

УДК 621.396

**ПОИСК И ОБНАРУЖЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ С РАСПОЗНАВАНИЕМ ТИПА НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ОСНОВЕ ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

**В.М. ЧЕРТКОВ, канд. техн. наук, доц. С.В. МАЛЬЦЕВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен сравнительный анализ методов поиска и обнаружения нелинейных объектов с распознаванием типа нелинейности. Рассматривается новый метод, обеспечивающий повышение вероятности правильной идентификации типа нелинейности объекта на основе его электрофизических свойств. Установлены самые выгодные с энергетических и информационных позиций частоты для анализа структуры спектра переизлученного зондирующего сигнала. Показаны результаты тестовых испытаний макетного образца радара подповерхностного зондирования, а также результаты восстановления вольтамперной характеристики для диода Д220.*

В ряду всевозможных методов поиска нелинейных объектов с использованием их электрофизических свойств нелинейная радиолокация занимает одно из важнейших мест и активно развивается с 70-х годов прошлого столетия.

При обнаружении нелинейного объекта важный аспект его идентификации – принадлежность к одной из двух разновидностей нелинейности: искусственной или естественной. По понятным причинам такая идентификация является вероятностной процедурой, и достоверность принятия правильного решения в значительной мере определяется методом поиска с учетом электрофизических свойств объекта.

**Классический способ обнаружения нелинейного объекта** с распознаванием типа нелинейности [1] основан на облучении нелинейности гармоническим сигналом и приеме отклика по каналам второй и третьей гармоник переотраженного сигнала, классификация типа нелинейного объекта осуществляется по соотношению амплитуд отраженных в каналах сигналов. Сущностью данного метода является тот факт, что при обнаружении нелинейности типа металл – окисел – металл (естественных нелинейностей) уровень третьей гармоники сигнала отклика превышает уровень сигнала отклика на второй гармонике частоты зондирующего сигнала, а при обнаружении объекта с устойчивым р – n-переходом (искусственных нелинейностей) уровень второй гармоники превышает уровень третьей гармоники [2]. Основным недостатком этого способа является большое количество ложных срабатываний и, как следствие, низкая вероятность распознавания типа нелинейного объекта [3].

**Метод восстановления вида нелинейности по рассеянному полю.** При решении задачи восстановления вольтамперных характеристик нелинейностей произвольного типа по возмущениям рассеянного ими сверхширокополосного излучения необходимо определить характеристики среды. Восстановление характеристик среды включает в себя нахождение пространственных координат нелинейной неоднородности и определение ее нелинейных свойств. Для определения этой многомерной функции необходимо использовать пространственно-временные характеристики падающего и рассеянного полей [4].

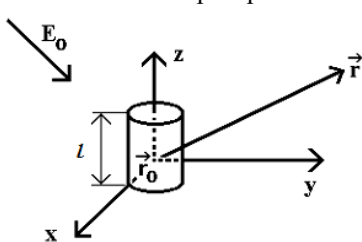


Рис. 1. Аппроксимация формы нелинейной неоднородности

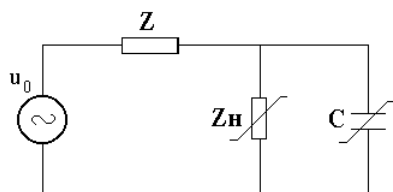


Рис. 2. Эквивалентная схема нелинейного вибратора

Будем считать, что форма нелинейной неоднородности, представленной на рисунке 1, аппроксимируется цилиндром длиной  $l$  и радиусом  $a$ .

В нелинейной радиолокации при описании рассеяния волн нелинейными устройствами, а также при анализе реакции полуволнового вибратора, нагруженного на нелинейность, образованную нелинейным контактом или полупроводниковым диодом, для расчетов используют эквивалентную схему (рис. 2). На схеме представлены следующие элементы:  $u_0(\omega)$  – электродвижущая сила (ЭДС), наведенная падающим излучением на неоднородности;  $I(\omega)$  – ток проводимости, наведенный на нелинейном элементе;  $C(\omega)$  – эквивалентная емкость;  $Z(\omega)$  – комплексное входное сопротивление, зависящее от геометрических размеров объекта.

