

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОБМЕЖЕНОСТІ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ БОРТОВИХ РАДІОСИСТЕМ

Gavrylko Y.V., Shefer O.V. The investigation of the influence of the limited range of radio receiver devices on the quality of the indicators of radio systems' onboard quality.

In this article an estimation of the influence of the limits of dynamic range of radio receivers (RPPs) on the qualitative parameters of on board radio systems is carried out, using a toolkit as a functional method, which is based on the determination of Volterra cores, which makes it possible to optimize them according to the criteria of nonlinearity. As a result of the research, the concept of effective signal-to-noise ratio at the input of equivalent linear RPP is grounded on the basis of the system analysis of the integral influence of the nonlinearity of the amplitude characteristics of the real RPPs, as well as to determine scientifically grounded requirements of their parameters, based on the required values of the indicators of the quality of on-board radio systems. The obtained results testify to the necessity of suppressing the nonlinear processes occurring in the RPP by reducing the level of nonlinear distortions of the third order.

Keywords: radio device, nonlinear process, dynamic diapason, systematic analyses, functional method, Volterra cores, indicators of quality, on-board radio system.

Гаврилко Є.В., Шефер О.В. Дослідження впливу обмеженості динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв на показники якості бортових радіосистем.

У статті проведена оцінка впливу обмежень динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв (РПП) на якість функціонування бортових радіосистем, що дає змогу оптимізувати їх за критеріями нелінійності. У результаті досліджень обґрунтовано поняття ефективного відношення сигнал/шум на вході еквівалентного лінійного РПП на основі системного аналізу інтегрального впливу нелінійності амплітудних характеристик реальних РПП, а також визначено науково обґрунтовані вимоги до їх параметрів, виходячи з необхідних значень показників якості бортових радіосистем.

Ключові слова: радіопристрій, нелінійний процес, динамічний діапазон, системний аналіз, функціональний метод, ядра Вольтера, показники якості, бортова радіосистема.

Гаврилко Е.В., Шефер А.В. Исследование влияния ограниченности динамического диапазона радиоприемных устройств на показатели качества бортовых радиосистем.

В статье проведена оценка влияния ограниченности динамического диапазона радиоприемных устройств (РПУ) на качество функционирования бортовых радиосистем, что позволяет оптимизировать их по критериям нелинейности. В результате исследований обосновано понятие эффективного отношения сигнал / шум на входе эквивалентного линейного РПУ путем системного анализа интегрального воздействия нелинейности амплитудных характеристик реальных РПУ, а также определены научно обоснованные требования к их параметрам, исходя из требуемых значений показателей качества бортовых радиосистем.

Ключевые слова: радиоустройство, нелинейный процесс, динамический диапазон, системный анализ, функциональный метод, ядра Вольтера, показатели качества, бортовая радиосистема.

Постановка проблеми та аналіз літературних джерел

Відомі на даний час теоретичні методи дослідження нелінійних процесів у радіоприймальних пристроях (РПП) умовно можуть бути розділені на чисельні і аналітичні методи [1-3]. Загальними недоліками чисельних методів є мала придатність для встановлення загальних залежностей [2], невиправдано великі витрати часу на розроблення, налагодження і розробку програмного забезпечення [3], а також висока чутливість кінцевих результатів до варіації вихідних даних. Тому для обґрунтованого вибору методології дослідження впливу нелінійності амплітудних характеристик (АХ), реальних багатокаскадних РПП на показники якості бортових радіолокаційних систем (БРЛС), як

зазначено в роботі [2], доцільно скористатись функціональним методом, як таким, що вільний від значних недоліків [2, 4].

Метою роботи є: оцінка впливу динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв на показники якості бортових радіосистем, шляхом використання в якості інструментарію функціонального методу, котрий ґрунтується на визначенні ядер Вольтера.

