

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ МНОГОМЕРНЫХ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ "НЕЛИНЕЙНЫХ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ"

**Moroz I.V., Zaika V.F., Kozelkov S.V. The method for determining the non-linear transfer function of the multi-dimensional radio receivers onboard radar stations through the use of "non-linear input signals".** The article deals specific features of function on-board radar satellites for Earth remote sensing. It is shown the inclusion of non-linear distortion in radio receivers and the development of effective methods of dealing with them has particular importance for the improvement of radio equipment for spacecraft. The necessity of improvement of the functional method of accounting for non-linear distortion in radio receivers was identified because the area of its practical applicability is essentially limited of a very high complexity of the known algorithms for finding Volterra kernels.

The new algorithm for finding the kernels of Volterra nonlinear transfer function of multi-dimensional radio receivers on board radars, which are determined with the required accuracy without cumbersome solutions of matrix equations of high order, was offered. The proposed method of definition of "non-linear input signals" can significantly expand the scope of practical application of the functional method and improve its ability to conduct meaningful studies of radio receivers.

**Keywords:** on-board radar, Earth remote sensing, nonlinear transfer function, radio receivers, Volterra kernels

**Мороз І.В., Заїка В.Ф., Козелков С.В. Метод визначення нелінійної передаточної функції багатомірних радіоприймальних пристроїв бортових радіолокаційних станцій на основі використання "нелінійних вхідних сигналів".** В статті розглянуто специфічні особливості функціонування бортових радіолокаційних станцій космічних апаратів дистанційного зондування Землі. Визначена необхідність удосконалення функціонального методу урахування нелінійних спотворень у радіоприймальних пристроях та запропонований новий алгоритм визначення ядер Вольєрра нелінійної передаточної функції багатомірних радіоприймальних пристроїв бортових радіолокаційних станцій.

**Ключові слова:** бортова радіолокаційна станція, дистанційне зондування Землі, нелінійна передаточна функція, радіоприймальний пристрій, ядро Вольєрра.

**Мороз И.В., Заика В.Ф., Козелков С.В. Метод определения нелинейной передаточной функции многомерных радиоприемных устройств бортовых радиолокационных станций на основе использования "нелинейных входных сигналов".** В статье рассмотрены специфические особенности функционирования бортовых радиолокационных станций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Определена необходимость усовершенствования функционального метода учета нелинейные искажений в радиоприемных устройствах и предложен новый алгоритм нахождения ядер Вольєрра нелинейной передаточной функции многомерных радиоприемных устройств бортовых радиолокационных станций.

**Ключевые слова:** бортовая радиолокационная станция, дистанционное зондирование Земли, нелинейная передаточная функция, радиоприемное устройство, ядро Вольєрра.

### Введение

Обеспечение национальной независимости и суверенитета любого государства базируется на постоянном повышении его экономического потенциала и благосостояния населения. В современном информационном обществе особую актуальность приобретают вопросы использования космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) двойного назначения, которые позволяют оптимизировать финансовые затраты при существенном повышении полноты и оперативности предоставления заинтересованным национальным потребителям необходимой информации как коммерческого, так и оборонного характера.

При этом наиболее эффективным оказывается использование радиотехнических систем (РТС) космических аппаратов (КА), которые реализованы в виде бортовых радиолокационных систем (БРЛС) и позволяют осуществлять ДЗЗ независимо от времени

суток и метеоусловий районів зондирования. Однако, необходимость гарантированного выполнения задач, обеспечивающих национальную безопасность, а также наличие искусственных непреднамеренных помех [1] и возможность целенаправленного радиоподавления РТС КА [2] выдвигают повышенные требования к качеству функционирования БРЛС в этих условиях.

Вместе с тем, разработка рекомендаций, связанных с повышением разрешающей способности, точности измерений и вероятности правильного распознавания точечных радиолокационных объектов БРЛС КА, возможна лишь на основе усовершенствованного научно-методологического аппарата, который позволит учитывать нелинейные искажения в радиоприемных устройствах (РПУ) [3]. Таким образом, вопросы исследования влияния нелинейных процессов в РПУ на показатели качества функционирования БРЛС КА определяют актуальность и цель данной статьи.

### **Специфические особенности функционирования БРЛС КА ДЗЗ**

Как известно, учет нелинейных искажений в РПУ и разработка эффективных методов борьбы с ними имеют особое значение для совершенствования РТС [4]. В частности, уменьшение уровня интермодуляционных искажений в РПУ всего на 1 дБ позволит снизить минимальный порог уверенного приема с нескольких мВ до единиц мкВ, что эквивалентно увеличению дальности уверенного приема РТС коротковолновой связи более чем на 1000 км [5]. Поэтому разработка и создание РПУ с широким динамическим диапазоном является одной из важнейших задач современной радиоэлектроники [6].

