радіолокаційних систем провідних фахівців країн – членів НАТО [4]. Логічним продовженням інтеграції може бути апаратне поєднання не лише окремих технічних засобів, а й технічних систем, яке утворює таким чином систему систем або надсистему. Особливо цікаво дослідити таку інтеграцію на прикладі відомої концепції ведення мережецентричних операцій. Вона передбачає існування трьох підсистем: бойової, сенсорної та інформаційної.

Тому метою статті є обґрунтування мережецентричної концепції системи систем озброєння та військової техніки на полі бою, в якій, на відміну від існуючої, інформаційна та сенсорна підсистеми апаратно поєднані в інтегровану інформаційно-сенсорну підсистему.

Концепцією ведення мережецентричних операцій передбачається створення єдиного інформаційного простору в інтересах усіх видів та родів військ. Технічною основою єдиного інформаційного простору буде система зв'язку, розгорнута за принципом решітки, до якої підключатимуться модулі різного призначення (бойові, розвідувальні, забезпечення) та базування (земля, повітря, море, космос). Вузлові елементи решітки поєднуюватимуться між собою високошвидкісними каналами зв'язку, які утворюватимуть декілька маршрутів обміну трафіком між вузлами. Застосування інтегрованої радарно-телекомунікаційної МІМО-технології в апаратних рішеннях вузлових елементів тактичної інформаційної решітки дасть можливість вести мову про повну апаратну інтеграцію інформаційної та сенсорної підсистем мережецентричної системи ведення об'єднаних операцій у єдину інформаційно-сенсорну підсистему з перетворенням інформаційної компоненти на інформаційно-сенсорну решітку.

Зазначена інтеграція у випадку радарних і телекомунікаційних систем може бути різною за рівнем. Крім повного поєднання апаратної основи, при цьому, наприклад, доцільно розрізняти апаратну, функціональну, сигнальну, алгоритмічну (програмну) інтеграцію та різні їх комбінації.

Кожен із зазначених видів інтеграції, у свою чергу, теж може поділятися на кілька рівнів. Зокрема, найпростішим різновидом апаратної інтеграції, як відомо, є розташування радіолокаційних і телекомунікаційних

пристроїв на спільній платформі чи транспортному засобі зі збереженням їхньої структурної незалежності. Такі технічні рішення давно відомі, як приклад достатньо навести застосування в оглядових радіолокаційних станціях засобів телекодової передачі даних для обміну інформацією з командним пунктом і радіолокаційними станціями наведення ракет. Однак при цьому мала місце повна функціональна підпорядкованість телекомунікаційних засобів вирішенню радіолокаційних завдань. У пропонованій концепції, котра базується на повній апаратній інтеграції, йдеться лише про часткову підпорядкованість або навіть повну функціональну незалежність засобів телекомунікацій у тому сенсі, що через них має циркулювати інформація не лише від споріднених радіолокаційних систем в інтересах вирішення радіолокаційних завдань, а й уся тактична інформація поля бою для оперативного забезпечення ведення бойових дій різними родами й видами військ.

Згідно з відомими законами розвитку технічних систем, сформульованими Г. С. Альтшулером та В. М. Петровим [5–7], інтеграція радарних і телекомунікаційних систем є проявом закону переходу до надсистеми. Він полягає в тому, що після вичерпання ресурсів свого розвитку одна система об'єднується з іншою, утворюючи нову, складнішу та функціонально збагачену надсистему. Такий перехід до надсистеми є неминучим і закономірним явищем. Він проходить через утворення бісистеми або навіть полісистеми з подальшим їх «частковим згортанням» (рис. 1), при якому скорочуються допоміжні елементи, встановлюються тісніші зв'язки між окремими системами.