Виклад основного матеріалу дослідження

Функціональний метод є одним із найбільш результативних і перспективних напрямків у теорії нелінійних систем і заснований на представленні вихідного сигналу нелінійного радіопристрою (РП) у вигляді функціонального ряду Вольтера від вхідного впливу [4]

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n'(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i, \quad (1)$$

або в багатомірній комплексній площині [5]

$$\begin{aligned} Y(S_1, S_2, \dots) &= \sum_{n=1}^{\infty} H_n(S_1, \dots, S_n) \prod_{i=1}^n X(S_i) |_{S_i = j2\pi f_i}, \quad \forall i \in [1, 2, \dots] = \\ &= Y(f_1, f_2, \dots) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n(f_1, \dots, f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i) \end{aligned} \quad (2)$$

де $x(\cdot)$, $y(\cdot)$, $X(\cdot)$, $Y(\cdot)$ – відповідно, вхідний і вихідний сигнали і їх перетворення Лапласа (Фур'є);

$h_n'g(\cdot)$, $H_n(\cdot)$ – ядро Вольтера n -го порядку в часовій і в багатовимірній комплексній площині, відповідно (ядро Вольтера радіопристрою в багатовимірній комплексній площині зазвичай називають його нелінійною передавальною функцією (НПФ) n -го порядку);

$S_i(f_i)$ – аргумент багатовимірного перетворення Лапласа (Фур'є);

$j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця;

\forall – квантор спільності.

Проведемо аналіз впливу нелінійних процесів у РПП на показники якості БРЛС. Представимо вихідний сигнал вузькосмугового (по відношенню до несучої частоти) РПП у вигляді усіченого ряду Вольтера [4]

$$Y(f) \cong H_1(f)[S(f) + M(f)] + H_3(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 [S(f_i) + M(f_i)]. \quad (3)$$

Коли фазові шуми внаслідок амплітудно-фазової конверсії (АФК) у РПП із урахуванням властивості нелінійних функціоналів типу Вольтера (2), названого в математиці "однорідністю ступеню k " [2, 4], можуть бути визначені з формули такого вигляду [5]

$$\Delta\varphi = \arg\{H_3(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 [S(f_i) + M(f_i)]\}. \quad (4)$$

Використовуючи характеристики фазових шумів [2], знайдені з (4) за допомогою табл. 1 можна оцінити вплив АФК у РПП на показники якості БРЛС [5]. (Тут Θ_z – потенціальна ширина основного пелюстка синтезованої діаграми направленості (дозвільна здатність апертури (ДЗА)).

Фазовий шум зберігає значний рівень на досить великій відстані уздовж лінії шляху носія БРЛС, а також викликає суттєве розфазування когерентних БРЛС. Це призводить до незворотної втрати деякої частини інформації про вимірювані координати цілей, котрі знаходяться у фазі прийнятого радіолокаційного сигналу. З іншого боку, вплив фазових

шумів може бути зведений до зменшення максимуму, розширення і зміщення відносно центральної осі головного пелюстка діаграми спрямованості антени (табл. 1), а також до появи додаткових бічних пелюстків [6].

Отже, фазові шуми внаслідок АФК у РПП призводять до появи істотних координатних спотворень радіолокаційного зображення, а також до значного зниження його детальності і контрастності. Однак на основі результатів праць [1] не завжди представляється можливим точно і досить просто інтегрально оцінити вплив нелінійних процесів в реальних інерційних РПП безпосередньо на показники якості БРЛС [1]. Аналіз впливу нелінійних властивостей РПП на якість функціонування БРЛС проведений по відношенню до простих РП із введенням цілого ряду пропозицій і припущень для спрощення [3].

Таблиця 1

Вплив фазових шумів на характеристики синтезованої діаграми спрямованості ДЗА

Швидкість фазових шумів, (рад)	Розширення основного пелюстка, (частка Θ_3)	Відхилення осі основного пелюстка, (частка Θ_3)	Зменшення коефіцієнта передачі основного пелюстка, (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

Однак, якщо фазові шуми помітно впливають, в основному, на когерентні БРЛС, то амплітудні нелінійні спотворення погіршують функціонування практично всіх типів БРЛС (табл. 2) [2].

Таблиця 2

Класифікація основних факторів, що впливають на якість функціонування БРЛС

Основні фактори, що впливають на якість функціонування БРЛС	
Внутрішні чинники	Зовнішні чинники
Апаратурна надійність БРЛС	Апаратурна надійність БРЛС
Нестационарність в часі умов поширення радіохвиль	Нестационарність в часі умов поширення радіохвиль
Нестабільність параметрів БРЛС	Нестабільність параметрів БРЛС
Відхилення носія БРЛС від рівномірного прямолінійного руху	Відхилення носія БРЛС від рівномірного прямолінійного руху
Обмеженість динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв БРЛС	Обмеженість динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв БРЛС
Попадання перешкод на вхід радіоприймальних пристроїв БРЛС	Попадання перешкод на вхід радіоприймальних пристроїв БРЛС

Як наслідок, нелінійні властивості РПП проявляються у зменшенні рівня радіолокаційних сигналів і появі на виході БРЛС так званих "нелінійних шумів" – складових нелінійних спотворень у вихідному сигналі РПП [5].

