

УДК. 621.396.96

В.М. Орленко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ РЛС БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ

Коротко розглядаються методи забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) широкосмугових РЛС, не адаптивних до електромагнітної обстановки з вузькосмуговими, а також аналізуються можливі методи забезпечення їх ЕМС при розширенні спектра частот зондувальних сигналів.

широкосмугові та надширокосмугові сигнали, методика оцінки ЕМС, міжнародні обмеження широкосмугових випромінювань

Вступ

Проблема забезпечення ЕМС різних вузькосмугових систем докладно розглядалася в [1 – 4]. Широко використовуване в експериментах розширення спектра частот зондувальних сигналів у РЛС дозволяє значно підвищити їх інформаційні можливості [5 – 9], особливо по відношенню до розпізнавання цілей, селекції хибних цілей і захисту від імітувальних та маскувальних завад.

Однак одночасно таке розширення спектра може ускладнювати забезпечення ЕМС РЛС із розширеним спектром частот з існуючими вузькосмуговими. Сформовані на сьогодні методи неадаптивного до електромагнітної обстановки забезпечення ЕМС стосовно до вузькосмугових РЛС, а також до інших активних і пасивних радіоелектронних засобів (РЕС), не містять рекомендацій з заходів забезпечення ЕМС РЕС із розширеним спектром частот зондувальних сигналів. Відзначимо, що як широкосмугові сигнали тут розглядаються сигнали із внутрішньоімпульсною модуляцією, широкосмугове зондування короткими імпульсами не розглядається, оскільки аналіз виконується стосовно до типових оглядових РЛС із дальностями виявлення літаків близько 400 км.

Загальним принципом забезпечення ЕМС РЕС різного призначення є створення умов, при яких їх сигнали наближаються до ортогональних. Ортогональність сигналів вузькосмугових РЕС може досягатися за рахунок часового, просторового (на місцевості) їх розносу при обмеженні випромінюваних потужностей, а також за рахунок розносу їх сигналів за кутами, поляризацією або частотою [1]. Рознос випромінювань різних засобів по частоті є основним у забезпеченні ЕМС, інші способи, пов'язані із просторовим і поляризаційним розносом відіграють в основному допоміжну роль.

Найважливішим технічним фактором, що забезпечує ЕМС існуючих вузькосмугових РЛС, є забезпечення в них низького рівня побічних і позас-

мугових випромінювань. Жорстке обмеження цього рівня обумовлено високими імпульсними потужностями вузькосмугових зондувальних сигналів.

Розподіл частотних діапазонів між засобами різного призначення закріплено міжнародним регламентом радіозв'язку. Однак зростаюча щільність джерел випромінювань, недосконалість передавальної й приймальної апаратур та обмежений діапазон радіочастот утрудняє забезпечення ЕМС навіть при використанні комплексу організаційних і технічних заходів.

При використанні широкосмугових зондувальних сигналів рознос за частотою може замінитися ортогоналізацією законів їх модуляції при одночасному обмеженні випромінюваних потужностей. При цьому широкосмугові зондувальні сигнали близько розташованих РЛС можуть займати ті самі ділянки спектра частот.

Питання, пов'язані з особливостями забезпечення електромагнітної сумісності широкосмугових і вузькосмугових РЕС, мають потребу в кількісному аналізі й подальшому розвитку.

Прикладом зусиль, спрямованих у цьому напрямку може служити розробка у США поправок до закону про використання радіочастот, основним завданням яких є впорядкування використання широкосмугових і надширокосмугових сигналів у РЕС, що активно розвиваються та мають нові застосування в армії, поліції, геології, медицині та ін. [9], хоча коло додатків, розглянутих у [9], стосується тільки РЕС з малими випромінюваними потужностями.

Метою цієї статті є розробка методики аналізу електромагнітної сумісності широкосмугових РЛС при врахуванні методів аналізу ЕМС вузькосмугових РЕС [1 – 4], а також прийнятих у США обмежень на рівні надширокосмугових випромінювань РЕС різного призначення [9].

1. Документи США, що регламентують випромінювання надширокосмугових сигналів

Основним документом, що регламентує використання спектра радіочастот від 9 кгц до 3000 ГГц, є Міжнародний Регламент радіозв'язку. Згідно з цим Регламентом, досить повно відбитим у [9], для держав, розташованих на території колишнього Радянського Союзу, дозволені для радіолокації ділянки частот у різних діапазонах становлять: 185 МГц у L діапазоні (23 см), 200 МГц і 900 МГц у S діапазоні (12,5 см і 9,5 см відповідно), 600 МГц у C діапазоні (5,4 см), 2100 МГц у X діапазоні (3,1 см), 600 МГц та 2000 МГц у Ku діапазоні (2,1 см й 1,8 см відповідно). Довжини хвиль, зазначені в дужках, відповідають середнім частотам діапазонів. У цих же діапазонах дозволено працювати й РЕС іншого призначення, але з нижчим пріоритетом і за умови, що вони не будуть створювати перешкод радіолокаторам.

Обмеженість радіочастотного спектра й бурхливий розвиток комерційних радіолокаційних технологій для використання на малих та надмалих дальностях в інтересах підтримки армійських і поліцейських операцій, розмінування районів бойових дій, систем запобігання зіткненням транспортних засобів, геологорозвідувальних робіт та ін. привело до перегляду деяких вимог Регламенту радіозв'язку у США. З цією метою у 2002 р. у Пункт 15 розділу 47 Федерального закону США, що регламентує використання радіочастотного спектра, був внесений параграф F [9], що дозволяє використання надширококуосмугових випромінювань на безліцензійній основі (тобто не потребують одержання спеціальних дозволів на використання частот).

