

місії та їх перебування на робочих орбітах, щоб уникнути впливу різних видів космічної погоди, а також скупчення космічного сміття на конкретних робочих орбітах, на роботу телекомунікаційних систем [2]. Дані про такі скупчення реєструються в каталогах з космічного сміття (NASA, ЄКА, Україна), де визначаються їхні балістичні характеристики: висота апогею та перигею, нахил орбіт, маса, балістичний коефіцієнт, швидкість [4]. Ці дані дають змогу визначати безпечні зони роботи телекомунікаційних систем на орбітах та забезпечувати стабільне поширення сигналу супутникових навігаційних систем.

Висновки

Проведений аналіз впливу космічної погоди та космічного сміття на якість роботи телекомунікаційних систем підтверджує необхідність враховувати ці фактори при визначенні похибок у техніч-

но справній телекомунікаційній системі та умов поширення сигналу супутникової навігації.

Список використаної літератури

1. **Калашник, Г. А.** Забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів / Г. А. Калашник, Д. М. Обідін, М. А. Калашник // Системи обробки інформації.— 2016.— Вип. 3 (140).— С. 52–56.
2. **Фролов, В. Ф.** Екологічна безпека біосфери Землі і Космосу: монографія / В. Ф. Фролов.— ТОВ «НВП Інтерсервіс», 2015.— 220 с.
3. **Власов, М. Н.** Экологическая опасность космической деятельности / М. Н. Власов, С. В. Кричевский.— М.: Наука, 1999.— 238 с.
4. **Техногенное засорение околоземного космического пространства** / [А. П. Алпатов, В. П. Басс, С. А. Баулин и др.].— Днепропетровск, 2012.— 378 с.

Рецензент: доктор техн. наук, професор **К. С. Козелкова**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

С. В. Козелков, В. Ф. Фролов, Л. А. Кирпач

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Проведенный анализ воздействия космической погоды и факторов космического мусора на качество работы телекоммуникационных систем подтверждает гипотезу, что оба фактора необходимо учитывать при обеспечении надежности и достоверности работы этих систем.

Ключевые слова: космическая погода; геомагнитная и солнечная активность; электронная концентрация; телекоммуникационные системы; космический мусор.

S. V. Kozelkov, V. F. Frolov, L. A. Kirpach

ANALYSIS OF SPACE WEATHER IMPACT AND THE SPACE DEBRIS ON QUALITY OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS OPERATION

Performed analysis of the impact of space weather and factors of space debris on the quality of telecommunication systems operation proves the hypothesis that both factors should be considered in providing reliability and authenticity of these systems' operation.

Keywords: space weather; geomagnetic and solar activity; electronic concentration; telecommunication systems; space debris.

УДК 621.396

С. В. КОЗЕЛКОВ, доктор техн. наук, професор,
Державний університет телекомунікацій, Київ;

О. В. ШЕФЕР, канд. техн. наук, доцент;

О. В. ШУЛЬГА, доктор техн. наук, доцент,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Удосконалення показників якості бортових радіолокаційних систем у реальних умовах їх застосування

Досліджено вплив нелінійності амплітудних характеристик радіоприймальних пристроїв (РПП) на якість функціонування бортових радіолокаційних систем (БРЛС). Визначено реальні причини зниження дальності дії БРЛС за наявності нелінійних шумів і завад. Установлено, що розширення динамічного діапазону РПП дозволяє забезпечити необхідні значення показників якості БРЛС. Розроблено теоретичне підґрунтя для вдосконалення сучасних та розроблення нових ефективних схемних способів розширення динамічного діапазону РПП, які можуть бути практично реалізовані на основі існуючої радіоелементної бази.

Ключові слова: бортова радіолокаційна система; радіоприймальний пристрій; показники якості; нелінійні процеси; динамічний діапазон; амплітудні характеристики.

Вступ

Аналіз питань побудови перспективних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та шляхи вдосконалення їх характеристик свідчить, що одним із найбільш ефективних напрямків є підвищення завадостійкості [1]. Аналітичний огляд вимог, що висувуються до систем ДЗЗ показав, що на даний час

© С. В. Козелков, О. В. Шефер, О. В. Шмельга, 2017

підвищити якість функціонування космічних бортових радіолокаційних систем (БРЛС) можна, перш за все, на основі застосування сучасних радіотехнічних методів [2].

