

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

Методика визначення фазових шумів радіопристроїв та оцінювання їхнього впливу на показники якості бортових радіолокаційних систем

У рамках статті розроблено методику визначення фазових шумів реальних радіопристроїв (РП). Доведено обмеженість динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв (РПП) через наявність нелінійності їхніх амплітудних характеристик (АХ) та негативний вплив цієї нелінійності на показники якості функціонування бортових радіолокаційних систем (БРЛС), передусім на їхню завадостійкість. Установлено, що нелінійні процеси в РПП призводять до погіршення інформаційних властивостей БРЛС унаслідок зниження розрізнявальної здатності та зменшення кількості розрізняваних градацій сигнальної функції. Обґрунтовано поняття ефективного відношення сигнал/шум на вході еквівалентного лінійного РПП, що дозволяє проводити системні дослідження з комплексного оцінювання впливу нелінійних процесів у радіотехнічних системах різного призначення на їхні якісні характеристики.

Ключові слова: фазовий шум; радіоприймальний пристрій; бортова радіолокаційна система; показники якості; амплітудна характеристика; динамічний діапазон; амплітудні та фазові спотворення.

Вступ

Останнім часом прогрес у виконанні комплексу державних завдань із побудови перспективних космічних бортових радіолокаційних систем (БРЛС) зумовлюється ухваленням Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року (далі — Концепція), де визначено основні напрямки розвитку та створення сучасної системи аерокосмічної розвідки на базі нових технологічних вирішень та забезпечення оперативного доступу до даних зазначеної розвідки в режимі часу, наближеному до реального. Це, у свою чергу, відповідає Стратегії національної безпеки України та Воєнній доктрині України, а також напрямкам розвитку української космічної програми, що передбачає удосконалення виробничого та науково-технічного потенціалу галузі згідно зі Стратегією сталого розвитку, відомою під назвою «Україна–2020».

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних джерел [1], присвячених питанням побудови перспективних космічних БРЛС та шляхам удосконалення їхніх характеристик, переконує, що один із найбільш ефективних напрямків поліпшення показників якості спирається на застосування сучасних радіотехнічних методів [2].

Проте можливості практичної реалізації потенційно високих характеристик БРЛС суттєво обмежені низкою внутрішніх і зовнішніх чинників. Саме через це маємо сьогодні помітне відставання реальних показників якості БРЛС від їхніх теоретичних значень [1].

Як наголошено в [3; 4], нелінійні процеси в реальних радіоприймальних пристроях (РПП) і досі найменш вивчені і, разом із тим, усувати їх найважче. Але вони чинять суттєвий і багатогранний вплив на якість функціонування БРЛС і, загалом кажучи, недостатньо піддаються строгому і точному опису та врахуванню [4]. У зв'язку з цим однією з найбільш важливих і актуальних задач, спрямованих на підвищення показників якості БРЛС, є всебічний аналіз та розширення динамічного діапазону їхніх РПП.

Відомі способи розширення лінійного динамічного діапазону [5] не повною мірою придатні для підвищення показників якості БРЛС. Їх застосування супроводжується незворотними втратами частини інформації про радіолокаційний контраст досліджуваних об'єктів, зниженням дальності дії БРЛС і значними амплітудними та фазовими нелінійними спотвореннями радіолокаційного зображення (РЛЗ). Це призводить до істотного зниження показників точності та якості БРЛС (точність БРЛС РПП через нелінійність АХ нерідко на порядок і більше поступається точності вимірювань БРЛС із лінійним РПП), а також до значного погіршення їхньої завадостійкості.

Формулювання мети статті. Метою статті є розроблення методики визначення фазових шумів радіопристроїв та аналіз впливу нелінійних процесів у РПП на показники якості БРЛС.

Основна частина

Відповідно до поставленої мети подамо вихідний сигнал вузькосмугового (відносно носійної частоти) РПП у вигляді усіченого ряду Вольтерра [6; 7]

$$Y(\varphi) \cong H_1(\varphi)[\sigma(\varphi) + M(\varphi)] + H_3(\varphi_1, \varphi_2, -\varphi_3) \prod_{i=1}^3 [\sigma(\varphi_i) + M(\varphi_i)]. \quad (1)$$

Фазові шуми через амплітудно-фазову конверсію (АФК) у РПП із урахуванням властивості нелінійних функціоналів типу Вольтерра, відомої в математиці як однорідність степеня k [6–8], можуть бути визначені з формули такого вигляду [9]:

$$\Delta\varphi = \arg \left\{ H_3(\varphi_1, \varphi_2, -\varphi_3) \prod_{i=1}^3 [\sigma(\varphi_i) + M(\varphi_i)] \right\}. \quad (2)$$

На основі характеристик фазових шумів згідно з (2) можна оцінити вплив АФК у РПП на показники якості БРЛС [9]. Але, якщо фазові шуми помітно впливають здебільшого на когерентні БРЛС [8], то амплітудні нелінійні спотворення погіршують функціонування практично всіх типів БРЛС (див. таблицю) [9].