У [9] дане також визначення надширококуосмугових радіопристроїв. До надширококуосмугових віднесені засоби, які мають відношення ширини спектра до несучої більше ніж 0,2 або абсолютну ширину спектра не менш 500 МГц. Ширина спектра вимірюється в цьому випадку за рівнем 0,1 (-10 dB) від максимального рівня випромінювання.

Використання надширококуосмугових сигналів поки обмежене в [9] такими пристроями:

- підповерхневими радіолокаторами;
- системами бачення в стінах і крізь стіни;
- сторожовими системами для охорони периметрів наземних об'єктів;
- медичними системами одержання зображень;
- радіолокаційними системами транспортних засобів.

Електромагнітна сумісність зазначених надширококуосмугових систем забезпечується обмеженням спектральної густини потужності випромінюваних сигналів. Як контрольний параметр у [9] задається еквівалентна потужність ізотропного випромінювача (ЕПІВ) у децибелах стосовно 1 Вт (dBW), що припадає на одиничну смугу частот в 1 МГц у будь-

якому напрямку. Максимум її визначається як добуток підведеної до антени потужності на коефіцієнт її посилення. Вимір зазначеної величини здійснюється на відстані порядку 3 м від випромінювача за допомогою спектроаналізатора із частотним розрізненням 1 МГц, підключеного до виходу детектору-інтегратора. Результати виміру усереднюються на часовому інтервалі не більше 1 мс. Нижче наводяться максимальні дозволені рівні випромінювань для надширококуосмугових РЕС різного призначення.

Спектр надширококуосмугових сигналів (за рівнем -10 дБ) для підповерхневих радіолокаторів і систем бачення в стінах не повинен виходити за верхню межу 10.6 ГГц, а спектральна густина потужності випромінювання, або ЕПІВ на 1 МГц, не повинна перевищувати величин, наведених у табл. 1.

Для систем бачення крізь стіни спектр сигналів повинен задовольняти одну із двох наведених нижче умов:

1) спектр не повинен виходити за верхню межу у 960 МГц;

2) середня частота спектра й частота максимуму випромінювання повинна перебувати в межах від 1990 МГц до 10600 МГц.

У першому випадку ЕПІВ не повинна перевищувати значень, наведених у табл. 2. У другому випадку ЕПІВ не повинна перевищувати величин, наведених у табл. 3.

Таблиця 1
Обмеження випромінювань підповерхневих локаторів

Частота, МГц	ЕПІВ, dBW
960-1610	-95,3
1610-1990	-83,3
1990-3100	-81,3
3100-10600	-71,3
Понад 10600	-81,3

Таблиця 2
Обмеження випромінювань для систем бачення крізь стіни

Частота, МГц	ЕПІВ, dBW
960-1610	-95,3
1610-1990	-83,3
Понад 1990	-81,3

Таблиця 3
Обмеження випромінювань для систем бачення крізь стіни

Частота, МГц	ЕПІВ, dBW
960-1610	-76,3
1610-10600	-71,3
Понад 10600	-81,3

Для систем охорони периметрів спектр сигналів повинен перебувати в межах від 1990 МГц до 10600 МГц, а ЕПІВ не повинна перевищувати величин, наведених у табл. 4.

Для медичних систем одержання зображень спектр надширокосмугових сигналів повинен перебувати в межах між 3100 МГц і 10600 МГц, а ЕПВ на 1 МГц не повинна перевищувати величин, наведених у табл. 5.

Таблиця 4

Обмеження випромінювань
для систем охорони периметрів

Частота, МГц	ЕПВ, dBW
960-1610	-83,3
1610-1990	-81,3
1990-10600	-71,3
Понад 10600	-81,3

Таблиця 5

Обмеження випромінювань для медичних систем

Частота, МГц	ЕПВ, dBW
960-1610	-95,3
1610-1990	-83,3
1990-3100	-81,3
3100-10600	-71,3
Понад 10600	-81,3

Таблиця 6

Обмеження випромінювань
для радіолокаторів транспортних засобів

Частота, МГц	ЕПВ, dBW
960-1610	-105,3
1610-22000	-91,3
22000-29000	-71,3
29000-31000	-81,3
Понад 31000	-91,3

Для радіолокаційних систем транспортних засобів спектр сигналів повинен бути у межах від 22 ГГц до 29 ГГц, а середня частота спектра й частота максимуму випромінювання повинні бути вище ніж 24,075 ГГц, і ЕПВ не повинна перевищувати рівнів, наведених у табл. 6. У частотному діапазоні 23,6-24,0 ГГц необхідно також забезпечити додаткове ослаблення на -25 дБ сигналу, випромінюваного вище 38° (від горизонталі для виключення завад супутниковим навігаційним системам).

Перелічені вимоги у [9] наводяться без обґрунтувань. Крім того, вказується, що вони є дуже жорсткими та, як наслідок, по мірі накопичення досвіду експлуатації СШП систем, ці вимоги можуть бути послаблені.

2. Методика аналізу ЕМС надширокосмугових та вузькосмугових РЛС

В основі існуючих методів пред'явлення вимог до рівнів випромінювань, що заважають, лежить т.зв. імовірність якісного прийому корисного сигналу на фоні випромінювань, що заважають. Цю імовірність звичайно задають на рівні 0,95... 0,99 [1]. За

заданою імовірністю якісного прийому визначають мінімальне відношення сигнал (що заважає) – шум, при якому можливо забезпечити зазначену ймовірність якісного прийому. Максимально припустимий рівень випромінювань, що заважають, визначається при завданні т.зв. мінімального гарантованого рівня корисного сигналу.

