

УДК 621.396.96

В.М. ОРЛЕНКО

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Україна

ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ РЛС ІЗ ВИСОКОПРИОРИТЕТНИМИ ВУЗЬКОСМУГОВИМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ

Розглядаються в постановочному плані та ілюструються прикладами методи забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) широкосмугових та вузькосмугових РЕС із використанням методів адаптації.

широкосмугові РЛС, електромагнітна сумісність, адаптація

Вступ

Методика оцінки ЕМС широкосмугових РЛС без використання методів адаптації розглядалась в статті [1]. Розгляд показав, що при забезпеченні ЕМС зустрічаються певні труднощі, які можна перебороти за рахунок лише зменшення рівнів бічних пелюстків і зниження енергетики широкосмугових РЛС. Однак є ряд факторів, які полегшують подолання цих труднощів.

По-перше, не всі засоби, яким може перешкодити широкосмугове випромінювання, мають вищий пріоритет, ніж оглядові РЛС, що виявляють і розпізнають особливо небезпечні цілі. У першу чергу, варто запобігти взаємним перешкодам таким більш важливим РЕС, як наприклад зенітним ракетним комплексам, комплексам наведення ракет "повітря-земля", "повітря-повітря", "земля-земля", "море-земля" та "земля-море". У цьому випадку, як правило, широкосмугові та вузькосмугові РЛС різного призначення функціонують у різних частотних діапазонах.

По-друге, у більшості випадків широкосмугові випромінювання особливо необхідні для розпізнавання класів або типів цілей. Таке розпізнавання необхідно для виділення цілей найнебезпечніших з погляду збитку щодо військ та об'єктів, які вони прикривають, в умовах застосування супротивником імітувальних перешкод, а також як альтернатива

упізнаванню у випадках, коли запитувально-відповідальна система упізнавання дає збої. Широкосмугове розпізнавання класів або типів цілей може проводитися в призначуваних напрямках. Поряд з послідовним оглядом всього простору або сектору можна здійснювати широкосмугове зондування тільки в певних напрямках, де немає своїх об'єктів. У більшості ж випадків, повторне розпізнавання необхідно тільки у випадку явної можливості переплутування цілей або після певного часу, коли таке переплутування могло виявитися непоміченим або була не досить висока ймовірність правильного розпізнавання.

Частковим, та особливо небезпечним, випадком необхідності повторного розпізнавання є наявність відмов у системах упізнавання, коли після повітряного бою є небезпека поразки системами ЗРВ власних літаків. Дана обставина забезпечує скорочення часу, у плинні якого необхідно випромінювати широкосмуговий сигнал.

По-третє, самі вузькосмугові РЕС можуть бути обладнані засобами адаптивного придушення маскувальних перешкод по ближнім, далеким й, навіть, у головному пелюстку діаграми спрямованості антенних систем. Подібні засоби з'явилися вже кілька десятиків років тому, а до теперішнього часу, у зв'язку з розвитком цифрової техніки, вони можуть бути значно вдосконаленими за рахунок використання

різних методів обернення кореляційних матриць, у тому числі за допомогою ґратчастих фільтрів, методів байєсівської регуляризації з розкладанням по власних числах і т.д.

Можливий вплив, що заважає, вузькосмугових випромінювань на широкосмуговий прийом тут не розглядається, оскільки такий вплив може значно знижуватися за рахунок використання відомої нелінійної обробки з використанням схем ШОВ, але в частотній області.

Таким чином, адаптаційні методи ЕМС розділяються на міжсистемні, що забезпечують сумісність елементів систем озброєння різних родів військ, і внутрішньосистемні, що забезпечують виключення взаємних перешкод між РЛС, розташованих на одній або сусідніх позиціях.

У цей час можливий ряд методів забезпечення ЕМС широкосмугових систем з вузькосмуговими на основі використання адаптації до електромагнітної обстановки. **Метою цієї статті** є аналіз розвитку цих можливостей на основі методики [1], а також сильних і слабких сторін пропонованих методів адаптації.