Класифікація основних чинників, що впливають на якість функціонування БРЛС

Внутрішні чинники	Зовнішні чинники
Апаратурна надійність БРЛС	Нестационарність у часі умов поширення радіохвиль
Нестабільність параметрів БРЛС	Відхилення носія БРЛС від рівномірного прямолінійного руху
Обмеженість динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв БРЛС	Потрапляння завад на вхід радіоприймальних пристроїв БРЛС

Варто наголосити, що нелінійні властивості РПП призводять до зменшення рівня радіолокаційних сигналів і появи на виході БРЛС так званих **нелінійних шумів** у вихідному сигналі РПП [5]. Це призводить до зниження відношення сигнал/шум на виході РПП порівняно зі значенням цього відношення на його вході [10]. Сьогодні в літературних джерелах відсутні аналітичні співвідношення, котрі дозволяли б інтегрально враховувати вплив усіх нелінійних ефектів у РПП на зменшення вихідного відношення сигнал/шум. У зв'язку з цим визначимо відносно зменшення коефіцієнта передачі РПП таким чином [10]:

$$\rho(\varphi) = 1 - \left| \frac{H_3(\varphi_1, \varphi_2, -\varphi_3) \{ \sigma(t) [\sigma(\varphi_1)\sigma(-\varphi_1) + M(\varphi_1)M(-\varphi_1)] \}}{H_1(\varphi) [\sigma(\varphi) + M(\varphi)]} \right|. \quad (3)$$

Складові нелінійних спотворень можуть бути описані виразом

$$J(\varphi) = \left| \left\{ H_3(\varphi_1, \varphi_2, -\varphi_3) \prod_{i=1}^3 [\sigma(\varphi_i) + M(\varphi_i)] \right\}^* \right|, \quad (4)$$

де зірочка (*) означає, що в (4) опущено складові, котрі враховано в чисельнику виразу (3).

Зрештою формула (3) характеризує нелінійні явища типу блокування і зниження чутливості РПП, а вираз (4) описує інтермодуляційні та перехресні шуми [8–10].

Для оцінювання фактичних показників якості БРЛС широко використовується відношення сигнал/шум на вході РПП, котре зазвичай вважають лінійним [7–9]. Тому доцільно ввести таке поняття, як **ефективне відношення сигнал/шум** $\rho_{\text{еф}}(\cdot)$ на вході еквівалентно лінійного РПП [10]. Тоді РПП із передатною функцією $H_1(\cdot)$ можна умовно вважати лінійним, а складові нелінійних спотворень необхідно перерахувати відносно до входу [9; 10]. На основі співвідношень (3) і (4), а також нелінійних ефектів (зниження передатного коефіцієнта РПП) і виникнення нелінійних шумів формула для $\rho_{\text{еф}}(\cdot)$ набирає вигляду

$$\rho_{\text{еф}}(\varphi) = \frac{|\sigma(\varphi)\rho(\varphi)|}{|N_0(\varphi) + M(\varphi) + J(\varphi)/|H_1(\varphi)|} = \rho(\varphi)\gamma(\varphi), \quad (5)$$

де $\rho(\varphi) = |\sigma(\varphi)| / |N_0(\varphi) + M(\varphi)|$ — миттєве відношення сигнал/шум на вході РПП;

$\gamma(\varphi) = \frac{|N_0(\varphi) + M(\varphi)|\rho(\varphi)}{|N_0(\varphi) + M(\varphi) + J(\varphi)/|H_1(\varphi)|}$ — коефіцієнт погіршення відношення сигнал/шум унаслідок нелінійності амплітудних характеристик РПП ($0 \leq \gamma \leq 1$);

$N_0(\cdot)$ — внутрішні шуми РПП, перераховані на його вхід.

Числові значення коефіцієнта γ можуть бути знайдені з номограми, розрахованої відповідно до формули (5) і поданої на рисунку.

Обґрунтування методики розрахунку фазових шумів унаслідок АФК у РПП і поняття ефективного відношення сигнал/шум на вході еквівалентного лінійному РПП дозволяє проводити системні дослідження з комплексного оцінювання впливу нелінійних процесів у РТС різного призначення на їхні якісні характеристики [11; 12].