Потужність сигналу, що заважає, на виході приймального пристрою знаходять із використанням рівняння радіозв'язку. Рівняння радіозв'язку при цьому записують стосовно до спектральної щільності потужності сигналу, що заважає [2], яку потім інтегрують у діапазоні частот, в якому спостерігається найбільший взаємний вплив випромінювань сусідніх РЕС. Апроксимації енергетичного спектра випромінюваного сигналу, частотних характеристик приймального пристрою та антенних систем, а також частотні залежності величин загасання в середовищі поширення та антенно-фідерних трактах задаються моделями, що мають різні ступені точності.

Характеристики широкосмугових зондувальних сигналів щодо РЛС кругового огляду будемо відбирати також приблизно на основі рівняння радіолокації.

Для аналізу особливостей забезпечення ЕМС широкосмугових та вузькосмугових РЕС обмежимося тут найбільш простими прямокутними апроксимаціями енергетичних спектрів випромінювань, а також характеристик частотної вибіркової приймальних пристроїв. Це пов'язано, насамперед, з необхідністю зниження впливу, що заважає, основного випромінювання широкосмугових РЕС на сусідні засоби. Тому нижче обмежимося аналізом енергетичних співвідношень ЕМС широкосмугових засобів в основній смузі частот їх випромінювань.

Оскільки вплив побічних випромінювань, що заважає, позначається при безпосередньому їх потрапленні на вхід приймальних пристроїв сусідніх РЕС, задамося максимальним припустимим відношенням корисного сигналу у вигляді сигналу з випадковою початковою фазою до випромінювання, що заважає. При цьому для ймовірності якісного прийому 0,95 одержимо максимально припустиме відношення p корисного сигналу, рівне 20 (або 13 дБ) [1], до випромінювання, що заважає.

Прив'язка рівнів випромінювань, що заважають, до рівня корисного сигналу, однак, не завжди зручна при аналізі взаємного впливу, що заважає, РЕС різного призначення. Це стосується, наприклад, радіолокаційних і зв'язних систем, які можуть функціонувати при не дуже високих відношеннях сигнал-завад порядку 15...20 дБ. За такої умови рівень випромінювання, що заважає, може опинитися на рівні власних шумів приймального пристрою або навіть перевищувати його, що може значно обмежити дальність їх дії.

Будемо приблизно вважати вплив широко-смугового сигналу, що заважає, еквівалентним підвищенню рівня шуму, що зменшує відношення корисний сигнал-завад p в $1/(1+v)$ раз, де v – відношення потужності випромінювання, що заважає, до шуму. Для систем радіозв'язку зменшення дальності дії R_{int} за рахунок додавання сигналу, що заважає, у порівнянні з випадком відсутності сигналу, що заважає, R складе

$$R_{int}/R = 1/\sqrt{1+v} \quad (1)$$

Для систем радіолокації аналогічне зменшення дальності дії складе

$$R_{int}/R = 1/\sqrt[4]{1+v} \quad (2)$$

Якщо покласти припустимим можливе зменшення дальності дії на 10%, то для систем радіозв'язку, згідно з (1), це буде відповідати припустимому відношенню сигнал (що заважає) – шум $v=0,23$ (-6,4 dB), а для систем радіолокації, згідно з (2), $v=0,52$ (-2,8 dB). Для систем радіолокації величина відношення сигнал (що заважає) – шум $v=0,23$ (-6,4 dB) відповідає зменшенню дальності дії приблизно на 5%.

Нижче в розд. 2,1 проаналізуємо можливий вплив, що заважає, надшироко-смугових випромінювань, розглянутих у розд. 1, на вузькосмугові РЕС, грунтуючись на розраховані вище максимально припустимих відношення сигнал (що заважає) – шум.

У розд. 2,2 аналогічно докладно проаналізуємо можливий вплив, що заважає, випромінювань оглядової РЛС із розширеним спектром зондувального сигналу на типові вузькосмугові оглядові РЛС. Стисло також торкнемося питання про взаємний вплив, що заважає, випромінювань широко-смугових РЛС.

У розд. 2,3 демонструється працездатність пропонованого підходу до оцінки ЕМС широко-смугових РЕС на прикладі аналізу впливу, що заважає, позасмугових і паразитних випромінювань однієї вузькосмугової оглядової РЛС на іншу.

2.1. Аналіз рівнів надшироко-смугового випромінювання, дозволених у США

Для аналізу ступеня впливу рівнів надшироко-смугових випромінювань (табл. 1 – табл. 6) на вузькосмугові системи розглянемо рівняння дальності радіозв'язку в логарифмічному вигляді

$$(R)_{dBm} = \frac{1}{2} [(E_{tr})_{dBj} - (E_{rec.int})_{dBj} + (G_{tr})_{dB} + (A_{rec.int})_{dBm^2} - (L)_{dB}] - 11 \quad (3)$$

Тут $(R)_{dBm} = 10 \lg(R_M)$ – дальність дії в dB відносно дальності в 1 метр;

$(E_{tr})_{dBj}$ – енергія переданого (transmitted) надшироко-смугового випромінювання, що заважає,

яке потрапляє у смугу пропускання вузькосмугового приймача;

$(E_{rec.int})_{dBj}$ – чутливість приймача (receiver) в одиницях (Дж) спектральної щільності потужності випромінювання, що заважає, (interference);

$(G_{tr})_{dB}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

$(A_{rec.int})_{dBm^2}$ – ефективна площа приймальної антени для випромінювання, що заважає;

$(L)_{dB}$ – сумарні втрати на однобічне поширення сигналу в тропосфері.

