Г. Д. Братченко, д.т.н., І. С. Сеніва, В. Б. Лубманенко, Г. А. Губернатор

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ ШИРОКОСМУГОВИХ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ

В статті розглядаються особливості методів вимірювання нелінійних спотворень широкосмугових складних сигналів, проводиться числове моделювання процесу вимірювання спотворень складних широкосмугових радіоімпульсів. Результати моделювання можуть застосовуватись при обґрунтуванні вибору методу вимірювання спотворень таких сигналів.

Ключові слова: математична модель, широкосмугові складні сигнали, спотворення сигналів, вимірювання спотворень.

У сучасних системах зв'язку існують дві основні причини виникнення нелінійних спотворень. Одна з них пов'язана з нелінійною залежністю амплітудно-частотної характеристики від рівня вхідного сигналу. Інша причина пов'язана з нерівномірністю залежності фазової характеристики від частоти вхідного сигналу [1].

У широкосмугових системах ці ефекти можуть породжувати чотири типи спотворень: гармонійні спотворення; спотворення, обумовлені перехресною модуляцією; фазові та інтермодуляційні спотворення. Кожне з них має своє джерело, але всі вони впливають на вхідний сигнал [1].

Широке застосування в радіолокації та в системах радіозв'язку широкосмугових (ШС) складних НВЧ сигналів потребує удосконалення методів і приладів для вимірювання спотворень таких сигналів як при їх випромінюванні, так і при обробці у приймальному тракті [2, 3].

Для вимірювання спотворень складних (широкосмугових) імпульсних сигналів в діапазоні надвисоких частот можуть бути використані осцилографи та аналізатори спектра [3]. Крім цього можуть застосовуватись спеціально розроблені прилади, що реалізують методи вимірювання параметрів спотворень таких сигналів [2].

Переваги і недоліки відомих аналогових і дискретних методів вимірювання внутрішньоімпульсних спотворень широкосмугових частотно-модульованих (ЧМ) радіоімпульсів аналізуються в [2]. Розглянуті в [2] методи здебільшого призначені для вимірювання спотворень параметрів лінійно-частотно-модульованих (ЛЧМ) радіоімпульсів та їх періодичних послідовностей. Найбільш перспективними, з точки зору точності вимірювання модуляційних спотворень ЧМ сигналів, зазначені методи: імпульсно-фазової дискретизації, можливості яких обмежуються тільки швидкодією цифрової техніки; метод диферен-

ціюючого чотириполосника, в якому диференціювання залежності зміни миттєвої частоти радіоімпульсу виконується за допомогою лінії затримки та змішувача з подальшим виділенням з отриманого сигналу інформації на проміжній частоті.

У [4] для вимірювання спотворень сигналу в приймальному тракті застосовується метод диференціюючого чотириполосника, а також статистична оцінка відмінності вихідного спотвореного сигналу $u(t)$ від ідеального $u_{ид}(t)$ шляхом порівняння нормованих автокореляційної функції (АКФ) ідеального і взаємнокореляційної функції (ВКФ) спотвореного з ідеальним сигналом. Для кількісної оцінки спотворень сигналів в каналах зв'язку використано середньоквадратичне значення їх різниці - середньоквадратична

помилка $\varepsilon_{\Delta p}^2 = \frac{1}{N} \sum_i (\Delta p(i))^2$. Така оцінка є універсальною щодо форми ШС радіоімпульсів і зручною для допускового контролю ступеня спотворень таких сигналів.

Однак, з точки зору метрологічної простежуваності показника спотворень складного сигналу, бажано забезпечити його подібність до загальноприйнятого у разі вимірювання спотворень періодичних сигналів коефіцієнту гармонік [5]. У [6] запропоновані два показники якості для оцінки спотворень різних видів широкосмугових складних імпульсних сигналів:

$$K_r = \left| \vec{U}_{\text{вих}} - k \vec{U}_{\text{вих}0} \right| / \left| k \vec{U}_{\text{вих}0} \right|, \quad (1)$$

де $\vec{U}_{\text{вих}}$ - вектор відліків обвідної сигналу на виході узгодженого фільтра (УФ) приймача при збігові максимумів спотвореного й неспотвореного сигналів, k - відношення значень цих максимумів;

$$K_p = \sqrt{1 - \rho_{\max}^2}, \quad (2)$$

де $\rho_{\max}$ - максимальне значення коефіцієнта взаємної кореляції обвідної сигналу з очікуваною (ідеальною) у вікні спостереження.