Зауважимо, що зазначені результати можуть бути використані для розробки загальної теорії точності вимірювально-інформаційних РТС, дослідження ефективності систем зв'язку, а також широкого класу САК [10] з урахуванням їхніх нелінійних властивостей.

Проведемо оцінку впливу нелінійності АХ РПП на показники якості БРЛС із використанням здобутих результатів. У разі, коли роздільна здатність за параметрами БРЛС характеризується інтервалом розрізнення $\Delta\alpha$, то відповідно до (5) можна дістати [8]

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_{\text{лін}} \gamma^{-1}(\varphi). \quad (6)$$

Так само, з урахуванням формул (5) і (6), можна вивести вираз для середньоквадратичної похибки параметра вимірювань α [8]

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha_{\text{пот}}} \left[\left| \frac{N_0(\varphi) + M(\varphi)}{N_0(\varphi)} \right| \frac{1}{\gamma(\varphi)} \right]^2 = \sigma_{\alpha_{\text{лін}}} \gamma^{-2}(\varphi). \quad (7)$$

Погіршення інформаційних властивостей БРЛС унаслідок зниження роздільної здатності і зменшення кількості розрізняваних градацій сигнальної функції [10] також є наслідком впливу нелінійних процесів у РПП.

Із урахуванням викладок, наведених у [3; 8], для визначення ймовірності правильного виявлення цілі, коли задано ймовірність хибної тривоги (включаючи визначене відношення сигнал/шум), можна довести, що вплив нелінійності АХ РПП на ймовірність виявлення цілі, з урахуванням (5), можна оцінити за допомогою виразу [8]

$$\delta = \exp \left[\frac{\ln Q}{1 - \rho^2(\varphi) \gamma^2(\varphi)} \right]. \quad (8)$$

Оскільки БРЛС будуються переважно на основі РЛС [13], необхідно здійснити оцінювання впливу нелінійності АХ РПП на максимальну кількість інформації, що її отримують РЛС за сеанс вимірювань. Із урахуванням виразу (6) відповідно до [10] можна дістати

$$V = V_{\text{лін}} \gamma^2(\varphi) \frac{\log_2 K}{\log_2 K_0} \cong V_{\text{лін}} \gamma^2(\varphi), \quad (9)$$

де K_0 , K — відповідно реальна і необхідна кількість градацій сигнальної функції.

Вельми важливою характеристикою завадостійкості БРЛС є мінімальна дальність пригнічення. Ураховуючи (5), дістаємо вираз, що дозволяє оцінювати вплив нелінійних процесів, які відбуваються в РПП [10], на мінімальну дальність пригнічення БРЛС

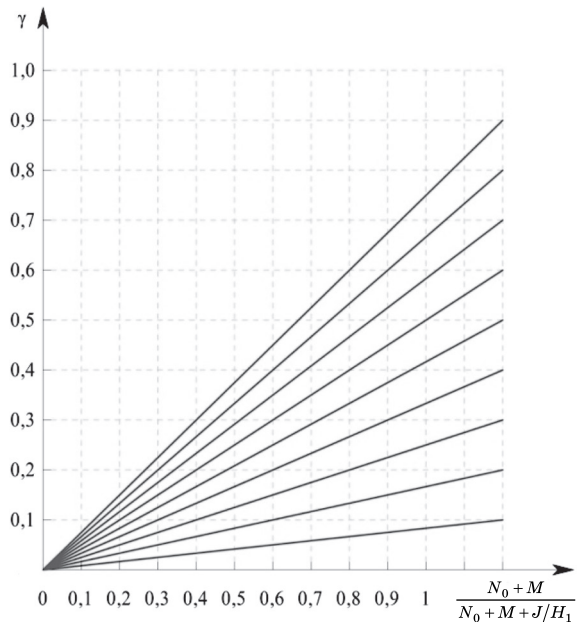
$$L_{\min C} = L_{\min C \text{ лін}} \gamma(\varphi). \quad (10)$$

Коли станцію завад розташовано в центрі смуги огляду БРЛС, то площа зони пригнічення, до якої входить відношення сигнал/шум [10], з урахуванням (5) визначається таким співвідношенням:

$$\delta_{\Pi} = \delta_{\Pi \text{ лін}} \gamma^{-2}(\varphi). \quad (11)$$

Справді, значення $\gamma(\cdot)$ залежить від вигляду нелінійності АХ РПП, параметрів його частотної вибірконості, а також від характеристик радіолокаційних сигналів і завад [11; 12].

Фазові шуми РПП, як показують здобуті результати, мають істотний вплив на реальні показники якості БРЛС [9]. Звідси доходимо висновку про необхідність пригнічення нелінійних процесів, що відбуваються в РПП зі зниженням рівня нелінійних спотворень третього порядку [10]. Зауважимо, що внаслідок загальності визначення коефіцієнта $\gamma(\cdot)$, згідно із (5), визначення цього параметра призводить до певних ускладнень.