Основна частина

Порівняльний аналіз можливих шляхів та напрямків підвищення показників якості БРЛС, із урахуванням їх основних особливостей і реальних умов застосування систем ДЗЗ, довів, що в загальному випадку якість функціонування БРЛС найбільш повно характеризується деякою множиною показників якості, вектор яких перебуває в певній функціональній залежності від внутрішніх властивостей цієї БРЛС і характеристик зовнішнього середовища [3; 4]:

$$\vec{K} = A\{\{\vec{\varepsilon}\}, \{\vec{z}\}\}, \quad (1)$$

де \vec{K} — показник якості БРЛС у векторному вигляді, $\vec{K} = [K_1, K_2 \dots]$;

K_i — скалярний показник якості БРЛС (K_1 — роздільна здатність; K_2 — точність вимірювань);

$\{\vec{\varepsilon}\}$ — сукупність параметрів, котрі характеризують БРЛС, $\{\vec{\varepsilon}\} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots]$;

ε_1 — апаратна надійність БРЛС; ε_2 — динамічний діапазон РПП БРЛС;

$\{\vec{z}\}$ — сукупність характеристик зовнішнього середовища, $\{\vec{z}\} = [z_1, z_2, z_3, z_4 \dots]$;

z_1 — характеристики радіолокаційних сигналів; z_2 — характеристики завад; z_3 — коефіцієнт загасання під час поширення радіохвиль; z_4 — ступінь відхилення параметрів руху носія БРЛС (КА) від рівномірного прямолінійного руху.

Характерною особливістю БРЛС ДЗЗ є оцінка якості їх функціонування, в основному за одним зі скалярних показників якості, наведених у табл. 1 [1; 2; 5].

Таблиця 1

Показники якості БРЛС, що характеризують якість функціонування різних типів комплексів ДЗЗ

Тип (призначення) систем та комплексів ДЗЗ	Основний показник якості функціонування БРЛС
Системи автономної навігації КА	Точність (роздільна здатність)
Системи космічного виявлення об'єктів	Імовірність правильного виявлення
Космічні системи картографування земної поверхні	Роздільна здатність

У зв'язку з цим вважаємо за доцільне ввести поняття узагальненого показника якості БРЛС ДЗЗ, під яким розуміється той скалярний показник якості K_i , який найбільш повно відображає ступінь пристосованості даної системи ДЗЗ до виконання покладених на неї завдань у заданих умовах застосування [1]. Для узагальненого показника якості БРЛС ДЗЗ векторне рівняння (1) вироджується у скалярну функціональну залежність [1; 6]

$$K_i = A_i\{\{\vec{\varepsilon}\}, \{\vec{z}\}\}, \quad (2)$$

де $A_i[\cdot]$ — проекція векторного функціоналу $A[\cdot]$ на вісь K_i .

З огляду на статистичну незалежність або дуже слабку корельованість між апаратною надійністю БРЛС, умовами поширення радіохвиль і відхиленнями носія БРЛС від прямолінійного рівномірного руху, з одного боку, і сигналами на вході РПП і його динамічним діапазоном, із другого боку, можна показати, що функціонал $A_i[\cdot]$ є таким, котрий факторизується [2]. Отже,

$$K_i = A_i'\{\{\vec{\varepsilon}_j\}, \{\vec{z}_k\}\} A_i''\{\vec{\varepsilon}_2, \{\vec{z}_1, \vec{z}_2\}\}. \quad (3)$$

Тут $A_i'[\cdot]$ — функціонал залежності узагальненого показника якості БРЛС від сукупностей $\{\vec{\varepsilon}_j\}$, $\{\vec{z}_k\}$, де $j \neq 2$, $k \neq 1, 2 \dots$;

$A_i''[\cdot]$ — функціонал залежності узагальненого показника якості БРЛС від ширини динамічного діапазону РПП (ε_2) та характеристик радіосигналів (z_1) і завад (z_2).