Действительная часть комплексного входного сопротивления  $Z(\omega)$  с точностью до постоянного множителя совпадает с сопротивлением излучения элементарного вибратора, а мнимая часть соответствует реактивной части входного сопротивления в электродинамике излучающих систем.

С учетом векторного характера электромагнитного излучения рассеянное поле можно определить по формуле [4]:

$$E_0(\omega, r) \approx -i\mu_0\omega I_\Sigma(\omega) LG(r-r_0) \sin\theta, H_\varphi(\omega, r) \approx \frac{E_0}{W_0}, \quad (1)$$

где  $E_0, H_\varphi$  – составляющие электрического и магнитного поля в сферической системе координат;  $W_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$  – волновое сопротивление фоновой среды;  $\theta$  – угол между осью цилиндра и направлением на точку наблюдения;  $I_\Sigma$  – полный ток;  $G(r-r_0) = \exp(ik|r-r_0|)/4\pi|r-r_0|$  – функция Грина.

На основе измеренных в дальней зоне значений напряженности рассеянного поля определяется комплексная амплитуда полного тока, протекающего через нелинейный элемент, и падающее на нем напряжение:

$$I_\Sigma(\omega) = \frac{E_0(\omega, r)}{-i\mu_0\omega LG(r-r_0) \sin\theta}, \quad (2)$$

$$u = u_0 - Z(\omega)I_\Sigma. \quad (3)$$

Задача восстановления вольтамперной характеристики нелинейного элемента по измерениям рассеянного сверхширокополосного поля сводится к простому алгебраическому обращению полученных уравнений. Искомая вольтамперная зависимость находится при этом с точностью до константы, связанной с отсутствием в рассеянном поле составляющих на нулевой частоте (постоянная составляющая). Значение этой константы восстанавливается из условия нормировки, соответствующего требованию пассивности нелинейности [4].

Основным недостатком данного метода является необходимость в дополнительном измерении значений напряжения, наводимого падающим полем в районе нахождения нелинейного объекта. Представленный метод восстанавливает вольтамперную характеристику в отдельных точках, соответствующих электрическому полю в зоне расположения объекта.

**Метод восстановления нелинейности с использованием специального зондирующего сигнала [5].** Данный метод поиска и обнаружения нелинейного объекта с распознаванием типа нелинейности основан на излучении зондирующего сигнала, амплитуда которого промодулирована по пилообразному закону, в направлении на нелинейный объект. Прием и регистрация сигнала отклика осуществляется по двум каналам на второй и третьей гармониках частоты вторичного электромагнитного поля. Таким образом достигается уменьшение количества ложных срабатываний и, как следствие, повышение вероятности распознавания типа нелинейного объекта.

В работах С.Н. Панычева [5 – 7] показано, что реализация данного метода обеспечивает вероятность идентификации нелинейности, близкой к единице, тогда как вероятность традиционного метода по соотношению амплитуд откликов на второй и третьей гармониках незначительно превышает 0,5.

Основным недостатком приведенного метода является сложность технической реализации. Необходимо обеспечить высокую линейность передающего каскада. Кроме того, метод не позволяет однозначно идентифицировать нелинейный объект ввиду существенной разницы вида зависимости амплитуды сигнала отклика от амплитуды зондирующего сигнала на частотах  $2\omega_0$  и  $3\omega_0$  при сложных ВАХ.

**Способ обнаружения нелинейного объекта с распознаванием типа нелинейности и использованием DSB-сигнала** основывается на том, что в качестве зондирующего сигнала используют сигнал с подавленной несущей частотой. Метод основывается на плавном увеличении разности амплитуд гармоник в составе зондирующего сигнала и мощности излучения. Сигнал отклика принимают на второй и третьей субгармониках частоты вторичного электромагнитного поля. Важной отличительной особенностью метода является возможность осуществления дополнительной обработки сигнала отклика на восстановленной удвоенной несущей частоте излучаемого сигнала.

