

УДК 621.396.96

С.В. Козелков, С.М. Кучерук

ГП «Центрального науково-дослідницького інституту навігації та управління», Київ

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ "НЕЛИНЕЙНЫХ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ"

Эффективность функционирования радиотехнических систем зависит от качества приема радиосигналов. Учет нелинейных искажений информационного сигнала позволит повысить качество работы радиосистемы. В связи с этим в статье представлены направления повышения качества функционирования многокаскадных радиоприемных устройств с учетом нелинейных искажений сигнала.

Ключевые слова: радиоприемные устройства, нелинейный входной сигнал.

Введение

На современном этапе развития общества существующие радиосистемы используются во многих областях науки и техники. Анализ литературы показал и практика подтвердила, что на вход приемного устройства поступает большое количество электромагнитных колебаний, из числа которых необходимо выделить полезный сигнал [1]. Однако одновременное функционирование большого количества радиотехнических систем приводит к сложной радиоэлектронной обстановке (РЭО), которая приводит к появлению "нелинейных входных сигналов", что влияет на качество приема. В связи с этим возникает задача провести исследования радиосистем и определить возможность выделения полезного сигнала из принимаемой совокупности сигналов и помех, что и является **целью** данной статьи.

Изложение основного материала

Проведем конструктивный анализ влияния ограниченности динамического диапазона радиоприемного устройства (РПУ) в следствии нелинейности его амплитудных характеристик (АХ) на качество функционирования радиотехнических систем (РТС) в условиях РЭО. Анализ литературы [1 – 3] показал, что одним из направлений учета нелинейных характеристик является применение функциональных рядов. Поэтому одной из первых задач, возникающих в этой связи, является дальнейшее развитие теоретических основ функционального метода и расширение области его практической применимости. С этой целью обобщим один из наиболее дивных для радиотехнических приложений метод определения с помощью "нелинейных токов" [3] на более широкий класс многомерных радиоприемных устройств. Отметим, что термин "нелинейный ток" был введен на уравнений частного вида [4], причем размерность электрического тока и "нелинейных токов" совпадала [3]. Учитывая, что в общем случае это условие не выполняется, а также для того, чтобы подчеркнуть, что рассматривается более широкий

класс РПУ, введем новый термин – "нелинейные входные сигналы", являющиеся обобщением понятия "нелинейных токов" [4]. При этом размерность "нелинейных входных сигналов" определяется из конкретных условий задачи [5, 6].

Определим "нелинейные входные сигналы" для многомерных РПУ, описываемых дифференциальным уравнением вида [3, 5]

$$\sum_{i=1}^k x_i = \sum_{j=0}^{\infty} a_j \frac{d^j y}{dt^j} + \sum_{l=2}^{\infty} b_l y^l, \quad (1)$$

где x_i – i -й входной сигнал, причем точки приложения входных сигналов, в общем случае, не совпадают.

Здесь и далее для сокращения записи опускаем зависимость сигнала и величин от времени (комплексных переменных). Для наглядности положим $k = 2$, а затем распространим полученный результат на более общий случай. Разложив y в двойной ряд

Вольтерра $y = \sum_{m,r=0}^{\infty} y_{m,r}$, подставим в формулу (1).

Приравнявая члены, содержащие $x_{(1)}$ ($x_{(2)}$) в одинаковой степени, получим следующие выражения для "нелинейных входных сигналов" второго и третьего порядков [2]

$$\begin{aligned} x_{20} &= 2b_2 y_{10}^2; & x_{02} &= 2b_2 y_{01}^2; & x_{11} &= 2b_2 y_{10} y_{01}; & (2) \\ x_{30} &= 2b_2 y_{10} y_{20} + b_3 y_{10}^3; \\ x_{03} &= 2b_2 y_{01} y_{02} + b_3 y_{01}^3; \\ x_{21} &= 2b_2 (y_{01} y_{20} + y_{10} y_{11}) + 3b_3 y_{10}^2 y_{01}; & (3) \\ x_{12} &= 2b_2 (y_{10} y_{02} + y_{01} y_{11}) + 3b_3 y_{10} y_{01}^2. \end{aligned}$$

Используя аналогичные рассуждения для общего случая K входных сигналов, после соответствующих преобразований, формулы для "нелинейных входных сигналов" могут быть получены в следующем виде [4]

$$x_{n_1, \dots, n_k} = \sum_{m=2}^n b_m y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k}; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k n_i = n; \quad \sum_{i=1}^k m_i = m; \quad m_i \leq n_i; \quad i = 1, 2, \dots, k;$$

$$y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k} = \sum_{\substack{j=1 \\ \sum_{i=1}^k i_j = n-m+1}}^k y_{i_1, \dots, i_k} y_{n_1-i_1, \dots, n_k-i_k; m'_1, \dots, m'_k} \quad (5)$$