У статті розглядається принцип забезпечення ЕМС із адаптацією до просторового положення широкосмуговій та вузькосмуговій РЛС із метою забезпечення їх ЕМС (розд. 1), наводяться приклади оцінки ЕМС широкосмуговій та високопріоритетній вузькосмуговій РЛС при їхньому функціонуванні у різних частотних діапазонах (розд. 2). Також розглядаються додаткові неадаптивні методи забезпечення ЕМС широкосмуговій та вузькосмуговій РЛС, близькі до адаптивного за своєю сутністю (розд. 3).

1. Принципи забезпечення ЕМС широкосмугових РЛС із вузькосмуговими при використанні адаптації до їхнього просторового розташування

Ступінь ослаблення бічними пелюстками залежить від взаємної орієнтації ДН широкосмуговій й вузькосмуговій РЛС у процесі їхнього сканування.

Варіанти взаємного положення ДН двох (широко-смугової й вузькосмугової) РЛС показані на рис. 1. Перша ситуація відповідає передачі й прийому широкосмугового випромінювання, що заважає, по основних пелюстках (ОП) ДН антен сусідніх РЛС. Друга – прийому по основному пелюстку й передачі по бічних пелюстках. Третя – передачі й прийому по бічних пелюстках.

Згідно оцінок ЕМС [1], вплив широкосмугової оглядової РЛС, що заважає вузькосмуговій, виявляється неприпустимо великим для ситуацій 1 (рис. 1) і 2 (рис. 1). Зменшення взаємного впливу, що заважає, широкосмуговій РЛС та вузькосмугових можна домогтися шляхом адаптивного (на основі збору інформації про сусідні РЛС наземного й повітряного базування) вимикання широкосмугового зондувального сигналу в ситуації 1 (рис. 1), а також можливого зниження його потужності при виявленні факту випромінювання вузькосмугового сигналу по основному пелюстку ДН антени в напрямку широко-смугової РЛС, тобто ситуації 2 (рис. 1).

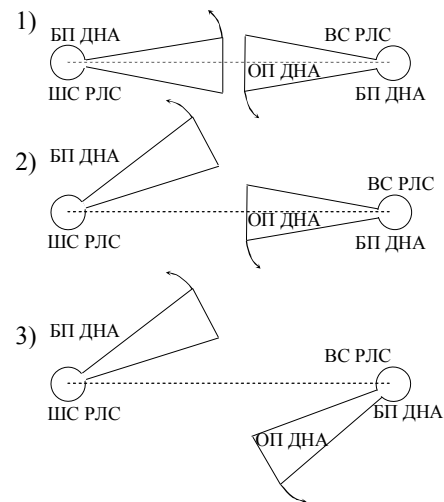


Рис. 1. Ситуації суміщення випромінювань сусідніх РЕС, що заважають

Стосовно ЕМС вузькосмугових РЛС вимикання випромінювання в певних азимутальних напрямках відоме як секторне бланкування [2]. Даний метод можна віднести до міжсистемних. Для його реалізації у широкосмугових РЛС також необхідне одержання й використання інформації про те, де перебувають сусідні засоби (рис. 2). Інформація про місця

розташування наземних РЛС може поновлюватися більш рідко, а інформація про місця розташування РЛС на повітряних носіях – більш часто.

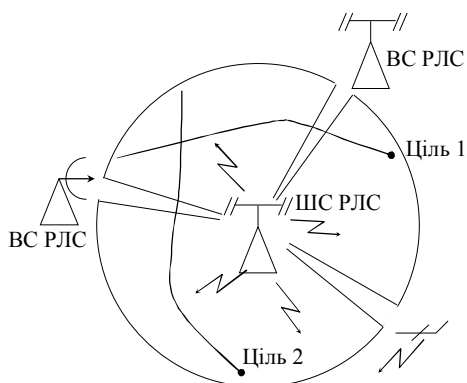


Рис. 2. Пояснення принципу адаптивного обмеження напрямків випромінювання

У відношенні широкосмугових РЛС метод секторного бланкування повинен бути видозмінений у метод керування потужністю широкосмугового зондування залежно від напрямку зондування та поточної потужності сигналів, випромінюваних сусідніми РЛС. Така адаптація до просторового положення сусідніх РЛС є більш загальною.