Слід наголосити, що функціональну залежність $A_i'[\cdot]$ на даний час достатньо докладно вивчено і на основі проведених досліджень розроблено практичні рекомендації щодо зниження впливу факторів $\{\vec{\varepsilon}_j\}$ і $\{\vec{z}_k\}$ на якість функціонування БРЛС [2]. У ряді практично важливих випадків використання даних рекомендацій є достатнім для зменшення ступеня впливу зазначених чинників до деякого прийняттого рівня [2]. Разом із тим досі недостатньо повно досліджено вплив обмеженості динамічного діапазону реальних РПП на якість функціонування БРЛС в умовах РЕП [7]. Це зумовлено значними ускладненнями теоретичного і обчислювального характеру, котрі виникають під час дослідження складних нелінійних РПП, і відсутністю достатньо розроблених і точних та зручних методів аналізу нелінійних динамічних РТС високого порядку [8]. Окрім того, актуальність даної проблеми стає очевидною, як правило, на більш пізніх етапах реальної оптимізації і максимально повної практичної реалізації потенційних можливостей БРЛС [8]. У зв'язку з цим основну увагу необхідно приділити аналізу впливу обмеженості динамічного діапазону РПП унаслідок нелінійності його амплітудної характеристики (АХ) на показники якості БРЛС, тобто дослідженням функціоналу $A_i''[\cdot]$.

Серед відомих праць [9], присвячених дослідженню впливу нелінійності АХ РПП на якість функціонування БРЛС, слід відзначити ті, де розкрито фізичну сутність впливу нелінійних процесів, що відбуваються у РПП, на якість функціонування БРЛС. Нелінійність АХ РПП призводить до суттєвих амплітудних спотворень сигналу на його виході, які можна описати виразом [8]

$$\Delta I_{\text{н}} = \Phi_1[U_{\text{вх}}, G(U_{\text{вх}})], \tag{4}$$

де $\Delta I_{\text{н}}$ — амплітудні нелінійні спотворення; $U_{\text{вх}}$ — амплітуда вхідного сигналу; $G(U_{\text{вх}})$ — нелінійна АХ РПП; $\Phi_1[\cdot]$ — функціональна залежність, що описує амплітудні нелінійні спотворення.

Вплив амплітудних нелінійних спотворень проявляється в зменшенні коефіцієнта передачі РПП, а також у появі додаткового нелінійного шуму [3].

Зі сказаного випливає, що нелінійний шум окремих радіолокаційних цілей додається, утворюючи сумарний фон, котрий зберігає досить великий рівень на суттєвій відстані вздовж лінії шляху носія БРЛС і може маскувати слабкі сигнали на значній відстані. Загалом амплітудні нелінійні спотворення призводять до істотного зниження контрастності та деталізації радіолокаційного зображення (РЛЗ) унаслідок значного погіршення відношення сигнал/шум. Зокрема, у [8] отримано наближену залежність контрастності РП від відношення сигнал/шум. Окрім того, під час проходження сигналів досить великого рівня через РПП із нелінійною АХ унаслідок амплітудно-фазової конверсії (АФК) [8] з'являється фазовий шум, який можна подати формулою вигляду [6]

$$\Delta \varphi_{\text{н}} = \Phi_2[U_{\text{вх}}, G(U_{\text{вх}})], \tag{5}$$

де $\Delta \varphi_{\text{н}}$ — фазові (амплітудно-фазові) нелінійні спотворення;

$\Phi_2[\cdot]$ — функціональна залежність, яка описує АФК.

Фазовий шум зберігає значний рівень на досить великій відстані вздовж лінії шляху носія БРЛС [2; 3], а також спричинює суттєве розфазування когерентних БРЛС. Це призводить до незворотної втрати деякої частини інформації про вимірювані координати цілей, котрі перебувають у фазі прийнятого радіолокаційного сигналу. При цьому вплив фазових шумів може бути зведено до зменшення максимуму, розширення і зміщення відносно центральної осі головної пелюстки діаграми спрямованості антени (табл. 2), а також до появи додаткових бічних пелюсток [5; 8; 10].