Оскільки обмеження на рівні випромінювання даються стосовно до спектральної щільності потужності, видозмінимо рівняння (3)

$$(R)_{dBm} = \frac{1}{2} \left[(N_{tr})_{dBj} + (\Pi_{rec.int})_{dBHz} + (\tau_{rec.int})_{dBs} - (E_{rec.int})_{dBj} + (G_{tr})_{dB} + (A_{rec.int})_{dBm^2} - (L)_{dB} \right] - 11 \quad (4)$$

Тут $(N_{tr})_{dBj}$ – спектральна щільність потужності надшироко-смугового випромінювання;

$(\Pi_{rec.int})_{dBHz}$ – смуга пропускання вузькосмугового приймача у dB відносно 1 Гц;

$(\tau_{rec.int})_{dBs}$ – час інтегрування випромінювання, що заважає, приймачем у dB відносно 1 сек.

Чутливість радіоприймального пристрою щодо спектральній щільності потужності власних шумів прийому визначається у вигляді [10]

$$E_{rec} = vN_0 = vkT_s \quad (5)$$

Тут k – постійна Больцмана, $T_s = T_a + T_r + L_r T_e$ – сумарна шумова температура приймального пристрою, що складається із шумової температури антени T_a , шумової температури T_r , обумовленої втратами L_r на опорі лінії передачі сигналу від антени до приймача, і шумової температури приймача T_e ; v – відношення сигнал-шум.

Шумова температура антени $T_a = 290 + (0,88T'_a - 254)/L_a$ пов'язана із шумовою температурою навколишнього простору T'_a й тепловими втратами в антені L_a . Температура, обумовлена втратами в тракті, має вигляд $T_r = T_0(L_r - 1)$. Внутрішні шуми приймача описуються його шумовою (noise) температурою $T_e = T_0(K_n - 1)$, де T_0 – стандартна температура; K_n – коефіцієнт шуму приймача.

Заданося величинами втрат в антені і в антенно-фідерному тракті $L_a = 0,2$ dB $L_r = 1$ dB відповідно. Коефіцієнт шуму $K_n = 5$ dB, шумова температура простору згідно [10] для РЛС, що працює на

частоті 3 ГГц з антеною, спрямованою паралельно до землі, $T_a' = 95 \text{ К}$. З урахуванням перелічених даних, спектральна щільність потужності власних шумів приймача складе $N_0 = 1,37 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}$. Можливе зменшення впливу, що заважає, короткоімпульсного надширокосмугового випромінювання за рахунок його усереднення на інтервалі 1 мс, а також його атмосферне поглинання тут не враховується.

На рис. 1 наводяться криві дальності, починаючи з якої зазначені випромінювання мають припустимий вплив, що заважає, на засоби радіозв'язку (пунктирні лінії відповідають $\nu = 0,23$) і радіолокації (суцільні лінії відповідають $\nu = 0,52$), залежно від спектральної щільності потужності надширокосмугового випромінювання для ізотропної передавальної антени ($G_{tr0} = 0 \text{ дБ}$), при прийомі сигналу, що заважає, антеною з ефективною площею 1 м^2 і 10 м^2 , тобто $(A_{rec.int0})_{\text{дБм}^2} = 0 \text{ дБ}, 10 \text{ дБ}$ у вузькій смузі частот 1 МГц при часі його когерентного накопичення 1 мкс.

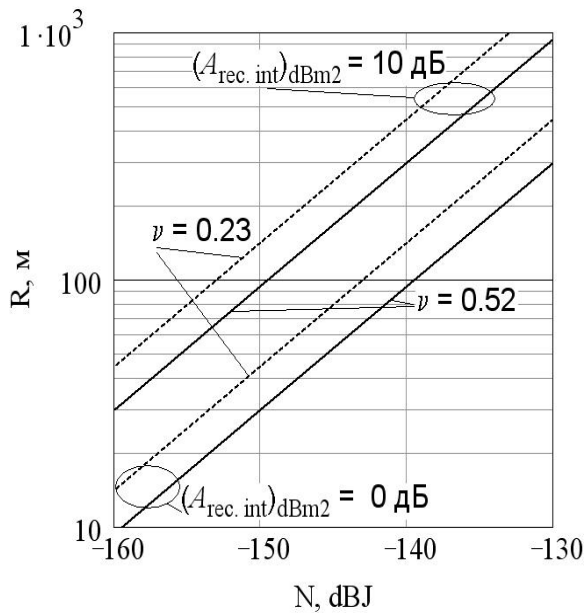


Рис. 1. Залежність дальності прийому сигналу, що заважає, від потужності останнього

Спектральна щільність потужності на рис. 1 змінюється у межах $-160 \dots -130 \text{ дБ}$, що відповідає зміні ЕПВ у межах $-100 \dots -70 \text{ дБВ}$ на 1 МГц (табл. 1 – табл. 6).

Видно, що при зазначених обмеженнях на рівні надширокосмугових випромінювань їх вплив, що заважає, навіть у вільному просторі на вузькосмугові РЕС залежно від частотного діапазону обмежується радіусом від декількох метрів до 1,5 кілометрів. Самі "м'які" обмеження накладаються згідно з табл. 3 на рівні випромінювань систем бачення в стінах і крізь стіни, однак у більшості випадків їхнє функціонування

на відкритій місцевості істотно обмежується.