Це призводить до зниження відношення сигнал/шум на виході РПП у порівнянні з указаним відношенням на його вході [1, 5]. Але у відомій літературі відсутні аналітичні

співвідношення, котрі дозволяють інтегрально враховувати вплив всіх нелінійних ефектів у РПП на зменшення вихідного відношення сигнал/шум [5]. У зв'язку з цим визначимо відносно зменшення коефіцієнта передачі РПП наступним чином

$$R(f) = 1 - \left| \frac{H_3(f_1, f_1, -f_1) \{S(f) [S(f_1)S(-f_1) + M(f_1)M(-f_1)]\}}{H_1(f) [S(f) + M(f)]} \right|. \quad (5)$$

Тоді нелінійний шум може бути описаний виразом вигляду

$$J(f) \left| \{H_3(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 [S(f_i) + M(f_i)]\}^* \right|, \quad (6)$$

де знак (*) означає, що в фігурних дужках формули (6) опущені складові, котрі враховані в чисельнику виразу (5). Неважко побачити, що формула (5) характеризує нелінійні явища типу блокування ("забиття") і зниження чутливості РПП, а вираз (6) описує перехресні та інтермодуляційні шуми [5, 7].

У процесі оцінювання показників якості БРЛС широко застосовується відношення сигнал/шум на вході РПП, котре зазвичай вважають лінійним [7]. Тому доцільно ввести поняття ефективного відношення сигнал/шум $\rho_{\text{эф}}(\cdot)$ на вході еквівалентно лінійного РПП [7]. Отже РПП умовно вважаємо лінійним із передавальною функцією $H_1(\cdot)$, а складові нелінійних спотворень необхідно перерахувати по відношення до його входу [2]. З урахуванням формул (5) та (6), а також одночасності появи таких нелінійних ефектів, як зниження коефіцієнта передачі РПП і виникнення нелінійних шумів, вираз для $\rho_{\text{эф}}(\cdot)$ має такий вигляд

$$\rho_{\text{эф}}(f) = \frac{|S(f)|R(f)}{|N_0(f) + M(f)| + J(f)/|H_1(f)|} = \rho(f)\gamma(f), \quad (7)$$

де $N_0(\cdot)$ – внутрішні шуми РПП, перераховані на його вхід ;

$\rho(f) = [|S(f)|/|N_0(f) + M(f)|]$ – миттєве відношення сигнал/шум на вході РПП;

$\gamma(f) = \frac{|N_0(f) + M(f)|R(f)}{|N_0(f) + M(f)| + J(f)/|H_1(f)|}$ – коефіцієнт погіршення відношення

сигнал/шум внаслідок нелінійності АХ РПП ($0 \leq \gamma \leq 1$).

Обґрунтування методики розрахунку фазових шумів внаслідок АФК у РПП і поняття ефективного відношення сигнал/шум на вході еквівалентно лінійного РПП дозволяє проводити системні дослідження по комплексній оцінці впливу нелінійних процесів у радіотехнічних системах (РТС) різного призначення на їх якісні характеристики [7]. Зокрема, дані результати можуть бути використані для розробки загальної теорії точності вимірювально-інформаційних РТС, дослідження ефективності систем зв'язку, а також широкого класу систем автоматичного керування [7, 8] з урахуванням їх нелінійних властивостей.

Застосуємо отримані результати для оцінки впливу нелінійності АХ РПП на показники якості БРЛС. Якщо дозвільна здатність БРЛС за параметром характеризується інтервалом дозволення $\Delta\alpha$, то відповідно до формули (7) можна отримати [3]

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_{\text{лін}} \gamma^{-1}(f). \quad (8)$$

Аналогічно з урахуванням формул (7) і (8) можна отримати такий вираз для СКП вимірювань параметра α [9]

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha_{ном}} \left[\left| \frac{N_0(f) + M(f)}{N_0(f)} \right| \frac{1}{\gamma(f)} \right]^2 = \sigma_{\alpha_{лін}} \gamma^{-2}(f). \quad (9)$$