Таблиця 2

Вплив фазових шумів на характеристики синтезованої діаграми спрямованості РЗА

Швидкість фазових шумів, рад	Розширення основної пелюстки, частка Θ_3	Відхилення осі основної пелюстки, частка Θ_3	Зменшення коефіцієнта передачі основної пелюстки, дБ
0,5	0,001–0,002	0,01–0,11	0,1–0,2
1,0	0,006–0,007	0,3–0,4	0,4–0,97
1,5	0,01–0,05	0,4–0,6	0,75–1,3
2,0	0,05–0,08	0,6–0,85	1,0–1,4

Тут Θ_3 — потенційна ширина основної пелюстки синтезованої діаграми спрямованості (роздільна здатність апертури (РЗА)).

Отже, фазові шуми внаслідок АФК у РПП призводять до появи істотних координатних спотворень РЛЗ, а також до значного зниження його детальності і контрастності. Проте на основі результатів праць [2; 3] не завжди є змога точно і досить просто інтегрально оцінити вплив нелінійних процесів у реальних інерційних РПП безпосередньо на показники якості БРЛС [1; 8]. Аналіз впливу нелінійних властивостей РПП на якість функціонування РЛС проведено щодо простих РП із уведенням цілої низки пропозицій і припущень для спрощення [1; 6; 8].

Усе це призводить зрештою до того, що здобуті результати не мають достатньо загального і конструктивного характеру, оскільки не завжди дозволяють однозначно і точно ставити науково обґрунтовані вимоги до параметрів реальних складних РПП [6; 8].

Тому зазначені результати не повною мірою прийнятні для створення єдиної методологічної основи проектування БРЛС для використання їх за заданих зовнішніх умов функціонування комплексів ДЗЗ [2]. Слід зауважити, що отримані результати в прямому поданні не можуть бути використані під час впливу завад на вхід РПП [3].

У відомих працях, присвячених дослідженню завадостійкості БРЛС [2; 6; 8], здобуто чимало дуже важливих результатів, котрі свідчать про те, що потрапляння завад на вхід РПП може призвести до істотного зниження показників якості БРЛС. Зокрема, за наявності завад зменшується дальність дії БРЛС, причому [2]

$$L_{\text{н}} = L_0 10^{\frac{1}{40}(v_0 - v_{\text{зав}})}; \quad v_{\text{зав}} \geq v_0, \tag{6}$$

де $L_{\text{н}}$, L_0 — дальність дії БРЛС відповідно за наявності та відсутності завад;

$v_{\text{зав}}$ — відношення потужності зовнішньої завади до потужності внутрішніх шумів РПП (відношення завада/шум), дБ;

v_0 — порогове відношення завада/шум, починаючи з котрого завада впливає на БРЛС, дБ.

Ефект зниження дальності дії БРЛС за наявності завад можна трактувати як зростання дальності пригнічення БРЛС деяким джерелом завад [7]. Із основного рівняння радіолокації отримуємо вираз для максимальної дальності радіолокаційного спостереження або, що те саме, мінімальної дальності пригнічення БРЛС станцією завад, поєднаної з радіолокаційною ціллю

$$L_{\min_{\text{лін}}} = k_{0c} \sqrt{q}, \quad (7)$$

а також для випадку, коли джерело завади не збігається з радіолокаційною ціллю

$$L_{\min_{\text{лін}}} = k_0 \sqrt[4]{q}, \quad (8)$$

де k_{0c} , k_0 — коефіцієнт пропорційності у разі відповідно суміщеної і несуміщеної завади;
 q — відношення сигнал/шум за потужністю на вході РПП.

У тому разі, коли завади впливають також на бічні пелюстки діаграми спрямованості, завадостійкість БРЛС зручніше оцінювати секторами і зонами пригнічення.

Площу зони пригнічення БРЛС із лінійним РПП $\delta_{\text{пр}}$, побудованим на основі РЛС, за умови знаходження станції завади в центрі смуги огляду можна знайти з формули

$$\delta_{\text{пр}} = k_{\text{п}} q^{-1}, \quad (9)$$

де $k_{\text{п}}$ — коефіцієнт пропорційності, який залежить, як k_0 і k_{0c} , від характеристик БРЛС, а також станції завад.