2. Забезпечення ЕМС широкосмугових РЛС із високо пріоритетними вузькосмуговими

ЕМС широкосмугових РЛС із високопріоритетними вузькосмуговими повинна забезпечуватися за рахунок використання всіх доступних факторів. Такими факторами також на міжсистемному рівні є:

- 1) рознесення займаних РЛС частотних діапазонів;
- 2) ослаблення бічними пелюстками (БП) ДН антен на передачу й прийом;
- 3) ослаблення широкосмугового випромінювання у вузькосмуговому приймачі, пропорційне зменшенню його спектральної щільності потужності, а також інші фактори, розглянуті нижче.

Прикладом рознесення по частотних діапазонах РЛС із різним пріоритетом є рознесення діапазонів оглядових РЛС і РЛС наведення зенітних ракет. Перші можуть функціонувати в діапазонах частот L (15...30 см) і S (7,5...15 см), другі – найчастіше в діа-

пазонах C (3,75... 7,5 см) і X (2,5... 3,75 см). Для виключення взаємного впливу, що заважає, вузькосмугових РЛС у цій ситуації звичайно обмежують припустимі рівні позаполосного й побічного випромінювань.

Для оглядових РЛС із дальністю локації порядку 400 км припустимий рівень цих випромінювань становить порядку -65 dB від рівня основного випромінювання [1]. У випадку радіолокації із широкосмуговими сигналами, зниження рівня позасмугових і побічних випромінювань може виявитися більш складним завданням. При використанні в РЛС широкосмугових ЛЧМ імпульсів забезпечення її ЕМС може полегшуватися відсутністю пелюсткової структури спектрів імпульсів.

Швидкість спадання спектральної щільності ЛЧМ сигналу залежно від зміни частоти [3, 4] може бути визначена виходячи із графіків рис. 3, на яких показані нормовані спектральні щільності прямокутного (суцільна лінія) і дзвончастого (пунктир) ЛЧМ імпульсів тривалістю 120 мкс із девіацією частоти 150 МГц залежно від відносної частоти $f' = f/\Delta f$.

У відповідності з рис. 3 розладнання робочої частоти РЛС на величину девіації призведе до зниження спектральної щільності потужності прямокутного ЛЧМ імпульсу на величину порядку -50 dB, а дзвончастого ЛЧМ імпульсу порядку -30 dB. При більшому розладнанні між оглядовою РЛС, що використовуватиме широкосмуговий сигнал, та високопріоритетною РЛС наведення ослаблення може бути й більшим.

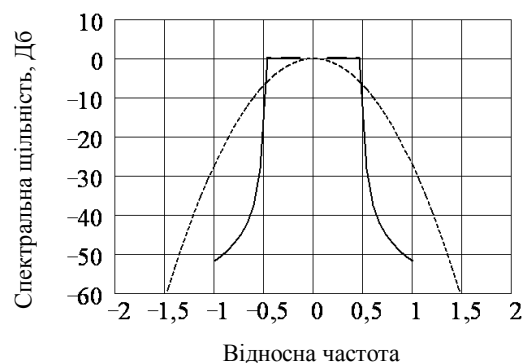


Рис. 3. Спектральна щільність ЛЧМ сигналу з дзвончастою (пунктир) та прямокутною огинаючими (суцільна)

Однак, не розглядаючи можливі переколювання спектрів при неточному формуванні сигналів у передавачі, при оцінці ЕМС широкопугової РЛС із високоприоритетною вузькопуговою обмежимося середнім значенням рівня позаспугового випромінювання, рівним -40 dB. Таке обмеження буде менш строгим у порівнянні з аналогічним обмеженням для вузькопугових РЛС.