причем $\sum_{i=1}^k m'_i = m-1, \quad n_j - i_j \geq m'_j;$

$$y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k} \left| \begin{array}{l} = g \prod_1^m y_{i_1, \dots, i_k}, \\ m_i = n_i, \sum_{i=1}^k m_i = m_1, \end{array} \right. \quad \sum_{j=1}^k i_j = 1; \quad (6)$$

$$y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k} \left| \begin{array}{l} = (m-1)g \left(\prod_1^{m-2} y_{i_1, \dots, i_k} \right) y_{j_1, \dots, j_k}, \\ \sum_{j=1}^k m_j = \left(\sum_{j=1}^k n_j \right) - 1; \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^k i_l = 1; \quad \sum_{l=1}^k j_l = 2; \quad \sum_{l=1}^k n_l = m;$$

$$y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k} \left| \begin{array}{l} = y_{n_1, \dots, n_k}, \\ \sum_{j=1}^k m_j = 1, \sum_{j=1}^k n_j = n, \end{array} \right. \quad (8)$$

В выражениях (6), (7) g – коэффициент, определяемый числом различных сомножителей в $\prod_1^m (\cdot)$ и равный коэффициенту при соответствующем члене в развернутой записи $\left(\sum_{i=1}^k e_i \right)^m$, где e_i – произвольные, неравные между собой, величины. Символ $\prod_1^m y_{i_1, \dots, i_k}$ означает, что перемножаются m величин вида $y_{i_1, \dots, i_k} \left| \sum_{j=1}^k i_j = 1 \right.$, причем сумма индексов i_j при различных u должна быть равна m_i для $j = 1, 2, \dots, k$. Символ $\prod_1^{m-2} y_{i_1, \dots, i_k}$ имеет аналогичное значение с тем отличием, что перемножаются $(m-2)$ таких элементов, а результат умножается на y_{j_1, \dots, j_k} при $\sum_{e=1}^k j_e = 2$, причем в итоге должно получиться $e=1$ y_{m_1, \dots, m_k} . Кроме того, все возможные варианты таких произведений суммируются.

Определим "нелинейные входные сигналы" для класса одномерных РПУ, описываемых дифференциальным уравнение следующего вида [5]:

$$\sum_{j=0}^{\infty} a_j \frac{d^j y}{dt^j} + \sum_{k=2}^{\infty} C_k (x+y)^k = \sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n. \quad (9)$$

Разложив y в ряд Вольтера: $y = \sum_{n=1}^{\infty} y_n$, подставим

в формулу (9). Приравнявая члены, содержащие x в одинаковой степени, получим следующие выражения для "нелинейных входных сигналов" второго и третьего порядков [3 – 5]

$$x_2 = b_2 x^2 - C_2 (x + y_1)^2; \quad (10)$$

$$x_3 = b_3 x^3 - C_3 (x + y_1)^3 - 2C_2 y_2 (x + y_1). \quad (11)$$

Из выражений (10), (11) следует, что нелинейные элементы по виду сигнала на их входе могут быть разделены на два класса [2]. На вход нелинейных элементов 1 класса воздействует сигнал Z_y , представляющий собой, в общем случае, произвольное нелинейное преобразование от смеси сигналов x и y (для уравнения (9) $y = x + y$). При этом для элементов 1 класса выражение для "нелинейных входных сигналов" имеет следующий вид [4, 5]:

$$x_n^1 = \sum_{m=2}^n C_m Z_{y_{n,m}}, \quad (12)$$

где C_m – коэффициент m -го порядка разложения характеристики нелинейного элемента 1 класса в ряд Вольтера (Тейлора);

$$Z_{y_{n,m}} = \sum_{i=1}^{n-m+1} Z_{y_{n-i,m-1}} Z_{y_i}, \quad (13)$$

$$Z_{y_{m,m}} = Z_{y_1}^m; \quad Z_{y_{m,m-1}} = (m-1) Z_{y_1}^{m-2} Z_{y_2}; \quad Z_{y_{m,1}} = Z_{y_m}.$$

На вход нелинейных элементов 2 класса поступает сигнал Z_x , являющийся, в общем случае, произвольным линейным преобразованием их сигнала x (для уравнения (9) $Z_x = x$). "Нелинейные входные сигналы" от элементов 2 класса определяются следующим образом [3, 4]

$$x_n^2 = b_n Z_x^n, \quad (14)$$

где b_n – коэффициент n -го порядка разложения характеристики нелинейного элемента 2 класса в ряд Вольтера (Тейлора).

Объединяя выражение (4) с формулами (12), (14) получим рекуррентные выражения для "нелинейных входных сигналов" широкого класса многомерных нелинейных РПУ. Для нелинейных элементов 1 класса имеем [2]

$$x_{n_1, \dots, n_k}^1 = \sum_{m=2}^n C_m Z_{y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k}}, \quad (15)$$

где $Z_{y_{n_1, \dots, n_k; m_1, \dots, m_k}}$ определяется по формуле (5) с заменой y на Z_y .