Вплив завад призводить також до помітного зниження ймовірності правильного виявлення D точкових радіолокаційних цілей за умови заданої ймовірності хибної тривоги Q , що може бути описано таким виразом [2]:

$$D = \exp \left[\frac{\ln Q}{1 + Q} \right]. \quad (10)$$

Потрапляння завад на вхід РПП викликає зменшення роздільної здатності і зниження точності вимірювань БРЛС порівняно з її потенційними значеннями [8; 10]. Але безпосереднє використання загальних виразів, заснованих на виділенні просторово-часових кореляційних функцій у процесі оцінювання завадостійкості БРЛС, як правило, вельми ускладнене [8; 10]. Тому іноді зручніше застосовувати наближені вирази [8], що дозволяють порівняно просто оцінити збільшення інтервалу розрізнення БРЛС унаслідок погіршення реальної чутливості («сприйнятливості») РПП під час впливу завади на його вхід [7]

$$\Delta\alpha_{\text{лін}} \cong \Delta\alpha_{\text{пот}} \left| \frac{N_0(f) + M(f)}{N_0(f)} \right|, \quad (11)$$

де $\Delta\alpha_{\text{лін}}$ — реальна ширина інтервалу розрізнення БРЛС із лінійним РПП за параметром α ;

$\Delta\alpha_{\text{пот}}$ — потенційна ширина інтервалу розрізнення за параметром α ;

$N_0(\cdot)$ — миттєвий рівень внутрішніх шумів РПП, перерахованих на його вхід;

$M(\cdot)$ — миттєвий рівень завад на вході РПП.

Під час оцінювання реальної точності вимірювань БРЛС в інженерній практиці широко використовують формулу для потенційної точності вимірювань [1; 6; 8]

$$\sigma_{\alpha_{\text{пот}}} = \frac{\Theta_{\alpha}}{\sqrt{2} \left| \frac{S(f)}{N_0(f)} \right|}, \quad (12)$$

де $\sigma_{\alpha_{\text{пот}}}$ — потенційне значення СКП вимірювання параметра α ;

Θ_{α} — величина, що характеризує потенційну роздільну здатність БРЛС за параметром α (зазвичай вважають, що $\Theta_{\alpha} = \Delta\alpha_{\text{пот}}$);

$S(\cdot)$ — миттєвий рівень радіолокаційного сигналу на вході РПП.

Згідно зі сказаним вводяться коефіцієнти втрат, які враховують погіршення значення Θ_{α} і зменшення відношення сигнал/шум [2]. З урахуванням формули (11) можна дістати вираз для реальної СКП вимірювання БРЛС із лінійним РПП $\sigma_{\alpha_{\text{лін}}}$ [2]

$$\sigma_{\alpha_{\text{лін}}} \cong \sigma_{\alpha_{\text{пот}}} \left| \frac{N_0(f) + M(f)}{N_0(f)} \right|^2. \quad (13)$$

Вплив завад призводить також до погіршення інформаційних властивостей БРЛС [2]. Зокрема, якщо БРЛС побудовано на основі РЛС, то максимальна кількість інформації V_{max} , отриманої за сеанс вимірювань, може бути оцінена за формулою вигляду

$$V_{\text{max}} = \frac{L_{\alpha 1} L_{\alpha 2}}{\Delta\alpha_1 \Delta\alpha_2} \log_2 K, \quad (14)$$

де $L_{\alpha 1}$, $L_{\alpha 2}$ — площа смуги радіолокаційного огляду;

$\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2$ — площа роздільного елемента;

K — розрізнявана кількість градацій сигнальної функції.

Із урахуванням формули (11) вираз (14) для БРЛС із лінійним РПП можна подати у вигляді

$$V_{\text{лін}} \cong V_{\text{мак}} \left| \frac{N_0(f) + M(f)}{N_0(f)} \right|^2. \quad (15)$$

При цьому вважалось, що ступінь впливу завад на роздільну здатність за параметрами $\Delta\alpha_1$ та $\Delta\alpha_2$ однакова [7].