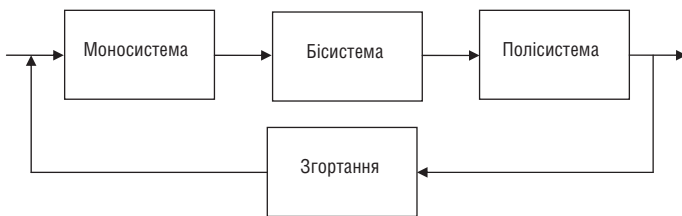


Рис. 1. Принцип формування надсистем [5–7]

У разі повної апаратної інтеграції радарної та телекомунікаційної систем може утворюватися не лише бісистема, а й полісистема, якщо розглядати поєднання систем пасивної та активної локації, мережевого, радіорелейного чи навіть тропосферного зв'язку тощо. Проявом згортання такої інтегрованої полісистеми є застосування в ній не тільки єдиної транспортної платформи (шасі), а й спільного джерела живлення, єдиного багатоканального передавального та приймального пристроїв, процесора обробки сигналів, антени тощо. Звичайно, на рівні кожного агрегату чи модуля, спільного для радіолокаційного й телекомунікаційного обладнання, необхідно здійснювати відповідне структурно-функціональне узгодження.

Крім того, згідно із законом мінімального узгодження частин і параметрів новоутвореної надсистеми, має відбутися параметричне узгодження її ритміки. Ідеться про оптимальне узгодження функціонування радіолокаційного й телекомунікаційного режимів роботи спільної апаратної платформи в часі та просторі з їх розподілом або злиттям, використання узгодженої регламентації застосування спільних сигналів.

Подальший розвиток радарно-телекомунікаційної системи полягає в переході від часткового до повного її згортання, коли один об'єкт виконує одразу декілька функцій. Така повністю згорнута бі- або полісистема фактично перетворюється на нову моносистему, яка проходить у своєму розвитку черговий оберток спіралі (рис. 1). Зокрема, розрізнені мобільні станції зв'язку та радіолокації (МСЗР) доцільно поєднати в багатопозиційну систему радіолокації та зв'язку із залученням МСЗР, розташованих не лише на суходолі, а й на водній поверхні (безекипажні надводні судна) та в повітрі (у складі безпілотного літального апарату). При цьому функціональне узгодження окремо взятих МСЗР полягатиме, наприклад, у розмежуванні їхніх зон радіолокаційного виявлення за секторами та висотами. Часткове згортання багатопозиційної системи зводиться до використання в режимі радіолокації спільного передавача для кількох приймальних базових станцій, сигнали якого застосовуються для опромінювання повітряного простору, а також єдиного для всіх мобільних станцій МСЗР пункту управління. Крім того, функціонально-структурне узгодження багатопозиційної системи МСЗР передбачає також використання передавачів одних МСЗР як джерел контрольних сигналів для інших МСЗР з метою коригування характеристик антенних решіток та їхніх передавальних і приймальних каналів [8, 9].

Зазначене апаратне й функціональне злиття двох раніше відносно автономних систем радіолокації та зв'язку дасть змогу органічно поєднати високу пропускну спроможність каналів зв'язку зі своєчасним виявленням засобів повітряного нападу противника (рис. 2).

Як наслідок, це уможливить підвищення живучості мережі передавачів зв'язку та радіолокації за рахунок своєчасного припинення роботи з випромінюванням для запобігання ураженню засобами, що наводяться на нього, ускладнить противнику виявлення угруповання протиповітряної оборони (ППО) й надасть можливість здійснити засобом ППО ураження противника без «підсвітлення» своїми РЛС. Район бойових дій являтиме собою суцільне поле електромагнітного випромінювання від різних функціонально поєднаних радіотехнічних систем, з різними робочими частотами та поляризацією.