Числові значення цих безрозмірних показників мало відрізняються при порівняно малих фазових спотвореннях, і за своєю фізичною суттю вони близькі до коефіцієнта гармонік [6]. Такі показники можуть бути застосовані при побудові засобів вимірювання спотворень складних ШС радіоімпульсів.

Метою роботи є удосконалення математичної моделі для дослідження кількісних оцінок точності вимірювання спотворень ШС сигналів та отримання результатів моделювання вимірювання спотворень ШС ЛЧМ радіоімпульсу методами, що застосовують показники (1) і (2).

В моделі передбачається необхідність багатоканальної реалізації для випадку, коли спотворення ШС сигналу призводять до зсуву обвідної ВКФ на виході детектора обвідної (ДО) (рис. 1). Спотворення вводяться в сигнал як шляхом його додаткової модуляції (мультиплікативні завади), так і додаванням шумів до вхідного сигналу (адитивні завади).

Рисунок 1 – Структурна схема математичної моделі для дослідження засобу вимірювання спотворень широкосмугового складного сигналу

Удосконалена порівняно з [6, 7] математична модель дозволяє багаторазово відтворювати реалізації процесу вимірювання амплітудно-фазових спотворень ШС сигналу за наявності шумів. Оскільки сучасна обробка сигналів зазвичай виконується у цифровому вигляді, в подальшому передбачається також дослідження впливу нестабільностей формування дискретних відліків сигналу (джитер). Таким чином можуть досліджуватись статистичні характеристики результатів вимірювання коефіцієнтів K_T і K_p з отриманням гістограм їх розподілу, точкових та інтервальних оцінок в залежності від ступеня впливу адитивної та мультиплікативної завади. Для ілюстрації можливостей моделі методом Монте-Карло моделюється вимірювання детермінованих фазових спотворень ЛЧМ сигналу при фіксованих значеннях індексу гармонічної фазової модуляції та відношеннях сигнал-шум.

Моделювання узгодженої фільтрації сигналу виконується в частотній області із застосуванням швидкого перетворення Фур'є. Додатково може застосовуватись вагова обробка сигналу фільтром Хемінга. При цьому й зразковий сигнал є

результатом УФ та додаткової фільтрації за Хемінгом.

Виконано математичне моделювання вимірювання коефіцієнтів K_T і K_p у разі фазового спотворення ЛЧМ радіоімпульсу тривалістю 13,65 мкс і дев'ятією частоти 150 МГц детермінованим сигналом $\varphi(t) = M_\varphi \cos(2\pi f_M t + \pi/2)$, де $f_M = 105$ кГц, індексах фазової модуляції $M_\varphi = 0, 0,1, \dots, 1$, відношеннях сигнал-шум $q^2/2 = (20, 30, \dots, 120)$ дБ. Відліки шуму на вході УФ задавалися δ -корельованими і розподіленими за нормальним законом з нульовим середнім та дисперсією відповідно до потрібного значення відношення сигнал-шум.

За результатами моделювання отримано залежності впливу адитивних шумів на вході УФ при фіксованих значеннях M_φ від 0 до 1. Початкова фаза закону спотворення $\varphi(t)$ задавалася рівною $\pi/2$, оскільки за результатами попереднього моделювання саме при такому значенні коефіцієнти K_T і K_p досягають максимуму [7].

Їх залежність від зміни початкової фази $\varphi(t)$ є близькою до гармонічної, тому порівняно невеликі відхилення початкової фази від $\pi/2$ мало впливатимуть на ступінь спотворення сигналу.