Аналіз співвідношень (6), (10) і (14) показує, що потрапляння завад на вхід РПП нерідко призводить до помітного зниження показників якості БРЛС. Однак ці результати здобуто за припущення про лінійність РПП, що загалом знижує їх точність і вірогідність [9]. Дійсно, як випливає з формул (4) і (5), характер впливу завад на БРЛС із реальним РПП має значною мірою залежати від їх амплітуди і виду нелінійності АХ РПП. У [8] показано, зокрема, що під час зростання амплітуди завади збільшується смуга частот її впливу на реальний РПП із неминучою нелінійністю його АХ. Це зумовлено позасмуговим нелінійним впливом завад на РПП-блокування, а також перехресні та інтермодуляційні спотворення. Відповідно зростає й імовірність впливу завад на реальний РПП порівняно з ідеальним лінійним РПП, причому [9]

$$p(\Delta f_p) = 1 - [1 - p(\Delta f_i)]^{\Delta f_p / \Delta f_i}, \quad (16)$$

де $\Delta f_p, \Delta f_i$ — смуга частот впливу завад заданого рівня відповідно на реальний і ідеальний РПП;

$p(\Delta f_i), p(\Delta f_p)$ — імовірність того, що в смузі частот Δf_i та Δf_p виявиться відповідно хоч одна завада заданого рівня.

Нелінійний вплив завад на якість функціонування БРЛС, як правило, значно складніше враховувати й усувати, ніж лінійний вплив таких самих завад [9].

Необхідно зазначити, що відомі результати досліджень впливу завад на РПП із нелінійними АХ звичай мають наближений і, в основному, якісний характер [10]. Недостатньо враховується той факт, що нелінійність АХ реальних РПП є частотно-залежною, що особливо важливо під час дослідження позасмугового нелінійного впливу завад [7]. Тому дані результати умовно прийнятні для аналізу і синтезу сучасних БРЛС, РПП котрих, як правило, являють собою складне багатокаскадне з'єднання різнорідних РП із різними значеннями їх частотно-залежних параметрів [1; 5; 10]. Це зумовлює актуальність проведення більш чітких і точних досліджень нелінійних процесів у реальних багатокаскадних РПП у заданому електромагнітному оточенні (ЕМО) [7].

Аналітичний огляд відомих наукових праць, присвячених дослідженню нелінійних РПП, показує, що здобуті результати носять частинний характер [2]. Іноді такі результати недостатньо поєднуються між собою та з критеріями оцінки нелінійних властивостей РПП, що застосовуються на практиці, а також із висновками, отриманими в лінійному наближенні.

Окремі результати теоретичного аналізу важко піддаються ідентифікації, що істотно ускладнює їх експериментальну перевірку та подальше використання. Багато з методів розв'язання зазначених нелінійних задач дуже специфічні і можуть бути використані для аналізу лише окремих властивостей порівняно вузького класу нелінійних РТС [8]. Однак такий стан речей суттєво ускладнює аналіз і обмежує реальні можливості синтезу і проектування РПП деякою шириною динамічного діапазону, яка дозволяє забезпечити необхідні значення показників якості БРЛС ДЗЗ у заданому зовнішньому ЕМО [2; 3; 7]. У зв'язку з цим вельми актуальним є проведення загальних аналітичних досліджень впливу нелінійних властивостей широкого класу РПП на якість функціонування БРЛС в умовах РЕП. При цьому проведення даних досліджень на основі єдиної розробленої методології дозволило б узагальнити результати наукових розробок цього напрямку. Досить важливою є також вимога ідентифікованості результатів і порівнянності їх між собою та з даними аналізу в лінійному наближенні, а також з практичними інженерними критеріями оцінки нелінійних властивостей РПП.

З урахуванням випадкового характеру вхідних впливів, а також особливостей функціонування БРЛС в умовах РЕП [7] можна записати вираз для узагальненого показника якості у вигляді імовірнісного співвідношення [2]

$$p = p_0 [(1 - p_1) p_{\text{БРЛС}_1} + p_1 p_{\text{БРЛС}_2}], \quad (17)$$

де p — імовірність практичної реалізації значення узагальненого показника якості БРЛС не гірше від заданого рівня;

p_0 — складова ймовірності p , що визначається функціоналом $A'_i[\cdot]$;

p_1 — імовірність впливу завад на вхід РПП БРЛС;

$p_{\text{БРЛС}_1}, p_{\text{БРЛС}_2}$ — складові ймовірності p , котрі визначаються функціоналом $A'_i[\cdot]$ відповідно за відсутності та наявності завад.

Із формули (17) випливає, що розрізняване значення ширини динамічного діапазону РПП суттєво зростає зі збільшенням імовірності впливу завад p_1 [2].