Однако применительно к БРЛС ДЗЗ сложность данной задачи существенно возрастает в следствие ряда специфических особенностей их РПУ, основные из которых заключаются в следующем.

1. Применение БРЛС ДЗЗ предполагает их функционирование в условиях существенных радиоэлектронных помех (РЭП), что может быть объяснено, в частности, одновременной работой значительного количества РТС, несоблюдением принятых в настоящее время регламентов и ограничений, а также мощными электромагнитными сигналами современных РТС. При этом ожидаемый динамический диапазон помех в ряде случаев может достигать 120÷140 дБ и более [1]. Однако БРЛС КА должны с высокой точностью измерять параметры радиолокационных сигналов, амплитуда которых может изменяться по априорно неизвестному закону в значительном динамическом диапазоне, составляющем 40÷60 дБ. Поскольку ширина линейного динамического диапазона большинства применяемых РПУ БРЛС КА, как правило, не превышает 40÷50 дБ [7], возникает достаточно большая вероятность нарушения их нормальной работы. В условиях РЭП данная вероятность, в ряде случаев, может достигать величины 0,58÷0,67 [2], что обуславливает актуальность расширения динамического диапазона РПУ БРЛС ДЗЗ.

2. Срок эксплуатации БРЛС КА ДЗЗ обычно рассчитывается на 15÷20 лет [8], что существенно затрудняет точный прогноз возможных перспектив развития средств РЭП на данный период и делает необходимым создание определенного "запаса" по помехоустойчивости и, в первую очередь, по ширине линейного динамического диапазона РПУ БРЛС КА, во избежание их преждевременного морального старения.

3. Для обеспечения высокой разрешающей способности БРЛС необходимо обеспечить широкую полосу пропускания по выходу, что приводит к повышению уровня нелинейных искажений в следствии взаимодействий между составляющими радиолокационных сигналов и помех [5-6]. Кроме того, из-за особенностей отражающих свойств земной поверхности, условий распространения радиоволн и использования высокоскоростных носителей, БРЛС КА ДЗЗ реализуются, как правило, в сантиметровом или миллиметровом диапазонах [8], что приводит к еще большему расширению полосы пропускания входных каскадов РПУ по сравнению с и без того весьма широкой полосой пропускания по выходу РПУ. Это существенно повышает вероятность внеполосного нелинейного воздействия помех на РПУ БРЛС.

4. БРЛС КА ДЗЗ функционируют, как правило, при весьма малых уровнях радиолокационных сигналов (порядка  $10^{-20}$ – $10^{-22}$  Вт/Гц), что обуславливает требование высокой чувствительности РПУ [8], в свою очередь, противоречащее требованию высокой чувствительности и широкого линейного динамического диапазона РПУ. В то же время чувствительность РПУ однозначно определяется условиями функционирования БРЛС (высотой полета носителя, дальность до цели, мощностью радиопередатчика и отражающими свойствами земной поверхности).

5. Высокоточные БРЛС КА ДЗЗ зачастую являются когерентными РТС [6], которые используют полезную информацию, заключенную и в амплитуде и в фазе радиолокационных сигналов. Поэтому данные БРЛС весьма чувствительны, как к амплитудным, так и к фазовым нелинейным искажениям, включая амплитудно-фазовую конверсию (АФК), свойственную нелинейным РПУ. Кроме того, в когерентных БРЛС нелинейные искажения сохраняют весьма высокий уровень на значительном расстоянии вдоль траектории полёта КА ДЗЗ.

Таким образом, поскольку практические возможности создания малогабаритных сверхвысокочастотных широкополосных высокочувствительных РПУ с большим линейным динамическим диапазоном существенно ограничены, особую значимость приобретают, так называемые, схемные способы расширения динамического диапазона РПУ и адаптивные методы компенсации нелинейных искажений.

#### **Возможный метод определения нелинейной передаточной функции многомерных РПУ БРЛС на основе использования "нелинейных входных сигналов"**

Проведенный анализ известных теоретических методов исследования нелинейных РТС [9-12], показал, что с точки зрения возможностей проведения конструктивного анализа влияния нелинейности АХ сложных РПУ на показатели качества БРЛС и синтеза нелинейных адаптивных компенсаторов с целью расширения линейного динамического диапазона РПУ, одним из наиболее удобных в принципиальном отношении является функциональный метод.