Для нелинейных элементов 2 класса [2]:

$$x_{n_1, \dots, n_k}^2 = b_n g \prod_1^n Z_{x_{i_1, \dots, i_k}}; \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^k n_j = n; \quad \sum_{j=1}^k i_j = 1.$$

Пусть исследуемое нелинейное РПУ описывается системой неоднородных уравнений состояния, которая в матричной форме записи имеет [4, 5]

$$[a][y] = [b][x], \quad (17)$$

где $[a] = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$ – матрица коэффициентов

системы уравнений состояния; $[y] = \begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(n) \end{bmatrix}$ – матрица-столбец переменных состояния (координат

РПУ); $[b][x] = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{1n} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(n) \end{bmatrix}$ – матрица вход-

ных воздействий; a_{ij}, b_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) – произвольные нелинейные аналитические операторы.

Отсюда нелинейная передаточная функция (НПФ первого порядка) РПУ определяется выражением следующего вида [3, 5, 7]

$$[H_1] = [a^*]^{-1} [b^*] [1]. \quad (18)$$

НПФ n -го ($n = 2, 3, \dots$) порядка находятся из следующей формулы [5]

$$[H_n] = [a^*]^{-1} [F_n] = [a^*]^{-1} \{ [F_n^{\text{II}}] - [F_n^{\text{I}}] \}. \quad (19)$$

В выражениях (18), (19) $[H_m]$ – матрица НПФ m -го ($m = 1, 2, \dots$) порядка; $[1]$ – единичная матрица; $[F_n][x]^n = [x_n]$ – матрица "нелинейных входных сигналов" 2-го порядка, каждый из которых записывается в строках матрицы $[F_n]$ с такими же номерами, как и строки матрицы $[a]$, где находятся нелинейные элементы, порождающие данные "нелинейные входные сигналы". Звездочка (*) означает ассоциированную линейную часть соответствующей матрицы, т.е. линейные элементы исходной матрицы остаются, а на месте ее нелинейных элементов стоят только их линейные составляющие из разложения характеристик данных элементов в ряд Вольтерра (Тейлора) [6]. Отметим, что при определении НПФ

m -го порядка матрица $[a^*]^{-1}$ является функцией суммы m комплексных переменных, т.е. [6, 7]

$$[a^*]^{-1} = [H^*] \equiv [H^*(S_1 + \dots + S_m)]. \quad (20)$$

Выводы

Из изложенного выше следует, что метод "нелинейных входных" позволяет исследовать РПУ, описываемые весьма сложными нелинейными операторными уравнениями достаточно общего вида [6]. Так как обращенные нелинейные аналитические операторы характеризуются уравнениями такого типа [7], то целесообразно использовать метод "нелинейных входных сигналов" для определения его ядер Вольтерра.

Список литературы

1. Апорович А.Ф. Проектирование радиотехнических систем / А.Ф. Апорович. – Мн.: Вышэйшая школа, 1988. – 221 с.
2. Князев А.Д. Проблемы обеспечения совместной работы радиоэлектронной аппаратуры / А.Д. Князев, В.Ф. Пчёлкин. – М.: Сов. радио, 1971. – 200 с.
3. Богданович Б.М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах / Б.М. Богданович. – М.: Связь, 1980. – 280 с.
4. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике // Под ред. Г.В. Обрезкова. – М.: Высшая школа, 1985. – 343 с.
5. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
6. Пупков К.А. Анализ и расчет нелинейных систем с помощью функциональных степенных рядов / К.А. Пупков, Н.А. Шмыкова. – М.: Машиностроение, 1982. – 150 с.
7. Тихонов В.И. Нелинейные преобразования случайных процессов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.

Поступила в редколлегию 1.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИБОРІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ «НЕЛІНІЙНИХ ВХІДНИХ СИГНАЛІВ»

С.В. Козелков, С.М. Кучерук

Ефективність функціонування радіотехнічних систем залежить від якості прийому радіосигналів. Облік нелінійних спотворень інформаційного сигналу дозволить підвищити якість роботи радіосистеми. У зв'язку з цим в статті представлені напрямки підвищення якості функціонування багатокаскадних радіоприймальних пристроїв з урахуванням нелінійних спотворень сигналу.

Ключові слова: радіоприймальні пристрої, нелінійний вхідний сигнал.

METHOD OF DETERMINATION OF NONLINEAR FUNCTIONS OF TRANSMISSIONS FOR RADIORECEPTION DEVICES ON BASIS OF THE USE OF "NONLINEAR SIGNALS OF ENTRANCES"

S.V. Kozelkov, S.M. Kucheruk

Efficiency of functioning of the radio engineering systems depends on quality of adopting radio signals. The account of nonlinear distortions of informative signal will allow to promote quality of work of radiosystem. In connection with these in the article are presented directions of upgrading functioning of multistage radioreception devices taking into account nonlinear distortions of signal.

Keywords: radioreception devices, nonlinear entrance signal.