З огляду на те, що смуга пропускання за входом РПП БРЛС ДЗЗ зазвичай у десятки або сотні разів перевершує його вихідну смугу пропускання [2], імовірність позасмугового нелінійного впливу завад іноді навіть істотно перевищує ймовірність прямого проходження завад на вихід РПП (особливо за умови використання режиму зміни носійної частоти БРЛС від імпульсу до імпульсу за випадковим законом). У зв'язку з цим доцільно поділити позасмуговий та прицільний за частотою вплив завад на РПП. Тоді вираз (17) перетвориться до виду [2]

$$p = p_0 \{ (1 - p_1) p_2 + p_1 [(1 - p_3) p_4 + p_3 p_5] \}. \quad (18)$$

Тут

$$p_2 \equiv p_{\text{БРЛС}_1} = \int_{x_{\min}}^{x'_{\max} + \Delta x'} B_1(S) dS;$$

$$p_3 = \int_{f_1}^{f_2} C(f) df \text{ — імовірність прямого проходження завад на вихід РПП } (\Delta f_{\text{вих}} = f_2 - f_1);$$

$$p_4 = \int_{x_{\min}}^{x''_{\max} + \Delta x''} B_2(X) dX \text{ — складова ймовірності } p_{\text{БРЛС}_2}, \text{ зумовлена позасмуговим впливом завад};$$

$C(\cdot)$ — щільність розподілу завад за частотою;

X_{\min} — нижня межа динамічного діапазону (чутливість) РПП;

X'_{\max}, X''_{\max} — верхня межа динамічного діапазону РПП відповідно за основним і сусіднім каналом прийому;

$B_1(\cdot), B_2(\cdot)$ — щільність розподілу амплітуд відповідно радіолокаційних сигналів (S) та їх суміші із завадами ($S + M$);

X', X'', X''' — величини, котрі визначають гранично допустимі співвідношення відповідно між амплітудою сигналу, позасмугової завади та завади, прицільної за частотою, а також верхньою межею динамічного діапазону РПП (зазвичай $X' = X''$; $X''' = \frac{x_{\text{вхmax}}}{x'_{\max}} \frac{1}{100}$, причому $x_{\text{вхmax}} = x'_{\max} + \Delta x'$ [5; 8]).

У процесі дослідження БРЛС, як правило, вводиться припущення щодо нормальності законів розподілу радіолокаційних сигналів, а також їх суміші із завадами [2]. Тоді амплітуда нормальних вхідних впливів із конкретною СКП σ підпорядковується розподілу Релея [2]

$$B(x, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{x^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (19)$$

Однак конкретні значення параметрів законів розподілу вхідних впливів зазвичай апріорно невідомі, можуть змінюватися в часі вздовж лінії шляху та за зоною огляду [8; 10]. Окрім того, сигнали, котрі заважають, можуть надходити як за головною, так і за бічною пелюсткою діаграми спрямованості антени БРЛС, а також за основним або неосновним каналом прийому РПП [5–7]. Враховуючи ці фактори, доходимо висновку, що загалом апріорний розподіл амплітуд як радіолокаційних сигналів, так і їх суміші із завадами досить коректно описуються гіперболічним (рівномірно-логарифмічним) законом [2], причому

$$B_1(S) = \frac{1}{S} \ln \frac{S_{\max}}{x_{\min}}, \quad (20)$$

$$B_2(x) = \frac{1}{x} \ln \frac{x_{\max}}{x_{\min}}. \quad (21)$$

Це відповідає загальному апріорному закону розподілу випадкової величини з великим динамічним діапазоном її зміни (закон Шеннона) [8; 10].

Якщо вважати, що порушення нормальної роботи БРЛС можливе у разі перевищення амплітуди X вхідного впливу деякого рівня X_0 , то ймовірність даної події можна оцінити за допомогою такого співвідношення [10]:

$$p(x > x_0) = 1 - \int_0^{x_0} B(x) dx \cong 1 - \int_{x_{\min}}^{x_0} B(x) dx. \quad (22)$$

Слід зазначити, що лінійний динамічний діапазон відомих РПП БРЛС, як правило, не перевищує 40-50 дБ [8; 10].