Однако данный метод разработан и применялся, в основном, лишь для решения задач схемотехнического типа, связанных с определением характеристик выходного сигнала нелинейных РПУ при воздействии на их вход некоторых заданных сигналов [10]. Функциональный метод в недостаточной степени пригоден для конструктивных исследований, что объясняется, в первую очередь, существенными трудностями наглядного представления исследуемых РПУ [11-12], а также значительными сложностями обращения нелинейных операторов, описывающих анализируемые РПУ. Поэтому существенно затруднены прямые и обратные переходы к исследованию на различных уровнях детализации РПУ, анализ при изменении условий задачи и, следовательно, поиск оптимальных вариантов построения и подключения нелинейных адаптивных компенсаторов.

Область практической применимости функционального метода существенно ограничена также весьма высокой сложностью известных алгоритмов нахождения ядер Вольтерра РПУ–центральной и наиболее важной задачи, возникающей при использовании данного метода. Это обусловлено тем, что определение ядер Вольтерра РПУ сводится, как правило, к решению громоздких матричных уравнений высокого порядка, в следствие чего функциональный метод используется для исследования лишь относительно узкого класса сравнительно простых и, как правило, одномерных РПУ, "нелинейные входные сигналы" которых могут быть описаны дифференциальным уравнением следующего вида [13]

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

При этом нелинейные элементы РПУ могут быть разделены на два класса по виду сигнала на их входе.

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 (2.9)  $y=x+y$ ).

При этом для элементов 1 класса выражение для "нелинейных входных сигналов" имеет следующий вид

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

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

$$Z_{y_{n,m}} = \sum_{i=1}^{n-m+1} Z_{y_{n-i,m-1}} Z_{y_i} \quad (3)$$

причем

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

На вход нелинейных элементов 2 класса поступает сигнал  $Z_x$ , являющихся, в общем случае, произвольным линейным преобразованием их сигнала  $x$  ( $Z_x=x$ ). Тогда "нелинейные входные сигналы" от элементов 2 класса могут быть определены как

$$x_n^2 = b_n Z_x^n \quad (4)$$

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

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

$$[a][y]=[b][x] \quad (5)$$

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

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

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

$a_{ij}, b_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) – в общем случае произвольные нелинейные аналитические операторы.

Тогда нелинейная передаточная функция (НПФ первого порядка) РПУ определяется выражением следующего вида:

$$[H_1] = [a^*]^{-1} [b^*] [1] \quad (6)$$

А НПФ  $n$ -го ( $n=2, 3, \dots$ ) порядка могут быть найдены из следующей формулы:

$$[H_n] = [a^*]^{-1} [F_n] = [a^*]^{-1} \{ [F_n^{II}] - [F_n^I] \} \quad (7)$$

В выражениях (6), (7):

$[H_m]$  – 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).

Отметим, что при определении НПФ  $m$ -го порядка матрица  $[a^*]^{-1}$  является функцией суммы  $m$  комплексных переменных, т.е.:

$$[a^*]^{-1} = [H^*] \equiv [H^*(S_1 + \dots + S_m)] . \quad (8)$$

Таким образом, метод "нелинейных входных" позволяет исследовать РПУ, описываемые весьма сложными нелинейными операторными уравнениями достаточно общего вида.

Но поскольку обращенные нелинейные аналитические операторы характеризуются уравнениями типа (8), то представляется целесообразным рассмотреть возможность использования метода "нелинейных входных сигналов" для определения его ядер Вольтерра.

В частности, разработаем алгоритм нахождения ядер Вольтерра обращенного нелинейного оператора  $\Gamma\{Y\}$ , который, по определению, является математической моделью РУ типа "выход-вход" и может быть представлен в следующем виде:

$$X = \Gamma\{Y\} = \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i(S_1, \dots, S_i) \prod_{j=1}^i Y(S_j) . \quad (9)$$

Так как для оператора  $\Gamma\{Y\}$  "входным" воздействием является сигнал  $Y$ , а "выходным" – сигнал  $X$ , то, используя выражение (9), получаем:

$$Y = \sum_{k=1}^{\infty} H_k \left[ \sum_{i=1}^{\infty} \Gamma_i Y^i \right]^k . \quad (10)$$

В соответствии с методом "нелинейных входных сигналов" из формулы (9) можно получить следующее выражение для ядер Вольтерра обращенного нелинейного оператора:

$$\Gamma_k(S_1, \dots, S_k) = \frac{1}{H_1(S_1 + \dots + S_k)} [-F_k^1(S_1, \dots, S_k)] , \quad (11)$$

где  $F_k^1(\cdot)$  – "нелинейный входной сигнал" 1 класса, определяемый формулами следующего вида:

$$F_1^1 = 1 ;$$

$$F_n^1 = \sum_{m=2}^n H_m \Gamma_{n,m} , \quad n = 2, 3, \dots .$$

где  $\Gamma_{m,n} = \sum_{i=1}^{n-m+1} \Gamma_i \Gamma_{n-i,m-1}$  , причем  $\Gamma_{m,m} = \Gamma_1^m$ ;  $\Gamma_{m,m-1} = (m-1)\Gamma_1^{m-2}\Gamma_2$ ; ...;  $\Gamma_{m,1} = \Gamma_m$  .