Доповнення радіолокаційною функцією має торкнутися й таких типів зв'язку, як тропосферний і супутниковий. В ідеалі створення радарно-телекомунікаційної мережі інформаційно-сенсорної решітки має стати початком подальшої інтеграції інформаційної підсистеми із системою систем різнотипних сенсорів, що функціонують

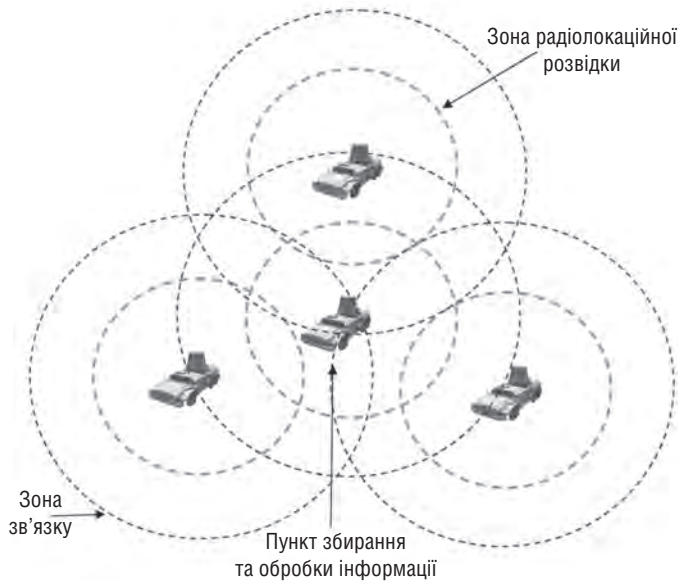


Рис. 2. Інтегрована мобільна радарно-телекомунікаційна система

за різноманітними фізичними принципами. Це дасть змогу охопити розгалуженим інформаційно-сенсорним контролем весь космічний, повітряний, наземний, надводний та підводний простір у відведеній операційній зоні.

Доволі перспективним напрямом реалізації запропонованої концепції радарно-телекомунікаційної системи є перехід до принципу «зграєцентричної» мережі систем (Swarm-centric Systems) на основі роботизованих безпечних платформ, зокрема БПЛА. «Зграя» або «рій» кількох десятків БПЛА, які здійснюють взаємоузгоджений політ у розосередженому бойовому порядку, забезпечать синхронний синтез аперттури рознесеної в просторі антенної решітки для високоточної радіолокації наземної обстановки, а також можуть виконувати функції повітряних базових станцій і ретрансляторів сигналів для покриття зв'язком тактичних або оперативних районів зосередження військ. Технічна секція «Сенсори та електронні технології» (Sensors and electronics technology, SET) Організації НАТО з науки і технологій (STO) здійснює координацію наукових досліджень у сфері менеджменту зграями роботів і БПЛА. Зокрема, вивчаються методи керування роєм з 50 міні-БПЛА та відпрацьовується «зграє-людинний» інтерфейс для інформаційного обміну.

При автоматизованій обробці інформації від різних елементів у єдиному центрі інформаційно-сенсорної мережі вважається можливим отримати доволі повну інформацію про об'єкти повітряного нападу і видавати команди на оперативне застосування сил та засобів протиповітряної оборони по всьому спектру загроз, яким мають протистояти засоби ППО. Серед них, як зазначено в [10], – стратосферні засоби спостереження, винищувачі

п'ятого й шостого покоління, гіперзвукові крилаті та квазібалістичні тактичні ракети, стелс- і мікро-БПЛА, керовані кулі великої дальності дії, котрі застосовуватимуться у зброї підрозділів сил спецоперацій, при цьому вплив усіх таких загроз може бути одночасним та розосередженим у просторі на значній території.

Роботи за напрямом створення багатофункціональних засобів, які поєднують б у межах однієї апаратної платформи вирішення завдань, традиційно притаманних окремим за призначенням радіотехнічним комплексам, як зазначалося, ведуться в провідних країнах світу. Відповідні теоретичні напрацювання існують і в Україні [11, 12].

Подальшим розвитком зазначеного напрямку стали запропоновані у [13] інтегровані системи радіолокаційної розвідки та зв'язку, які ґрунтуються на застосуванні єдиної апаратної платформи за технологією MIMO та використанні неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM) сигналів.