В [1] приводилася методика оцінки ЕМС широкопугової РЛС із вузькопуговими. Відповідно до цієї методики на рис. 4 порівнюється дальність радіолокації широкопуговим сигналом тривалістю 250 мкс із шириною спектра 150 МГц (суцільна лінія) з дальністю, до якої вплив, що заважає, широкопугового випромінювання перевищує припустимий, тобто відношення сигнал (що заважає) – шум перевищує величину $0,52$ ($-2,8$ dB) (пунктирні лінії) [1].

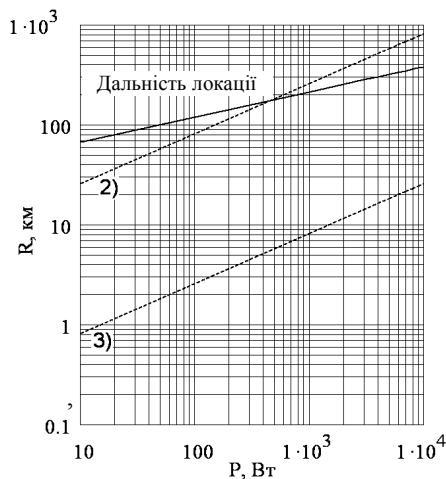


Рис. 4. Порівняння дальності локації з дальностями прийому випромінювань типової оглядової РЛС, що заважають, для ситуацій (рис. 1)

Широкопуговий зондувальний сигнал випромінюється при цьому в напрямку сусідньої РЛС тільки по бічних пелюстках з ослабленням -30 dB (у напрямку на вузькопугову РЛС уводиться заборона на широкопугове випромінювання), прийом здійснюється по основному пелюстку (ситуація 2, рис. 1) або бічним пелюсткам з рівнями -30 dB (ситуація 3, рис. 1). Інші параметри широкопугового зондування й вузькопугового прийому такі ж, як в [1].

З рис. 4 видно, що у випадку прийому широкопугового випромінювання, що заважає, основним

пелюстком ДН високоприоритетної вузькопугової РЛС, його вплив, що заважає, може виявитися неприпустимо високим. Істотного зменшення цього впливу можна досягти шляхом зниження потужності широкопугового випромінювання на $10 \dots 15$ dB. У такому випадку дальність розпізнавання цілей широкопугової РЛС також зменшиться, але цілі на малих дальностях все-ж таки можуть розпізнаватися при повнім виключенні перешкод високоприоритетній вузькопуговій РЛС.

При випромінюванні зондувального сигналу широкопугової РЛС по бічним пелюстками діаграм спрямованості з рівнем -30 dB і його прийомі також по бічних пелюстках -30 dB вплив, що заважає, широкопугової РЛС на високоприоритетну вузькопугову (крива для ситуації 3 на рис. 4) повністю виключається.

У комбінації з суттєвим обмеженням потужності передавача РЛС та ослабленням бічними пелюстками антени ослаблення широкопугового випромінювання у вузькопуговому приймачеві сприяє не тільки ЕМС, але й скритності РЛС малої дальності.

Прикладом останньої РЛС може бути недавно опублікована іспанська експериментальна надширокопугова РЛС [5]. Основним її призначенням є високоточний всепогодний контроль прибережних акваторій. Дальність локації близько 15 км, режим зондування - безперервний ЛЧМ у смугі $28 - 30$ ГГц (довжина хвилі 1 см), девіація частоти 50 МГц... 2 ГГц. Ширина ДН антени порядку $3^\circ \times 3^\circ$. Обробка – гетеродинно-фільтрова з повною демодуляцією, миттєва ширина смуги пропускання приймача 40 МГц, набір фільтрів реалізований у цифровому виді. Потужність передавача: -5 dBW ($0,3$ Вт). Поглинання енергії зондувального сигналу при двостороннім поширенні в атмосфері близько $0,2$ dB/km. Для дальності локації 15 км втрати в атмосфері - близько 3 dB. Широкий спектр зондувального сигналу забезпечує розпізнавання судів по їхніх дальнісно-частотних портретах.