Залежності значень коефіцієнта γ від відносного зменшення коефіцієнта підсилення J і рівня ρ нелінійного шуму

Висновки

♦ Одним із найвагоміших факторів, що істотно позначається на якості функціонування БРЛС та їхню завадостійкість, є вплив фазових шумів реальних РПП через нелінійність їхніх АХ. Особливо це дається взнаки в разі впливу на РПП різного роду завад. У рамках статті розроблено методику визначення фазових шумів радіопристроїв та здійснено оцінювання їхнього впливу на показники якості реальних бортових радіолокаційних систем.

♦ Запропонована методика визначення фазових шумів РП та узгодження динамічного діапазону РПП БРЛС із вхідними впливами враховує характеристики частотної вибірконості, а також статистичні та спектральні властивості радіолокаційних сигналів і завад.

Список використаної літератури

1. Горностаев, Ю. М. Перспективные спутниковые системы связи / Ю. М. Горностаев, В. В. Соколов, Л. М. Невдяев.— М.: Горячая линия-Телеком, 2000.— 132 с.
2. Радиотехнические комплексы для управления дальними космическими аппаратами и для научных исследований / Под ред. Е. П. Молотова.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.— 232 с.
3. Shefer, O. Algorithm of identification of nonlinear technical systems according to measured data / O. Shefer, V. Galai // Control, Navigation and Communication Systems.— Poltava: Polt NTU, 2014.— no. 3 (31).— P. 91–95.
4. Isidori, A. Nonlinear control systems / A. Isidori.— Springer, 1995.— 549 p.
5. Букингом, М. Шумы в электронных приборах и системах: пер. с англ. / М. Букингом.— М.: Мир, 1986.— 399 с.
6. Dunn Mark, R. The Volterra Series and its Application / Mark R Dunn // Calif., Davis., USA, 2013.— 268 p.
7. Козелков, С. В. Синтез алгоритма определения ядер Вольтерра / С. В. Козелков // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.— 1999.— 4(19).— С. 84.
8. Тихонов, В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов / В. И. Тихонов.— М.: Радио и связь, 1986.— 296 с.
9. 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.
10. Радиотехнические системы / Под ред. Ю. М. Казаринова.— М.: Высш. шк., 1990.— 496 с.
11. Перфилов О. Ю. Радиопомехи / О. Ю. Перфилов.— М.: Горячая линия-Телеком, 2017.— 110 с.
12. Егоров, Е. И. Использование радиочастотного спектра и радиопомехи / Е. И. Егоров, Н. И. Калашников, А. С. Михайлов.— М.: Радио и связь, 1986.— 304 с.
13. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана.— М.: ЗАО МАКВИС, 1998.— 828 с.

Рецензент: доктор техн. наук, ст. науч. співробітник **Є. В. Гаврилко**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

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

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ШУМОВ РАДИОУСТРОЙСТВ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В рамках статьи разработана методика определения фазовых шумов реальных радиоустройств (РУ). Доказана ограниченность их динамического диапазона вследствие нелинейности амплитудных характеристик (АХ) и отмечено негативное влияние этой нелинейности на показатели качества функционирования бортовых радиолокационных систем (БРЛС) и их помехоустойчивость в целом. Обосновано понятие эффективного отношения сигнал/шум на входе эквивалентного линейному РПУ, что позволяет проводить системные исследования по комплексной оценке влияния нелинейных процессов в радиотехнических системах различного назначения на их качественные характеристики.

Ключевые слова: фазовый шум; радиоприемное устройство; бортовая радиолокационная система; показатели качества; амплитудная характеристика; амплитудные и фазовые искажения.

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

METHOD OF DETERMINATION OF PHASE NOISES OF RADIO DEVICES AND EVALUATION OF THEIR EFFECTS ON THE QUALITY INDICATORS OF BOAT RADIO LOCAL SYSTEMS

In this article the method of determination of phase noises of real radio devices (RD) is developed. The limited range of dynamic diapason is proved due to the presence of nonlinearities and their negative impact on the performance indicators of on-board radio local systems (OBRLS) and noise immunity in general.

The concept of an effective signal-to-noise concern at the input of linear RRR equivalent was substantiated, and it makes it possible to carry out systematic studies of the complex evaluation of the influence of non-linear processes in radio engineering systems of various purposes on their qualitative characteristics.

Keywords: phase noise; radio receiver; onboard radar system; quality indices; amplitude characteristic; dynamic range; amplitude and phase distortions.