2.2. Аналіз впливу, що заважає, випромінювань широкосмугових РЛС на вузькосмугові та широкосмугові

Для зручності аналізу, у рівнянні радіозв'язку виділимо імпульсну потужність $(P_{tr})_{\text{дБВ}}$ і ширину спектра Π_{tr} зондувального сигналу (що заважає), а також смугу пропускання вузькосмугового приймача $\Pi_{rec.int}$

$$(R)_{\text{дБм}} = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} &(P_{tr})_{\text{дБВ}} - (\Pi_{tr} / \Pi_{rec.int})_{\text{дБ}} + \\ &+ (\tau_{rec.int})_{\text{дБс}} - (E_{rec.int})_{\text{дБДж}} + \\ &+ (G_{tr})_{\text{дБ}} + (A_{rec.int})_{\text{дБм}^2} - (L)_{\text{дБ}} \end{aligned} \right] - 11. \quad (6)$$

Для оцінки впливу, що заважає, широкосмугової РЛС на вузькосмугову у вільному просторі разом з рівнянням радіозв'язку (4) розглянемо рівняння радіолокації

$$(R_{radar})_{\text{дБм}} = \frac{1}{4} \left[\begin{aligned} &(P_{tr})_{\text{дБВ}} + (\tau_{tr})_{\text{дБс}} - \\ &- (E_{rec.min})_{\text{дБДж}} + \\ &+ (G_{tr})_{\text{дБ}} + (A_{rec})_{\text{дБм}^2} + \\ &+ (\sigma_{tg})_{\text{дБм}^2} - (L_{rad})_{\text{дБ}} \end{aligned} \right] - 5,5. \quad (7)$$

Тут $(P_{tr})_{\text{дБВ}}$ – імпульсна потужність зондувального сигналу в дБ відносно 1 Вт; $(E_{rec.min})_{\text{дБДж}}$ – мінімальна енергія прийому відбитого сигналу у дБ відносно 1 Дж; $(\sigma_{tg})_{\text{дБм}^2}$ – середня ЕПР цілей, що виявляють, в дБ відносно 1 м^2 ; $(A_{rec})_{\text{дБм}^2}$ – ефективна площа приймальної антени РЛС; $(L_{rad})_{\text{дБ}}$ – сумарні втрати на двостороннє поширення сигналу в тропосфері і його обробці в радіолокаційному приймачі.

Параметри широкосмугового зондування будемо вибирати, виходячи із забезпечення необхідної дальності локації згідно з рівнянням радіолокації, а вплив, що заважає, широкосмугового випромінювання на вузькосмугову РЛС у вільному просторі будемо оцінювати, підставляючи параметри зондування й прийому до рівняння радіозв'язку.

Для несучих частот до 10 ГГц, коли згасання радіохвиль не дуже велике, будемо зневажати залежністю величини втрат на поглинання в атмосфері від дальності, підставляючи максимальну величину втрат, розраховуючи на поширення через всю товщу тропосфери при нульовому куті місця ДН антени.

Для робочих частот РЛС понад 20 ГГц, дальністю залежністю втрат радіосигналу в атмосфері зневажити не можна, і рівняння (6) та (7) стають трансцендентними. Їх розв'язання зручно одержува-

ти в неявному вигляді

$$2[(R)_{dBm} + 11] - (P_{tr})_{dBW} + (\Pi_{tr} / \Pi_{rec.int})_{dB} - (\tau_{rec.int})_{dBs} + (E_{rec.int})_{dBj} - (G_{tr})_{dB} - (A_{rec.int})_{dBm^2} + [L(R)]_{dB} = 0. \quad (8)$$

$$4[(R_{radar})_{dBm} + 5,5] - (P_{tr})_{dBW} - (\tau_{tr})_{dBs} + (E_{rec.min})_{dBj} - (G_{tr})_{dB} - (A_{rec})_{dBm^2} - (\sigma_{tg})_{dBm^2} + [L_{rad}(R_{radar})]_{dB} = 0. \quad (9)$$

Для апроксимації дальнісної залежності величини втрат на поширення в атмосфері без урахування опадів скористаємося такими виразами [10]

$$L_{rad}(R_{radar}, \theta) = k_{\alpha} R_{\alpha} [1 - \exp\{-R_{radar}/R_{\alpha}\}] \text{ (dB);} \quad (10)$$

$$R_{\alpha} = 3000 / \sin\left(\theta + \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{\theta + 0,028}\right) \text{ (m).}$$

Тут k_{α} – коефіцієнт поглинання при двосторонньому поширенні на рівні моря dB/km, R_{α} – ефективна товщина тропосфери залежно від кута місця зондування при розташуванні РЛС на рівні моря. Для сигналу з довжиною хвилі 10 см величина k_{α} становить 0,015 dB/km, для сигналу з довжиною хвилі 1 см величина k_{α} становить приблизно 0,2 dB/km.

Будемо приблизно вважати, що ЕМС близько розташованих РЛС забезпечується, якщо дальність впливу, що заважає, зондувального сигналу відповідно до рівняння радіозв'язку (6) не перевищує дальності локації згідно з (7).

Як параметри РЛС підставимо параметри типової оглядової РЛС, замінивши вузькосмуговий зондувальний сигнал широкосмуговим. Сукупність параметрів РЛС зведена в табл. 7. Сукупність параметрів прийому широкосмугового випромінювання, що заважає, у вузькосмуговій РЛС зведені в табл. 8.

При аналізі взаємного впливу, що заважає, двох РЛС будемо вважати, що взаємна перешкода (сигнал, що заважає) не випромінюється по основному пелюстку передавальної антени, а тільки по бічним. Прийом же його може здійснюватися як бічними, так й основним пелюстком прийомної антени.

Граничний сигнал виявлення на пачку для широкосмугової РЛС обраний трохи меншим, ніж для типової вузькосмугової РЛС, когерентне накопичення пачки відбитих імпульсів замінено некогерентним накопиченням 5-ти відбитих імпульсів. При такому виборі параметрів характеристики виявлення літаків широкосмугової РЛС будуть приблизно еквівалентні характеристикам виявлення вузькосмуго-

вої РЛС [11].