Суть запропонованої апаратної інтеграції систем зв'язку та радіолокації полягає в тому, що при роботі базових станцій MIMO в режимі обміну інформацією від повітряних об'єктів, котрі потрапляють у промені діаграми спрямованості цифрових антенних решіток (ЦАР), відбивається частина енергії електромагнітних коливань, які надходять на вхід приймача станції, що опромінює простір. Зазначене пояснюється за допомогою *рисунка 3*, де зображений принцип здійснення зв'язку між двома MIMO-станціями кореспондентів.

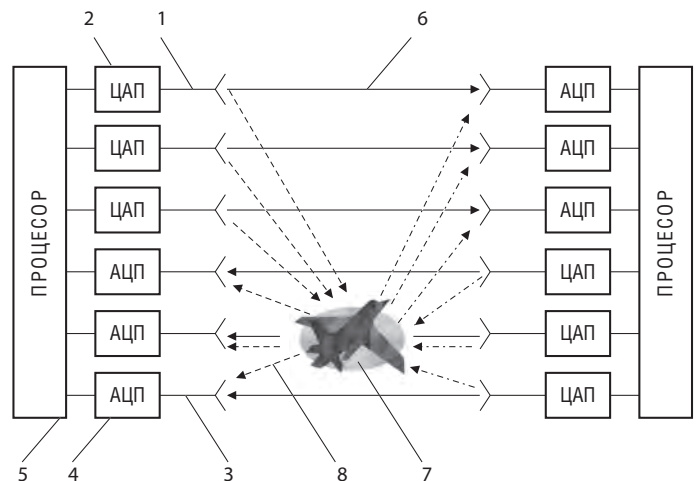


Рис. 3. Принцип інтеграції системи зв'язку та радіолокації на основі технології MIMO

Наведена на *рисунку 3* MIMO-система зв'язку структурно складається із цифрової антенної решітки, в якій елементи, які випромінюють, 1 підключені до відповідних цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) 2, а елементи, що приймають сигнали, 3 – відповідно на аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) 4. АЦП і ЦАП підключені

до загального процесора 5, у якому здійснюється обробка сигналів у цифровому вигляді. Кожен елемент ЦАР, що випромінює, формує свою діаграму спрямованості і передає свій інформативний сигнал 6. На об'єкті розвідки 7, який потрапляє в зону радіоелектронного випромінювання ЦАР станції МІМО-зв'язку, здійснюється розсіювання енергії корисного сигналу для кожного елемента ЦАР. Відбиті від об'єкта інформаційні сигнали 8 потрапляють на вхід приймальних елементів ЦАР, спільно з інформаційним сигналом кореспондента, що дає змогу здійснити їх алгоритмічну селекцію.

Суттєво, що відбитий від об'єкта розвідки сигнал потрапляє у приймачі разом із сигналом від станції кореспондента, але він не повинен відкидатися як завада, а має оброблятися для виявлення присутності об'єкта, що потрапив у зону дії діаграми спрямованості ЦАР, та параметрів його руху.

У запропонованій інтегрованій системі зв'язку та радіолокації внаслідок спеціальної обробки цифрової суміші в процесорі ЦАР багаточастотні сигнали N-OFDM ефективно розділяються на інформаційні та відбиті від повітряної цілі, що дає можливість здійснювати одночасно функції інформаційного обміну між станціями зв'язку та вести радіолокаційну розвідку на трасі поширення сигналів.

Ширшим рівнем узагальнення розглянутого інтеграційного підходу є використання багатопозиційної системи МІМО-радіолокації в поєднанні з кооперативною передачею даних у розподілених МІМО-системах зв'язку на основі впровадження багатокористувальницьких алгоритмів МІМО-зв'язку (мульти-МІМО) в мережах мобільних базових станцій. При цьому можливі гібридні системи, котрі поєднують у собі мульти-МІМО кластери й автономні МІМО-комплекси зв'язку та радіолокації.