Оскільки кожен з відліків сигналу у суміші із гаусівським шумом на виході лінійного детектора матиме розподіл за узагальненим законом Релея [8], тому закони розподілу коефіцієнтів K_r і K_p , які визначаються за формулами (1) та за уточненою порівняно з (2) формулою (у припущенні рівності енергій зразкового та вимірюваного сигналів [8])

$$K_p = \sqrt{2 - 2 \cdot \rho_{\max}}, \quad (3)$$

теоретично обчислити складно (ураховуючи, що значення параметру a цього розподілу для різних відліків мають відмінні значення). В той же час, результати імітаційного моделювання вказують, що закони розподілу вимірів значень коефіцієнтів K_r і K_p є близькими до нормального закону (наприклад, див. рис. 2, в K_{r1} індекс 1 відповідає випадку вимірювання спотворень прямокутного ЛЧМ радіоімпульсу без вагової обробки, а індекс 2 в K_{r2} застосовується в подальшому для випадку додаткової фільтрації за Хемінгом).

Це дозволяє застосовувати апроксимацію нормальним законом результатів вимірювання коефіцієнтів K_r і K_p з параметрами, отримани-

ми за результатами статистичної обробки серії вимірів.

Рисунок 2 – Гістограма розподілу ймовірностей за сукупністю зі 101 виміру коефіцієнта K_{r1} та його апроксимація нормальним законом розподілу за експериментальними оцінками математичного сподівання і дисперсії ($q^2/2=40$ дБ)

Середнє значення є оцінкою математичного сподівання, експериментальне СКВ – оцінкою СКВ. Модель дозволяє отримувати залежності середніх значень вимірів коефіцієнтів спотворень, їх абсолютної та відносної похибок при різних відношеннях сигнал-шум для детермінованих і випадкових фазових та амплітудних спотворень ШС радіоімпульсів.

Отримані за 101 реалізацією результати моделювання представлені на рис. 3, а – г і рис. 4, а – г.

Рисунок 3 – Залежності значень вимірів коефіцієнтів K_{r1} , K_{r2} , K_{p1} , K_{p2} від відношення сигнал/шум при

$M_{\varphi} = 0,1$: а) оцінки математичного сподівання (вибіркового середнього) m_{K_r} , m_{K_p} , %;

б) оцінки абсолютної похибки вимірювання $\Delta_{0,95} = 1,96 \cdot S_K$ ($P = 0,95$), де S_K - вибіркве СКВ, %;

в), г) відносної похибки вимірювань $\delta_K = \Delta_{0,95}/m_K$, %

Рисунок 4 – Залежності значень вимірів коефіцієнтів K_{r1} , K_{r2} , K_{p1} , K_{p2} від відношення сигнал/шум при $M_\varphi = 0,4$: а) оцінки математичного сподівання (вибіркового середнього) m_{K_r} , m_{K_p} , %; б) оцінки абсолютної похибки вимірювання $\Delta_{0,95} = 1,96 \cdot S_K$ ($P = 0,95$), де S_K - вибіркове СКВ, %; в), г) відносної похибки вимірювань $\delta_K = \Delta_{0,95}/m_K$, %

Залежності коефіцієнтів K_r і K_p для двох розглянутих випадків вимірювання спотворень ШС ЛЧМ сигналу, які отримані для трьох значень відношення сигнал-шум, дають уяву про їх зміну в залежності від ступеня фазових гармонічних спотворень сигналу (рис. 5).

Як видно з графіків а) і б), значення коефіцієнтів K_r і K_p збігаються лише на обмеженій ділянці при малих значеннях M_φ . Такі залежності можуть бути використані при градуванні шкал ЗВ вказаних коефіцієнтів. Збільшення рівня власних шумів ЗВ (рис. 5, в) призводить до спотворення показів, що особливо відчутно при малих M_φ . Коректне урахування їх впливу в процесі вимірювання коефіцієнтів спотворень потребує додаткового дослідження.

Висновки

Розроблена математична модель процесу вимірювання спотворень складних широкосмугових радіоімпульсів, яка дозволяє досліджувати різноманітні показники для вимірювання амплітудно-фазових спотворень таких сигналів, в тому числі в умовах впливу адитивних шумів з використанням запропонованих у [6] коефіцієнтів. Використання уточнення співвідношення для обчислення коефіцієнта K_p у розглянутому діапазоні зміни коефіцієнтів не веде до суттєвих змін, хоча дещо зближує значення відповідних коефіцієнтів K_r або K_p в межах їх зміни від 0 до 0,1.