Таблиця 7

Параметри широкосмугових випромінювань РЛС

Параметр	Значення
Імпульсна потужність зондувального сигналу, квт; dBW	до 10
Тривалість зондувального імпульсу, мкс	250
Ширина спектра зондувального імпульсу, МГц	250
Рівень власних шумів прийому, Вт/Гц	$1,37 \cdot 10^{-20}$
Розмір передавальної антени, ширина × висота, м	$5 \times 2,5$
Розмір приймальної антени, ширина × висота, м	5×4
Робоча довжина хвилі, м	0,1
ЕПР цілі, м ²	3
Мінімальне відношення сигнал-шум для виявлення на пачку, dB	13
Кількість імпульсів, що накопичують некогерентно	5
Втрати сигналу за рахунок поширення і його обробки в приймачі, dB	10
Рівень бічних пелюсток ДН антени на передачу, dB:	
– ближніх,	-25
– далеких	-45

Таблиця 8

Параметри прийому сигналу, що заважає

Параметр	Значення
Час когерентного накопичення випромінювання, що заважає, мкс	1
Рівень власних шумів прийому, Вт/Гц	$1,37 \cdot 10^{-20}$
Смуга пропускання на прийом для випромінювання, що заважає, МГц	1
Припустиме відношення сигнал-шум, що заважає, dB	-2,8
Розмір приймальної антени, ширина × висота, м	5×4
Ослаблення випромінювання, що заважає, бічними пелюстками ДН антени на прийом, dB	-25; – ближніми, – далекими
Втрати на поширення сигналу в одному напрямку, dB	2,6

На рис. 2 а, б суцільними лініями показані залежності (7) дальності радіолокації (суцільні лінії), а пунктирними лініями показані залежності дальності прийому випромінювання, що заважає (пунктирні лінії), розраховані відповідно до рівняння радіозв'язку (6) від потужності випромінювання, що заважає, вираженої в dB. Випромінювання сигналу, що заважає, здійснюється по ближніх бічних пелюстках (рис. 2, а) і по далеких бічних пелюстках (рис. 2, б) передавальної діаграми спрямованості (ДН) антени.

Прийом сигналу, що заважає, здійснюється основною пелюсткою (ОП), ближніми (ББП) і далекими (ДБП) пелюстками приймальної ДН антени.

При заданих параметрах ширококутового зондувального сигналу висока спектральна щільність потужності зондувального сигналу не дозволяє забезпечити ЕМС ширококулової та вузькосмугової РЛС на дальностях більше 200 км, якщо він випромінюється у напрямку вузькосмугової РЛС по ближніх бічних пелюстках.

У випадку ж коли ширококуловий зондувальний сигнал і випромінюється й приймається як такий, що заважає, по далеких бічних пелюстках, його ослаблення виявляється достатнім для забезпечення ЕМС ширококулової та вузькосмугової РЛС.

Аналіз рівнянь (6) і (7) і кривих рис. 2 показує, що основними факторами зменшення впливу, що заважає, ширококулового випромінювання на вузькосмугові засоби є зменшення імпульсної потужності тривалого ширококулового сигналу, пропорційне відношенню тривалості ширококулового зондувального сигналу до тривалості когерентного накопичення у вузькосмуговому приймачі, а також додаткове зниження спектральної щільності потужності ширококулового випромінювання, пропорційне відношенню ширини спектра ширококулового зондувального сигналу до смуги пропускання вузькосмугового приймача.

При одночасному функціонуванні ширококулових РЛС в одній і тій же смузі частот зменшення взаємного впливу, що заважає, ширококулових РЛС одна на одну досягається шляхом істотної неузгодженості законів модуляції їх зондувальних сигналів.

Ослаблення ширококулового сигналу, що заважає, також як і у випадку його ослаблення у вузькосмуговому приймачі, пропорційно базі ширококулового сигналу. Для шумоподібного зондувального сигналу з добутком смуги на тривалість 10^4 , максимальне ослаблення в "несвоєму" ширококуловому приймачеві складе величину порядку 40 дБ. Такого ослаблення буде недостатньо, у загальному випадку, для забезпечення ЕМС ширококулових РЛС.

Однак, як і в попередньому випадку, при його сполученні з ослабленням по бічних пелюстках на передачу й прийом (рис. 2, б) ослаблення порядку 40 дБ цілком достатньо для забезпечення ЕМС у більшості практичних ситуацій.

Забезпечення ЕМС ширококулових РЛС із меншими дальностями дії в кілька десятків кілометрів, що працюють на більш коротких хвилях, може бути додатково полегшене за рахунок більшого згасання радіохвиль за рахунок поглинання їх енергії в атмосфері.