Найпростішим режимом функціонування інтегрованої мульти-МІМО системи є розподіл у часі виконання завдань передачі даних та радіолокації (наприклад, здійснення контролю повітряного простору на етапі входження у зв'язок). Найскладнішим випадком є одночасне вирішення радіолокаційних та зв'язкових задач із кооперативною передачею даних, коли кожна зі станцій зв'язку одночасно працює з усіма зав'язаними в мережу базовими станціями.

Відправною точкою досліджень зазначених мульти-МІМО систем є математична формалізація їхнього відгуку. Без цього неможливо реалізувати обробку сигналів з метою демодуляції повідомлень та вимірювання параметрів руху радіолокаційних цілей. Складність математичного опису процесу функціонування інтегрованої системи радіолокації та зв'язку (ІСРЗ) залежить від типу ЦАР, які використовуються на мобільних станціях. Найпростішим є випадок застосування односекційних лінійних ЦАР, однак для вирішення радіолокаційних завдань

доцільно спиратися на використання плоских антенних решіток. Найскладнішим випадком є оснащення кожної з мобільних базових станцій ІСРЗ багатосекційними плоскими ЦАР. Суттєво, що використовуючи апарат блокових торцевих добутоків матриць і добутку Хатрі-Рао [14, 15], усі зазначені випадки конструктивного виконання ЦАР були охоплені єдиним матричним виразом, що описує сукупність напруг сигналів по входах приймальних каналів ЦАР:

$$U = P \cdot A + n,$$

де U – блоковий вектор комплексних напруг сигналів по виходах частотних фільтрів просторових каналів сукупності плоских ЦАР,

P – сигнальна матриця,

A – блоковий вектор амплітуд сигналів,

n – блоковий вектор шумових напруг.

Для кожного з випадків використовується своя структура сигнальної матриці P та блокових векторів U та A . Метою подальших досліджень має бути передусім конкретизація запису сигнальної матриці та блокових векторів U та A для неохоплених у попередніх роботах випадків, отримання відповідних оцінок параметрів сигналів та аналіз їхньої точності.

Висновки

1. Уперше викладена концепція інтеграції інформаційної та сенсорної підсистем мережецентричного ведення бойових дій у єдину інформаційно-сенсорну підсистему з перетворенням інформаційної компоненти на інформаційно-сенсорну решітку. Створення радарно-телекомунікаційної мережі інформаційно-сенсорної решітки має стати початком подальшої інтеграції інформаційної підсистеми із системою систем різнотипних сенсорів, що функціонують за різноманітними фізичними принципами. Це дасть змогу охопити розгалуженим інформаційно-сенсорним контролем весь космічний, повітряний, наземний, надводний та підводний простір у відведеній операційній зоні.

2. Для ефективного вирішення завдань зв'язку та радіолокації пропонується концепція створення інтегрованої системи радіолокаційної розвідки та зв'язку на єдиній апаратній платформі за технологією МІМО та з використанням неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM) сигналів.

3. Серед тенденцій розвитку інформаційних систем спеціального призначення заслуговує на увагу ідея створення багатофункціональних засобів, які поєднували б у межах однієї апаратної платформи вирішення завдань, традиційно притаманних окремим за призначенням радіотехнічним комплексам. Особливо ефективним таке поєднання може бути на основі використання цифрових антенних решіток.