Рисунок 5 – Залежності коефіцієнтів K_r і K_p від індексу модуляції фазового гармонічного спотворення широкосмугового ЛЧМ сигналу: а) при відношенні сигнал-шум 120 дБ; б) при відношенні сигнал-шум 60 дБ; в) при відношенні сигнал-шум 20 дБ;

Отримані результати математичного моделювання можуть бути використані для попередньої оцінки якісних характеристик методу та засобу для вимірювання спотворень складних широкополосних імпульсних сигналів за значеннями коефіцієнтів K_r або K_p . Як видно з результатів моделювання, перевагу слід віддати коефіцієнту K_r , який є більш чутливим до зміни дестабілізуючих факторів та має меншу систематичну похибку зумовлену власними шумами засобу вимірювання.

Список використаних джерел

1. Стив Петтис. Воспроизводимое измерение искажений, связанных с нелинейными свойствами широкополосных систем связи / Стив Петтис, Пит Зайсел // Электронные компоненты. – 2009. – № 10. – С. 31-33.
2. Батурич Н. Г. Измерение параметров линейно-частотно-модулированных сигналов и их стабильностей / Н. Г. Батурич, В. И. Гомозов, А. В. Зюзин. – М.: Вузовская книга, 2011. – 176 с.
3. Измерение широкополосных сигналов РЛС и спутниковых систем связи. – Режим доступа к статье: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-6353RURU.pdf>.
4. Лошаков В. А. Компьютерный комплекс для анализа искажений сигналов в каналах связи / В. А. Лошаков, С. М. Бобрицкий, В. В. Сидоров // Радиотехника. – 2008. – Вып. 155. – С. 246-249.
5. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань: навч. посіб. для студ. ВНЗ / Ю. Ф. Павленко, І. П. Захаров, С. І. Кондратов, В. К. Гусельніков; за ред. Ю. Ф. Павленка – Х. : Вид-во «Підручник НТУ «ХП».- 232 с.
6. Братченко Г. Д. Метод измерения нелинейных фазовых искажений широкополосного линейно-частотно-модулированного радиоимпульса / Г. Д. Братченко, В. В. Скачков, И. В. Кушнир // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 06 (82). – С. 158 – 163.
7. Братченко Г. Д. Особливості методу та прилад для вимірювання спотворень широкополосних складних сигналів в інформаційно-вимірювальних РТС / Г. Д. Братченко Г. Г. Смаглюк, В. Б. Лубманенко // Інформаційно-вимірювальні технології в метрології, технічне регулювання та менеджмент якості: матеріали Третьої Всеукраїнської НПК (Одеса, 30-31 травня 2013 р.) / Одеська державна академія технічного регулювання та якості. – Одеса, 2013. – С. 107 – 109.
8. Заездный А. М. Основы расчетов по статистической радиотехнике / А. М. Заездный. – М.: Издательство «Связь», 1969. – 447 с.

Надійшла до редакції 28.10.2013

Г. Д. Братченко, д.т.н., И. С. Сенива, В. Б. Лубманенко, Г. А. Губернатор

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассматриваются особенности методов измерения нелинейных искажений широкополосных сложных сигналов, проводится численное моделирование процесса измерения искажений сложных широкополосных радиоимпульсов. Результаты моделирования могут применяться при обосновании выбора метода измерения искажений таких сигналов.

Ключевые слова: математическая модель, широкополосные сложные сигналы, искажения сигналов, измерения искажений.

H. D. Bratchenko, DSc, I. S. Seniva, V. B. Lubmanenko, H. A. Gubernator

NUMERICAL MODELING OF MEASUREMENT OF DISTORTIONS OF WIDEBAND SIGNALS

The features of methods for measuring of distortions of wideband signals are discussed. Mathematical modeling of distortions of wideband radiopulses and its measurement are executed. Results of modeling can be used for selection of method for measuring of distortions of such signals.

Keywords: mathematical model, the wideband signal, distortion, distortion measurement.