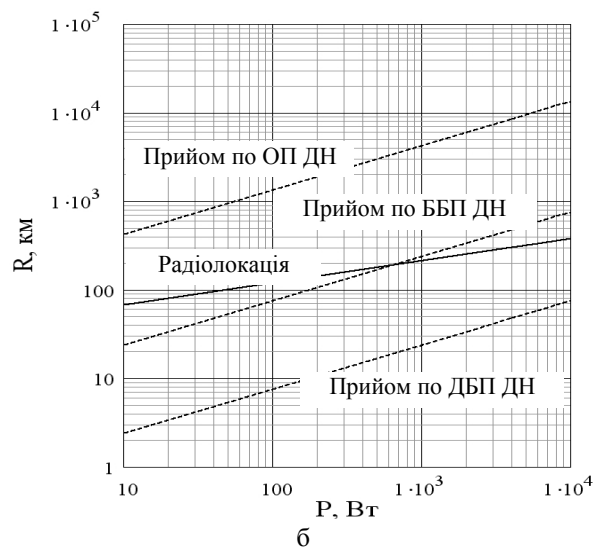
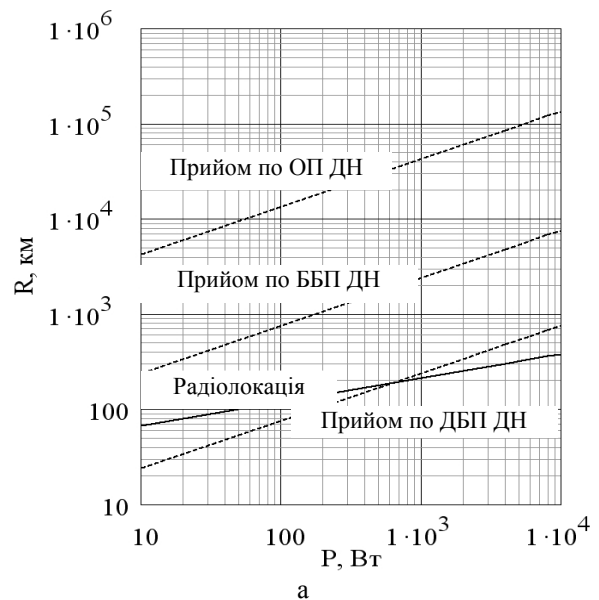


Рис. 2. Порівняння дальностей локації та прийому сигналу, що заважає, при випромінюванні останнього:
а – за ближніми;
б – та далекими бічними пелюстками

2.3. Аналіз взаємного впливу, що заважає, позасмугових і побічних випромінювань вузькосмугових РЛС

Для порівняння можливості забезпечення ЕМС ширококулових РЛС та існуючих вузькосмугових РЛС стосовно рівнів позасмугових і сторонніх випромінювань скористуємося наведеною вище методикою. Припустимі рівні x і сторонніх випромінювань для наземних РЕС різного призначення залежать від їх потужності. Для РЕС із середньою потужністю випромінювання порядку 10 кВт, що працюють на частотах до 960 МГц, їх припустимий рівень становить -65 дБ від максимуму основного випромінювання [1].

Параметри типової вузькосмугової РЛС перелічені в табл. 9. Параметри ослаблення позасмугового стороннього випромінювання, що забезпечують ЕМС, наведені в табл. 10.

Таблиця 9

Параметри вузькосмугових випромінювань типової РЛС

Параметр	Значення
Імпульсна потужність зондувального сигналу, кВт	до 400
Тривалість зондувального імпульсу, мкс	10
Частота проходження імпульсів, Гц	1000
Ширина спектра зондувального імпульсу, МГц	1
Рівень власних шумів прийому, Вт/Гц	$1.37 \cdot 10^{-20}$
Розмір передавальної антени, ширина \times висота, м	5×2.5
Розмір приймальної антени, ширина \times висота, м	5×4
Робоча довжина хвилі, м	0.1
ЕПР цілі, м ²	1
Мінімальне відношення сигнал-шум для виявлення на пачку, dB	15
Кількість імпульсів, що накопичують когерентно	12
Втрати сигналу за рахунок двостороннього поширення в тропосфері і його обробки в приймачі, dB	12
Рівень бічних пелюсток антени на передачу, dB:	
– ближніх,	-25
– далеких	-45

Таблиця 10

Параметри прийому сигналу, що заважає.

Параметр	Значення
Втрати на поширення сигналу в одному напрямку, dB	2,6
Припустиме перевищення випромінювання, що заважає, над рівнем власного шуму на виході приймача, dB	-2,8
Максимальний рівень позаслужового й побічного випромінювання, dB	-65
Ослаблення випромінювання, що заважає, бічними пелюстками на прийом, dB	
– ближніми,	-25;
– далекими	-45

На рис. 3, а, б наводяться залежності дальності локації (суцільні лінії) і можливого впливу, що заважає, позаслужового та стороннього випромінювання такої РЛС на сусідні станції (пунктирні лінії). Випромінювання сигналу, що заважає, у напрямку сусідньої станції здійснюється по ближніх бічних пелюстках (рис. 3, а) і по далеких бічних пелюстках (рис. 3, б) передавальної ДН антени. Його прийом

здійснюється основною пелюсткою (ОП) діаграми спрямованості (ДН), а також ближніми (ББП) і далекими (ДБП) бічними пелюстками ДН приймальної антени.