Перелік літератури

1. *Слюсар В. І.* Інтегрована система зв'язку та радіолокаційної розвідки на основі технології МІМО / В. І. Слюсар, А. О. Зінченко // III всеукраїнська науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ», 13–14 квітня 2010 р. – Львів : Академія Сухопутних військ імені Петра Сагайдачного, 2010. – С. 150.
2. *Слюсар В. І.* Технологія МІМО як основа інтегрованої системи зв'язку та радіолокаційної розвідки / В. І. Слюсар, А. О. Зінченко // Шоста наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил «Новітні технології для захисту повітряного простору», 14–15 квітня 2010 р. – Х. : Харківський університет Повітряних Сил, 2010. – С. 108–109.
3. *Зінченко А. О.* Багатопозиційна інтегрована система зв'язку і радіолокації на основі конформних антенних решіток у режимі мульти-МІМО / А. О. Зінченко // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – № 10. – С. 51–59.
4. *Quaranta P.* Radar technology for 2020 / P. Quaranta // *Militari technology*. – 2016. – № 9 (48). – Р. 86–89.
5. *Альтшуллер Г. С.* Творчество как точная наука. Теория решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер. – М. : Сов. радио, 1979. – 184 с.
6. *Альтшуллер Г. С.* Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер. – Новосибирск : Наука, 1986. – 209 с.
7. *Петров В.* Основы теории решения изобретательских задач / В. Петров. – Тель-Авив, 2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.trizfido.narod.ru/00/petrov.htm>.
8. *Слюсар В. І.* Коррекция характеристик приемных каналов цифровых антенных решеток в интегрированной системе мобильной связи и радиолокационного мониторинга / В. І. Слюсар, І. В. Титов // Матеріали 7-го ювілейного міжнародного молодіжного форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (22–24 апреля 2003) : Сб. – Харьков : ХНУРЭ. – 2003. – С. 42 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://slyusar.kiev.ua/MF_7_SLYUSAR.pdf.
9. *Slyusar V. I.* Correction of smart antennas receiving channels characteristics for 4G mobile communication / V. I. Slyusar, I. V. Titov // *Proceedings of the IVth International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 9–12 September 2003, Sevastopol. – Р. 374–375 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://slyusar.kiev.ua/МКТТА_2003.pdf.
10. *Слюсар В. І.* Звіт за результатами участі представника Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України у засіданні Міжвійдової групи НАТО з розвитку спроможностей протиповітряної оборони (ППО) наземного базування (JCG GBAD) Групи з озброєнь сухопутних військ (AC/225, NAAG) Конференції національних директорів з озброєння (19–20 квітня 2016 року у м. Брюссель, Бельгія), затверджений рішенням заступника Міністра оборони України № 4703/з/1 від 5 травня 2016 р. / В. І. Слюсар.
11. *Слюсар В. І.* Концепція перспективної інформаційно-телекомунікаційної системи / В. І. Слюсар, І. В. Титов, В. Г. Карев // IV науково-практична конференція «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення» (22–23 жовтня 2008 р.) : доповіді та тези доповідей). – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2008. – С. 76–79.
12. *Слюсар В. І., Титов І. В.* Патент України № 56922А. МПК8 G01S13/02, G01S13/06, G01S13/48, G01S13/74, G01S13/86, G01S13/87. Спосіб виявлення повітряних цілей за допомогою системи стільникового зв'язку. – Заявка № 2002119018, дата пріоритету 12.11.2002. – Опубл. 15.05.2003. – Бюл. № 5/2003.
13. *Слюсар В. І.* Багатопозиційна система мобільних станцій зв'язку та радіолокації / В. І. Слюсар, А. О. Зінченко // Матеріали 18-ї науково-практичної конференції «Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення», 15 квітня 2011 року. – Житомир: Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова Національного авіаційного університету, 2011. – С. 105–106.
14. *Слюсар В. І.* Обобщенные торцевые произведения матриц в моделях цифровых антенных решеток с неидентичными каналами / В. І. Слюсар // *Известия вузов. – Сер. «Радиоэлектроника»*. – 2003. – Т. 46. – № 10. – С. 9–17.
15. *Слюсар В. І.* Семейство торцевых произведений матриц и его свойства / В. І. Слюсар // *Кибернетика и системный анализ*. – 1999. – Т. 35. – № 3. – С. 379–384.