В результате моделирования в программной среде MATLAB произведен анализ структуры спектра переизлученного сигнала, который выявил следующие особенности [8]:

- на частоте второй гармоники подавленной несущей происходит ее восстановление, при этом уровень восстановления определяется квадратичностью аппроксимации ВАХ нелинейного объекта;
- уровень между гармониками  $3\omega_0 + \Delta\omega$  и  $3\omega_0 + 3\Delta\omega$  составляет 9,5 дБ, поэтому прием переизлученного сигнала на частоте  $3\omega_0 + \Delta\omega$  энергетически более выгоден по отношению к приему на частоте  $3\omega_0 + 3\Delta\omega$ , которая используется традиционно.

В рамках выполнения работ по программе комплексного научно-исследовательского проекта «Разработка теоретических основ, экспериментальные исследования и создание макетов» был разработан макет нелинейного радара, реализующего представленный метод обнаружения и идентификации.

При испытании макета одним из тестовых устройств был выбран полуволновой вибратор, нагруженный на диод Д202. Целью эксперимента являлось восстановление ВАХ по принятым сигналам.

Принцип восстановления нелинейности заключается в использовании специального зондирующего сигнала и получении дополнительной информации о характере изменения амплитуд откликов на второй и третьей субгармониках и амплитуды восстановленной удвоенной несущей частоты при изменении разности гармоник в составе зондирующего сигнала и мощности излучения.

**Тестовые испытания:**

а) аппроксимация ВАХ нелинейного элемента осуществлялась степенными полиномами третьей степени – кусочно-степенным способом (сплайн-функция) [9].

Аппроксимируемый интервал разбивается на отрезки  $[x_{i-1}, x_i]$ . На каждом отрезке определяется отдельный полином третьей степени, который имеет непрерывные первую и вторую производные. Такая сплайн-функция обеспечивает совпадения значений в конце текущего и следующего отрезка и непрерывность первой и второй производных в точках соединения.

Вольтамперная характеристика тестового нелинейного элемента аппроксимировалась полиномом

$$y(x) = 0,0868x^3 + 0,1178x^2; \tag{4}$$

б) частоты в составе спектра зондирующего сигнала:  $\omega_0 = 800$  МГц,  $\Delta\omega = 20$  МГц;

в) спектр переотраженного зондирующего сигнала с измеренными амплитудами на соответствующих им частотах представлен на рисунке 3.

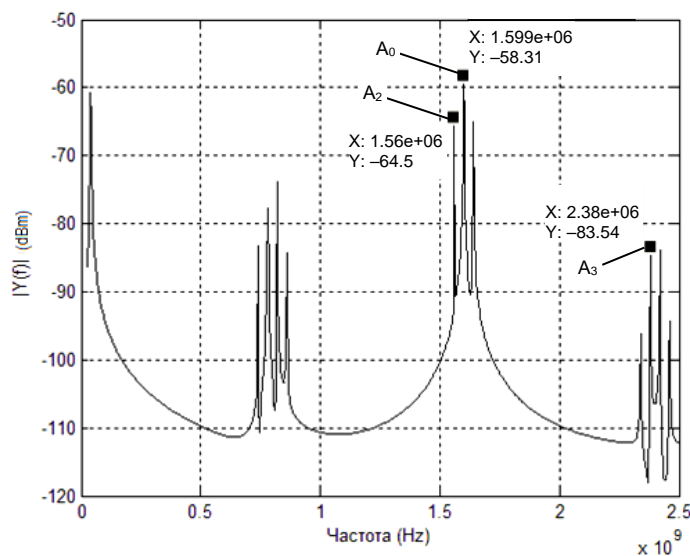


Рис. 3. Спектр переотраженного сигнала (первое измерение):