На рис. 5 порівнюється дальність дії РЛС [5] з дальністю, на якій її основне випромінювання може

впливати на вузькосмугові засоби в тій же смузі частот для ситуацій 2 та 3 (рис. 1).

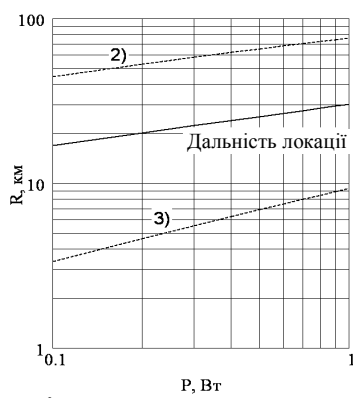


Рис. 5. Порівняння дальності локації з дуальностями прийому випромінювань експериментальної РЛС малої дальності, що заважають, для ситуацій (рис. 1)

Дальність, на якій її випромінювання можуть впливати на вузькосмугові РЛС, розраховується згідно методики [1], з урахуванням дальностній залежності коефіцієнта поглинання радіохвиль в атмосфері. Видно, що при виключенні ситуацій, коли близько розташовані вузькосмугові РЛС, що працюють на тих же частотах, опромінюються основним пелюстком ДН антени широкосмугової РЛС, а тільки по бічних пелюстках з рівнем -30 dB , дальність впливу, що заважає, при прийомі по основному пелюстку приймальні антени вузькосмугової РЛС не перевищує 60 км , а при прийомі по бічних пелюстках з рівнем -60 dB не перевищує $5,5 \text{ км}$. При додатковому розносі частотних діапазонів і придушенні позасмугового й побічного випромінювання, що заважає, до рівня -30 dB впливом випромінювань РЛС [5] можна в основному зневажити (крива для ситуації 2 займає положення кривої ситуації 3, а крива для ситуації 3 зрушується вниз приблизно на декаду).

3. Додаткові фактори, що сприяють поліпшенню ЕМС широкосмугових РЛС із вузькосмуговими

Забезпечення ЕМС РЕС різного призначення з використанням часових факторів та елементів адаптації ґрунтується на скороченні часу випромінювання, часовому бланкуванню, часовій синхронізації й часовій регламентації [2]. Перераховані фактори

забезпечення ЕМС можуть бути віднесені як до міжсистемних, так і внутрісистемних. Вони засновані фактично на використанні адаптації моментів випромінювання широкосмугових сигналів до складної електромагнітної обстановки. Часове бланкування, пов'язане з відведенням кожній РЕС свого часового "вікна", і часова регламентація, пов'язана з повним припиненням випромінювання низькопріоритетних РЕС у певних місцях й у певний час, тут докладно не розглядаються.

Обмеження часу широкосмугового випромінювання. Обмеження часу широкосмугового випромінювання є ефективним заходом забезпечення ЕМС широкосмугової РЛС із вузькосмуговими. Дана міра знижує ймовірність постановки широкосмуговою РЛС взаємних перешкод вузькосмуговим пропорційно зменшенню часу широкосмугового випромінювання відносно вузькосмугового. Як відзначалося, використання широкосмугового випромінювання, у першу чергу, обумовлено необхідністю рішення завдань розпізнавання класів і типів виявлених цілей.

Істотне обмеження часу широкосмугового випромінювання шляхом комбінації його з вузькосмуговим вже реалізовувалося в оглядовій РЛС, розробленої в СРСР разом з ВирТА, в 1980-і рр. [6], і реалізується в новій РЛС "Сенрад" (США, 2001 р.) [7]. Основними режимами зондування в цих РЛС є вузькосмуговий та багаточастотний відповідно. Використання широкосмугового ЛЧМ сигналу із шириною спектра 75 МГц й 150 МГц відповідно в цих РЛС обмежено секторами азимутів, у яких перебувають виявлені цілі й по яких призначений режим розпізнавання класу (або типу). При цьому в напрямку цілі випромінюється всього один або кілька широкосмугових імпульсів. Вид одного із зондувальних сигналів РЛС "Сенрад" показаний на рис. 6. Він складається з імпульсів "великої дальності" тривалістю до 250 мкс , що випромінюються з періодами близько 3 мс , які перемежуються трійками імпульсів "малої дальності" тривалістю 10 мкс , що випромінюються з періодами 1 мс . Всі імпульси є