Можно показать, что ядра Вольтерра обращенного нелинейного оператора, полученные с помощью формулы (11) полностью совпадают с известными результатами [11,12], однако определяются значительно более простым и коротким путем.

Таким образом, предложенный метод определения "нелинейных входных сигналов" позволяет существенно расширить область практической применимости функционального метода и повысить его возможности для проведения конструктивных исследований.

### **Література**

1. Козелков С.В. Підвищення завадостійкості контрольно-коригувальних станцій супутникових радіонавігаційних систем з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів / С.В. Козелков, Н.В. Коршун, В.Ф. Заїка, М.М. Степанов // Зв'язок. – 2015. – №3 (115). – С. 3-6.
2. Заїка В.Ф. Оптимізація цілерозподілу засобів радіоподавлення систем супутникового зв'язку за рахунок введення коефіцієнтів важливості / В.Ф. Заїка, І.О. Кириченко, А.І. Онисько // Збірник праць ЦНДІ ЗС України. – 2004. – №2 (23). – С. 119-126.
3. Цветков А.Г. Принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных устройств / А.Г. Цветков А.Г., С.Ф. Матвеевский ; под ред. С.Ф. Матвеевского. – Москва : Советское радио, 1971. – 201 с.
4. Шетсен М. Моделирование нелинейных систем на основе теории Винера / М. Шетсен // ТИИЭР. – 1981. – Т.69. № 12. – С. 44-62.
5. Богданович Б.М. Проектирование приемно-усилительных устройств на микросхемах / Б.М. Богданович. – Минск : Вышэйшая школа, 1979. – 189 с.
6. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. – Москва : ЗАО МАКВИС, 1998. – 828 с.
7. Энергетические характеристики космических радиолиний / Под ред. О.А. Зенкевича. – Москва : Сов.радио, 1972. – 436 с.
8. Гладченко В.В. Космические радиотехнические комплексы / В.В.Гладченко, А.А. Корниенко, И.Ю. Латынский и др. ; под ред. Г.В. Стогова. – МО СССР, 1986. – 625 с.
9. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – Москва : Радио и связь, 1989. – 656 с.
10. Пупков К.А. Статистический расчет нелинейных систем автоматического управления / К.А. Пупков. – Москва : Машиностроение, 1965. – 403 с.
11. Пупков К.А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко. – Москва: Наука, 1978. – 448 с.
12. Пупков К.А. Анализ и расчет нелинейных систем с помощью функциональных степенных рядов / К.А. Пупков, Н.А. Шмыкова. – Москва : Машиностроение, 1982. – 150 с.
13. Иванов М.А. Согласование многокаскадных частотно-избирательных радиоприемных устройств с входными воздействиями / М.А. Иванов // Радиотехника. – 1983. – Вып.65. – С.70-73.

### *Автори статті*

**Мороз Ігор Володимирович** – головний інженер, Національний антарктичний центр України, Київ. Тел.: +380 (99) 086 13 47. E-mail: morozko21\_63@mail.ru

**Заїка Віктор Федорович** – кандидат військових наук, доцент, завідувач кафедри телекомунікаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (66) 102 80 04. E-mail: vfzaika@mail.ru

**Козелков Сергій Вікторович** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій та інформатизації, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (96) 017 31 80. E-mail: S.Kozelkov@dut.edu.ua

### *Authors of the article*

**Moroz Ihor Volodymyrovych** – chief engineer, National Antarctic Scientific Center of Ukraine, Kyiv. Tel.: +380 (99) 086 13 47. E-mail: morozko21\_63@mail.ru

**Zaika Viktor Fedorovich** – candidate of science (military), head of the telecommunication systems department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (66) 102 80 04. E-mail: vfzaika@mail.ru

**Kozelkov Serhiy Viktorovich** – doctor of science (technical), director of the Educational-scientific Institute of the telecommunications and informatization, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (96) 017 31 80. E-mail: S.Kozelkov@dut.edu.ua

Дата надходження в редакцію: 17.03.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л.Н. Беркман