- $A_0$  – уровень мощности переизлученного сигнала на частоте  $2\omega_0 = 1,599$  ГГц, численно равный  $-58,31$  дБм;
- $A_2$  – уровень мощности отраженного сигнала на частоте  $2\omega_0 - 2\Delta\omega = 1,56$  ГГц, численно равный  $-64,5$  дБм;
- $A_3$  – уровень мощности отраженного сигнала на частоте  $3\omega_0 - \Delta\omega = 2,38$  ГГц, численно равный  $-83,54$  дБм

В результате второго измерения при изменении разности гармоник на 5 дБ в составе зондирующего сигнала и мощности излучения 5 дБ сформирован сигнал, спектр которого представлен на рисунке 4.

По приведенным результатам испытаний составлена система нелинейных уравнений, которая позволяет устранить влияние коэффициента, учитывающего ослабление распространения радиоволн до нелинейного элемента и усиление приемного тракта. Данная система решается в явном виде с помощью Matlab, что позволяет в дальнейшем рассчитать коэффициенты аппроксимирующего полинома:  $a_3 = 0,083$ ,  $a_2 = 0,1168$ .

Следовательно, рассчитанный полином будет иметь вид:

$$y'(x) = a_3x^3 + a_2x^2 = 0,0838x^3 + 0,1168x^2. \tag{5}$$

Результат сравнения полинома из рассчитанных коэффициентов  $y'(x)$  (4) и аппроксимирующего полинома  $y(x)$  (5) представлен на рисунке 5.

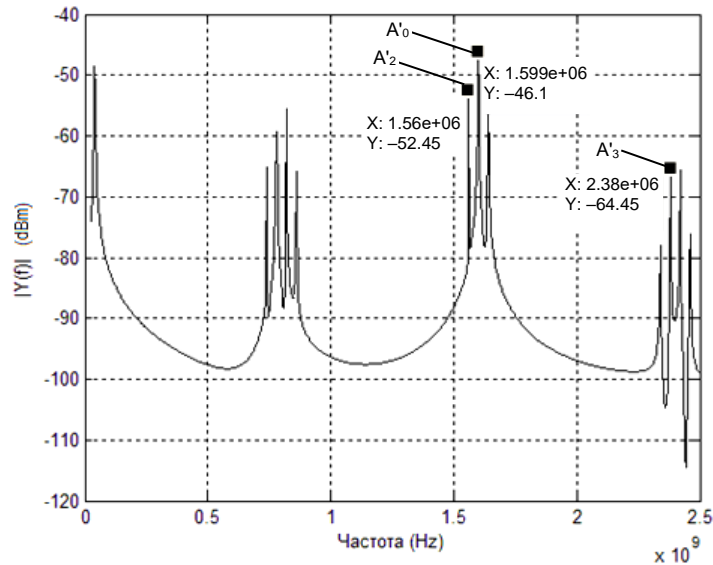


Рис. 4. Спектр переотраженного сигнала (второе измерение):

- $A_0'$  – уровень мощности переизлученного сигнала на частоте  $2\omega_0 = 1,599$  ГГц, численно равный  $-46,1$  дБм;  
 $A_2'$  – уровень мощности отраженного сигнала на частоте  $2\omega_0 - 2\Delta\omega = 1,56$  ГГц, численно равный  $-52,45$  дБм;  
 $A_3'$  – уровень мощности отраженного сигнала на частоте  $3\omega_0 - \Delta\omega = 2,38$  ГГц, численно равный  $-65,45$  дБм