лінійно частотно-модульованими з девіацією частоти 2 МГц, один або кілька імпульсів "великої дальності" у призначуваних напрямках модулюються з девіацією 150 МГц. Несучі частоти імпульсів "великої дальності" та трійок імпульсів "малої дальності" змінюються. Таким чином, навіть без випромінювання широкосмугових імпульсів цілі опромінюються багаточастотним сигналом з розносом між крайніми частотами не менш 16 МГц.

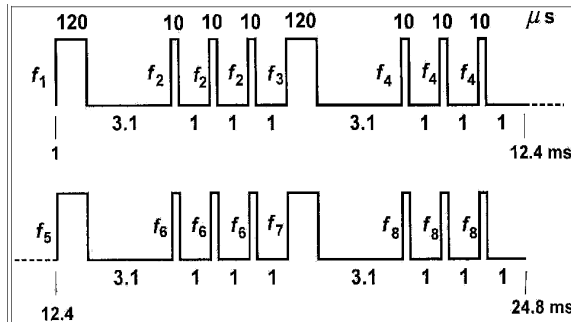


Рис. 6. Структура одного з сигналів РЛС «Сенрад»

Певним недоліком такого методу підвищення ЕМС є те, що властивості широкосмугового сигналу для підвищення перешкодозахищеності від пасивних перешкод не використовуються у повному обсязі.

Перевагою використання широкосмугового ЛЧМ сигналу є можливість виміру висоти повітряних об'єктів по одному зондуванню при розміщенні РЛС над морем або степом.

Відзначимо, що навіть у суміщеній РЛС (з однією антеною на передачу й прийом) використання ЛЧМ імпульсів з девіацією 150 МГц тривалістю 250 мкс може не обмежуватися мінімальною дальністю розпізнавання 37,5 км, що відповідає часу, протягом якого приймач РЛС закритий пристроєм захисту від власного випромінювання. Це означає, що широкосмугове розпізнавання може бути реалізовано й для цілей, розташованих на менших дальностях.

Для цього, замість повного закриття входу приймача, слід забезпечити суттєве розширення його динамічного діапазону. Останнє може бути реалізовано, наприклад, за рахунок розносу часового автоматичного регулювання посилення (ЧАРП), але в дуже широкому діапазоні, достатньому для забезпечення необхідного ослаблення й погодженої оброб-

ки в приймачі відбитих широкосмугових імпульсів прийнятих з дальностей одиниць км на тлі зондувального сигналу, що проникає в приймач (рис. 7).

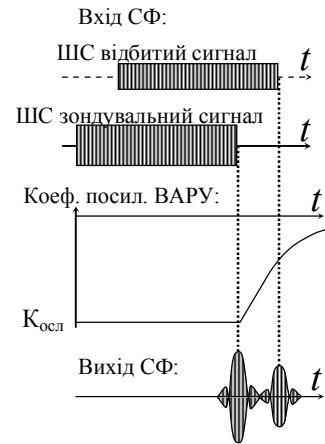


Рис. 7. Пояснення принципу виявлення широкосмугових відбитих сигналів на малих відстанях

Часова синхронізація випромінювань. Як при багаточастотній роботі, так і при випромінюванні широкосмугових імпульсів, ефективним заходом забезпечення ЕМС є використання часової синхронізації. Часова синхронізація полягає в узгодженні періодів проходження імпульсів РЛС, що працюють у групі й розташованих на одній або близьких позиціях. У випадку одночасного випромінювання сигналів всіма РЛС групи, потужні випромінювання, що заважають, від сусідніх засобів потрапляють на входи приймальних пристроїв у той час, коли їхні входи закриті пристроями захисту від свого випромінювання. При часовій синхронізації вузькосмугових РЛС вибирається найбільший період повторення імпульсів. Менші періоди повторення сигналів інших РЛС формуються при цьому як субгармоніки найбільшого періоду.