Відомий вираз $D = \exp \left[\frac{\ln Q}{1+Q} \right]$ для визначення ймовірності правильного виявлення точкової цілі D за умови заданої ймовірності хибної тривоги Q включає відношення сигнал/шум. Тоді вплив нелінійності АХ РПП на ймовірність виявлення з урахуванням виразу (7) можна оцінити за допомогою такої формули

$$D = \exp \left[\frac{\ln Q}{1 - \rho^2(f) \gamma^2(f)} \right]. \quad (10)$$

Нелінійні процеси в РПП призводять також до погіршення інформаційних властивостей БРЛС внаслідок зниження дозвільної здатності і зменшення числа розрізнявальної градацій сигнальної функції. Оскільки БРЛС будуються, переважно, на основі РЛС [6, 9], необхідно провести оцінювання впливу нелінійності АХ РПП на максимальну кількість інформації, котру отримують РЛС за сеанс вимірювань. Із урахуванням виразу (8), у відповідності з [6], можна отримати

$$V = V_{лін} \gamma^2(f) \frac{\log_2 K}{\log_2 K_0} \cong V_{лін} \gamma^2(f), \quad (11)$$

де K , K_0 – необхідне і реально розрізнявальне число градацій сигнальної функції, відповідно.

Найважливішою характеристикою перешкодостійкості БРЛС є мінімальна дальність пригнічення. Тому з урахуванням формули (7) можна отримати співвідношення, що дозволяють оцінити вплив нелінійних процесів, котрі відбуваються в РПП, на мінімальну дальність пригнічення БРЛС [9]

$$L_{min} = L_{min\ лін} \gamma^{0.5}(f), \quad (12)$$

$$L_{min C} = L_{min C\ лін} \gamma(f). \quad (13)$$

В окремому випадку, коли станція перешкод розташована в центрі смуги огляду БРЛС, котра побудована на основі РЛС, площа зони пригнічення, з урахуванням формули (7), визначається наступним чином

$$\delta_n = \delta_{n\ лін} \gamma^{-2}(f). \quad (14)$$

Отримані вище результати свідчать про помітний вплив нелінійності АХ реальних РПП на показники якості БРЛС [2, 6]. Звідси випливає необхідність пригнічення нелінійних процесів, котрі мають місце в РПП, у першу чергу – зниження рівня нелінійних спотворень третього порядку.

Висновки

У рамках статті проведена оцінка обмеженості динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв на показники якості бортових радіосистем.

Урахування частотної залежності АХ (інерційності) РПП дозволило суттєво уточнити відомі результати по оцінюванню динамічного діапазону багатокаскадних РПП. Отримані результати є основою для оптимізації РПП за критеріями нелінійності і розроблення

методики узгодження багатокаскадних РПП БРЛС із вхідними впливами з урахуванням їх статистичних і спектральних властивостей.

Обґрунтоване поняття ефективного відношення сигнал/шум на вході еквівалентного лінійного РПП дозволило провести системний аналіз інтегрального впливу нелінійності АХ реальних РПП на показники якості БРЛС, а також визначити науково обґрунтовані вимоги до параметрів РПП виходячи з необхідних значень показників якості БРЛС.

Список використаної літератури

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
2. Обрезков Г. В. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике / Г. В. Обрезков, Ю.А. Евсиков, В.Д. Разевиг, В.В. Чапурский, В.М. Чиликин. – М.: В. школа, 1985. – 343 с.
3. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
4. Пупков К.А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко. – М.: Наука, 1978. – 448с.
5. Isidori A. Nonlinear control systems. Springer, 1995. 549 p.
6. Toczunbo Ogunfunmi. Adaptive Nonlinear System Identification (The Volterra and Wiener Model Approaches). Santa Clara, California, USA, 2007, 229 p.
7. Mark R Dunn. The Volterra Series and its Application. Calif., Davis., USA, 2013. 268 p.
8. Зюко А. Г. 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.
9. Радиотехнические системы / Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
10. Богданович Б. М. Радиоприемные устройства / Б. М. Богданович, Н. И. Окулин. – Минск: В. школа, 1991. – 428 с.

Автор статті

Гаврилко Євген Володимирович – доктор технічних наук, с.н.с, професор кафедри Телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Шефер Олександр Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та електропривода, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна.

Author of the article

Gavrylko Yevhen Volodymyrovych – sciences doctor (technic), professor of Department of Telecommunication systems, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Shefer Oleksandr Vitaliiovych – candidate of science (technic), associate professor, associate professor of Automation and Electric Drive Department, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 15.10.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. С. В. Козелков