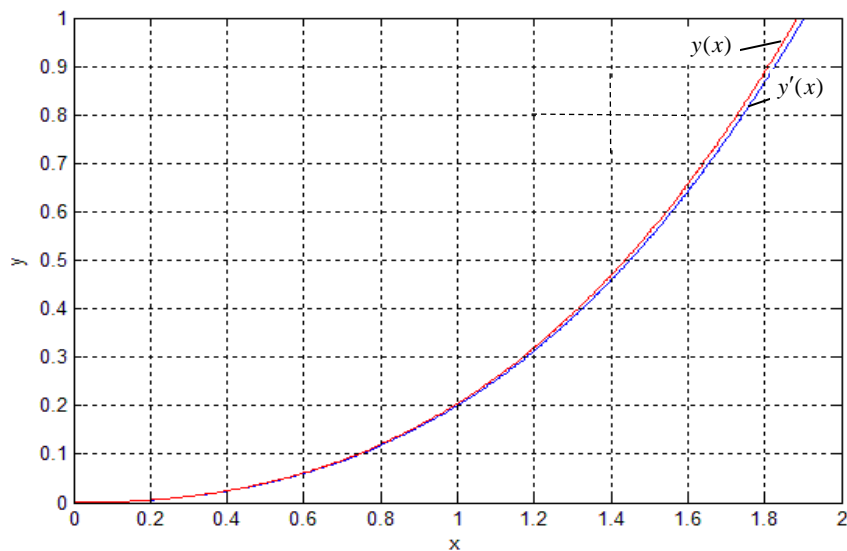


Рис. 5. Сравнение рассчитанного  $y'(x)$  и аппроксимирующего  $y(x)$  полиномов

**Заключение.** Представленный метод обработки переотраженного нелинейным объектом сигнала обеспечивает не только обнаружение, но и идентификацию нелинейности, при этом качество идентификации не уступает традиционным методам при сравнительном уровне сложности технической реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов, Д.В. Нелинейная радиолокация: концепция «NR» / Д.В. Семенов // Специальная техника. – 1998. – № 3 – 4.

2. Вернигоров, Н.С. Исследование многочастотного зондирования в нелинейной радиолокации для увеличения дальности обнаружения нелинейного объекта и определения его координат / Н.С. Вернигоров // Информост. – 2006. – № 6.
3. Штейншлегер, В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами / В.Б. Штейншлегер // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 142, вып. 1. – С. 131.
4. Якубов, В.П. Использование сверхширокополосного излучения для диагностики нелинейностей / В.П. Якубов, Д.В. Лосев, А.И. Мальцев // Журнал радиоэлектроники. – 2000. – № 3.
5. Способ обнаружения нелинейного объекта с распознаванием типа нелинейности: пат. 2205419 Росс. Федерации, МПК G 08 B 13/28 / С.Н. Паньчев, Н.Т. Хакимов; заявл. 20.04.2001; опубл. 27.05.2003 // Бюл. – 2003. – № 15.
6. Паньчев, С.Н. Нелинейная радиолокация: методы, техника и области применения / С.Н. Паньчев, П.М. Мусабеков // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – № 5. – С. 54 – 61.
7. Паньчев, С.Н. Активный однопозиционный радиодальномер для измерения расстояния до объектов с нелинейными рассеивателями / С.Н. Паньчев, В.И. Подлужный, Н.Т. Хакимов // Радиотехника. 2002. – № 12. – С. 65 – 67.
8. Чертков, В.М. Использование фазоманипулированного сигнала в задачах нелинейной радиолокации // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 129 – 134.
9. Калиткин, Н.Н. Среднеквадратичная аппроксимация сплайнами / Н.Н. Калиткин, Л.В. Кузьмина // Математическое моделирование. – 1997. – № 9, т. 9. – С. 106 – 116.

Поступила 04.03.2013

#### THE SEARCH AND DETECTION OF NON-LINEAR OBJECTS WITH RECOGNITION OF NONLINEARITY BASED ON THEIR ELECTROPHYSICAL PROPERTIES

V. CHERTKOV, S. MALTSEV

*A comparative analysis of technologies for identification of nonlinear objects was made. A new method, which increases the probability of correct identifying the type of nonlinearity of the object according to their electrophysical properties, is shown. The transformation features of the spectrum of the signal are considered. The most favorable frequencies for analyzing the spectrum's structure of re-emitted signal of the probe are established. The results for the recovery of the current-voltage characteristics of the diode Д220 are presented.*