При забезпеченні ЕМС сукупності нерухомих РЛС часова синхронізація може реалізовуватися неадаптивно (жорстко), з виділенням провідної станції, що задає частоту випромінювання. У випадку наявності рухомих РЛС, така синхронізація повинна виконуватися адаптивно з використанням допоміжної апаратури, що виділяє загальний для всіх засобів період проходження зондувальних імпульсів.

При випромінюванні однієї із РЛС групи широкосмугового сигналу його синхронізацію з вузькос-

муговими зондувальними імпульсами доцільно здійснювати таким чином, щоб моменти закінчення тривалого ширококугового та більш коротких вузькосмугових імпульсів збігалися (рис. 8).

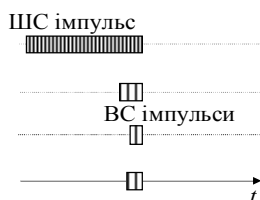


Рис. 8. Збігання моментів закінчення імпульсів

У цьому випадку, можлива взаємна перешкода від ширококугової РЛС локалізується тільки на дальній границі зони виявлення вузькосмугової РЛС.

Часова регламентація ширококугових випромінювань, як надзвичайний захід, припускає повну заборону ширококугових випромінювань у певні моменти часу, коли є небезпека постановки взаємних перешкод РЕС із більше високим пріоритетом.

Висновок

Показано принципову можливість забезпечення ЕМС ширококугових РЛС з вузькосмуговими за рахунок використання адаптивного керування потужністю ширококугового випромінювання залежно від напрямку зондування та поточної електромагнітної обстановки. Проаналізовано додаткові фактори, що сприяють забезпеченню ЕМС таких РЛС. Серед останніх особливо виділяються фактори, пов'язані зі зменшенням часу ширококугового випромінювання за рахунок його комбінування з вузькосмуговим, а також часовою синхронізацією зондувальних сигналів ширококугової й вузькосмугової РЛС. Наведено приклади оцінки ЕМС ширококугових РЛС із вузькосмугової РЛС, що має вищий пріоритет, на основі адаптивного керування потужністю, а також комбінованого використання ширококугових й вузькосмугових зондувальних сигналів в оглядових РЛС.

Спільне використання методів забезпечення ЕМС, пов'язаних з адаптацією до просторового розташування РЛС, обмеженням часу ширококугово-

го випромінювання та часовою синхронізацією випромінювань, може в принципі звести до мінімуму вплив, що заважає, ширококугових РЛС на існуючі вузькосмугові. Таким чином, обмеження на використання ширококугових зондувальних сигналів у радіолокації носять скоріше не принциповий, а технічний характер. Оскільки адаптивні методи забезпечення ЕМС ширококугових та вузькосмугових РЛС у літературі дотепер не розглядалися, ілюстрація можливості забезпечення їх ЕМС повинне супроводжуватися більше докладним моделюванням та експериментальною перевіркою.

Автор висловлює подяку професорові Я.Д. Ширману за корисне обговорення статті.

Література

1. Орленко В.М. Методика оцінки електромагнітної сумісності ширококугових РЛС без використання методів адаптації // СВТ. – 2007. – 2 (10). – С. 3-11.
2. Петровский В.И., Седельников Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учебн. пос. для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
3. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. – М.: Сов. радио, 1974. – 228 с.
4. Электронные системы, основы построения и теория: Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 328 с.
5. Cristina Carmona Duarte et. al. CWLFM Radar for Ship Detection and Identification // IEEE A&E Systems Magazine, February, 2007. – С. 35-45.
6. Computer Simulation of Radar Target Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / Ya.D. Shirman (ed.), Artech House, 2002.
7. Skolnik M, Linde G., Meads K. Senrad: An Advanced Wideband Air-Surveillance Radar // IEEE Trans. AES-37. – 2001. – No. 4. – P. 33-39.

Надійшла до редакції 6.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Сєдишев, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.