Висновки

За результатами досліджень, проведених у рамках статті, можна обґрунтовано стверджувати, що ймовірність порушення нормальної роботи БРЛС досить висока і становить 0,16-0,33 за відсутності завад і 0,58-0,66 в умовах РЕП. Це зумовлює необхідність істотного розширення динамічного діапазону РПП. Водночас створення НВЧ ширококугових РПП із лінійним динамічним діапазоном є досить складним науково-технічним завданням, далеким від свого повного вирішення. Передусім це зумовлено реальними можливостями відомої радіоелементної бази.

З огляду на це особливого значення набуває застосування і вдосконалення сучасних та розроблення нових ефективних схемних способів розширення динамічного діапазону РПП, котрі можуть бути практично реалізовані на основі існуючої радіоелементної бази.

Список використаної літератури

1. **Петров, А. В.** Анализ и синтез радиотехнических комплексов / А. В. Петров; под ред. В. Е. Дуневича.— М.: Радио и связь, 1984.— 248 с.
2. **Ширман, Я. Д.** Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос.— М.: Радио и связь, 1981.— 248 с.
3. **Букингом, М.** Шумы в электронных приборах и системах / М. Букингом; пер. с англ.— М.: Мир, 1986.— 399 с.
4. **Goodman, John M.** Space Weather & Telecommunications / John M. Goodman // Springer-Verlag, New York, USA.— 2005.— P. 382.
5. **Ванькевич, В. В.** Теоретические и экспериментальные исследования специфики тропосферного распространения СВЧ и КВЧ радиосигналов / В. В. Ванькевич, М. А. Иванов, С. В. Козелков // Радиотехника.— 1990.— Вып. 92.— С. 106–114.
6. **Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации** / [А. Г. Зюко, А. И. Фалько, И. П. Панфилов, Л. В. Банкет].— М.: Радио и связь, 1985.— 272 с.
7. **Егоров, Е. И.** Использование радиочастотного спектра и радиопомехи / Е. И. Егоров, Н. И. Калашников, А. С. Михайлов.— М.: Радио и связь, 1986.— 304 с.
8. **Тихонов, В. И.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов.— [3 изд.].— М.: Горячая линия-Телеком, 2015.— 608 с.
9. **Dunn, Mark R.** The Volterra Series and its Application / Mark R. Dunn // Calif., Davis., USA.— 2013.— P. 268.
10. **Madisetti Vijay K.** Digital Signal Processing Fundamentals / Vijay K. Madisetti // Second Edition. CRC Press.— 2017.— P. 904.

Рецензент: доктор техн. наук, професор **Л. Н. Беркман**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

С. В. Козелков, А. В. Шефер, А. В. Шульга

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Исследовано влияние нелинейности амплитудных характеристик радиоприемных устройств на качество функционирования бортовых радиолокационных систем.

Ключевые слова: бортовая радиолокационная система; радиоприемное устройство; показатели качества; нелинейные процессы; динамичный диапазон; амплитудные характеристики.

S. V. Kozelkov, O. V. Shefer, O. V. Shulga

IMPROVEMENT OF QUALITY INDICATORS OF ONBOARD RADIO LOCAL SYSTEMS IN REAL CONDITIONS OF THEIR APPLICATION

In the article the influence of nonlinearities of the amplitude characteristics of radio receivers (RR) on the quality of the operation of on board radar systems (OBRS) is investigated. Real reasons for reducing the range of the radio local system in the presence of nonlinear noise and interference are established, which in general also reduces the accuracy and reliability of radar images. It is established that the expansion of the dynamic range of RR allows providing the necessary values of the quality indicators of the OBRS. Frequent dependence of nonlinear amplitude characteristics of real RRs is taken into account, which significantly influences on the study of off-band nonlinear influence of interference on radio signals. It is proved in the article that both priori distribution of amplitudes as radar signals and their mixture with obstacles are fairly well described by the hyperbolic (uniformly logarithmic) law. The theoretical basis for the improvement of modern and development of new effective circuit methods for expanding the dynamic range of RRs, which can be practically implemented on the basis of the existing radio element base, has been developed.

Keywords: onboard radio local system, radio receiver, the indicators of quality, nonlinear processes, dynamic diapason, amplitude characteristics.