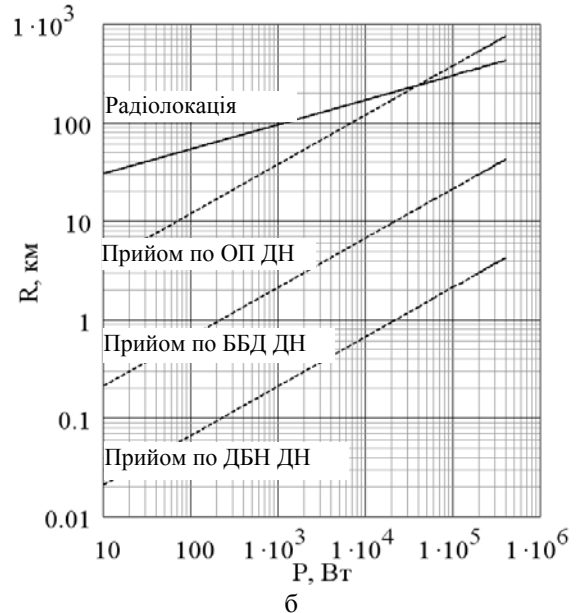
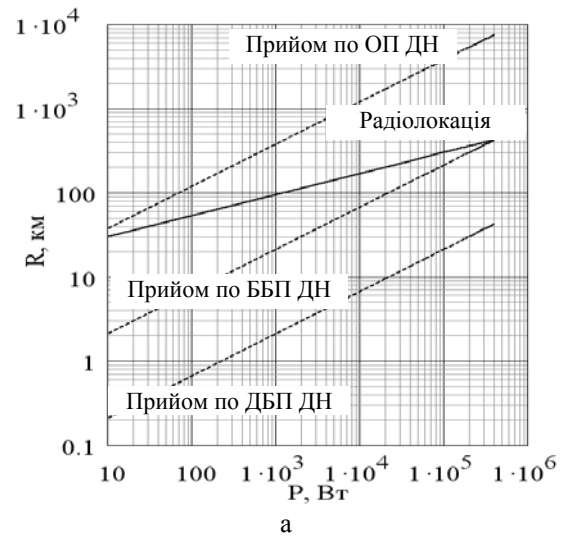


Рис. 3. Порівняння дальностей локації та прийому сигналу, що заважає, при випромінюванні останнього:

- а – за близькими;
- б – далекими бічними пелюстками

Вимога ослаблення позаслужового й паразитного випромінювання до -65 dB у вузькосмуговій оглядовій РЛС дозволяє в основному забезпечувати розв'язку сусідніх РЛС у ситуаціях, коли випромінювання сигналів, що заважають, у напрямку сусідньої станції і його прийом здійснюється по бічних пелюстках. Вплив, що заважає, позаслужових і побічних випромінювань при їх прийомі по основній пелюстці ДН антени компенсується короткочасністю знаходження їх джерела в головній пелюстці.

З порівняння рис. 2 та рис. 3 видно, що забезпечення ЕМС широкосмугових РЛС із дальностями в кілька сотень кілометрів являє собою більше скла-

дне завдання, ніж забезпечення ЕМС аналогічних вузькосмугових РЛС. Для широкосмугових РЛС малої дальності, що працюють на довжині хвилі близько 1 см, поглинання сигналу водяними парами в атмосфері досягає 20 dB на 100 км, і забезпечення їх ЕМС може значно спростуватися.

Висновок

Аналіз літератури з ЕМС вузькосмугових РЕС [1 – 4] і обмежень [9] на рівні надширокосмугових випромінювань для малопотужних джерел дозволив виробити методику аналізу впливу, що заважає, випромінювань широкосмугових систем на існуючі вузькосмугові.

Аналіз ЕМС вузькосмугових і широкосмугових РЛС показав, що розширення спектра частот зондувального сигналу та збільшення його тривалості, є сприятливими для ЕМС факторами. Перший приводить до зниження спектральної щільності потужності широкосмугового випромінювання, другий - до зниження імпульсної потужності широкосмугового зондувального сигналу.

Однак для РЛС із дальностями дії кілька сотень кілометрів тільки ослаблення дії, що заважає, їх широкосмугових випромінювань за рахунок неузгодженості прийому в сукупності аж до -40 dB часто виявляється недостатнім для забезпечення ЕМС. Останнє приводить до необхідності його сполучення із просторовою селекцією і зменшення рівнів бічних пелюсток ДН антен на передачу.

У цілому, однак, виникають труднощі в неадаптивному забезпеченні ЕМС широкосмугових РЛС. Їх подолання можливо із залученням методів адаптації. Аналіз цих можливостей передбачається провести в окремій статті.

Автор висловлює щире подяку професорові Ширману Я.Д. за обговорення статті й висловлені зауваження й пропозиції, що сприяли її поліпшенню.

Список літератури

1. Князев А.Д. *Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств*. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
2. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / Под ред. Н.М. Царькова*. – М.: Радио и связь, 1985 – 285 с.
3. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: в 3-х вып. / Под ред. Д. Уайта*, 1977-79.
4. *Использование радиочастотного спектра и непреднамеренные помехи / Егоров Е.И., Калашников А.С. и др.* – М.: Радио и связь, 1985.
5. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Издание 2-е переработ. и доп. / Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Малярченко А.С., Леховицкий Д.И., Леценко С.П., Лосев Ю.И., Николаев А.И., Горшков С.А., Москвитин С.В., Орленко В.М. Под ред. Я.Д. Ширмана*. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
6. Skolnik M, Linde G., Meads K. *Senrad: An Advanced Wideband Air-Surveillance Radar*. –IEEE Trans. AES-37, 2001, No. 4.
7. Rosenbach Kh., Schiller J. *Non-Cooperative Air Target Identification using Radar Imagery: Identification Rate as a Function of Signal Bandwidth*. – Radar -2000, Alexandria, VA
8. *Computer Simulation of Radar Target Scattering < Recognition, Detection, and Tracking / Ya.D. Shirman (ed.)*, Artech House, 2003, 480 p.
9. *Electronic Code of Federal Regulations. Title 47 – Telecommunications. Subpart F –Ultra Wideband Operation*. <http://www.gpoaccess.gov/ecfr/>
10. Barton D.K., Leonov S.A. *Radar Technology Encyclopedia*, Artech House, 1998, 680 p.
11. Орленко В.М. *Особенности обнаружения радиолокационных целей при широкой полосе зондирующих сигналов // Прикладная радиоэлектроника*. – 2006. – № 4. – С. 47-49.

Надійшла до редколегії 9.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук проф. Я.Д. Ширман, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.