

ЭФФЕКТИВНОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕМАСКИРУЮЩИХ ПРИЗНАКОВ НЕЛИНЕЙНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

В работе рассматривается метод повышения вероятности распознавания вида рассеивателей в нелинейной радиолокации путем эффективного выявления и анализа в процессе зондирования дополнительной информации о нелинейном объекте. Предложено за время длительности зондирующего радиоимпульса получить массив мгновенных значений спектральных составляющих сигнала отклика на как можно более коротких временных интервалах с целью точного восстановления передаточной характеристики зондируемого объекта. Это возможно при максимальном поглощении энергии зондирующего поля объектом благодаря чередованию разных по амплитуде и форме сигналов, представляющих реализацию случайного процесса со сплошным спектром.

Ключевые слова: нелинейная радиолокация, нелинейный рассеиватель, спектральное преобразование

M.V. ZINCHENKO, YU.F. ADAMENKO, Y.F. ZINKOVSKIИ

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine

THE EFFECTIVE DETECTION OF NONLINEAR SCATTERERS UNMASKING FEATURES

Abstract - The aim is to ensure a sufficient probability of the form of scatterers recognition in nonlinear radar through effective detection and analysis an additional information about nonlinear object in the process of probing.

The correct recognition of the nonlinear scatterers (NSs) on the spectral composition of the response signal has a low probability, because the values of the received on the harmonics signals depend, in addition to the properties of the object, on the NSs backscatter charts form which may differ among themselves at various harmonics. To ensure the recognition accuracy of the NSs type it is suggested to get an array of instantaneous values of the spectral components of the response signal on the as short as possible time intervals for the duration of the probing radio pulse. So one can restore the transfer characteristic of the probed object.

Practical identification of additional unmasking features of the scatterer is only possible at the maximum of the field energy absorption by the object by alternating of the signals with different amplitude and shape which represent the realization of a random process with a continuous spectrum.

Keywords: nonlinear radar, nonlinear scatterer, spectral transformation

Введение

Технология нелинейной радиолокации в сфере технической защиты информации предназначена для выявления, локализации и идентификации радиоэлектронных закладных устройств (ЗУ) несанкционированного съёма информации. Такая технология поиска ЗУ основана на том, что почти все эти устройства имеют в своём составе полупроводниковую элементную базу с нелинейными характеристиками (микросхемы, транзисторы, диоды и т.д.), способную преобразовать спектральный состав информационного сигнала [1]. Поэтому во время зондирования ЗУ являются источниками рассеивания нелинейных продуктов (новых спектральных составляющих – кратных гармоник частоте зондирующего сигнала (ЗС) или комбинационных частот). При этом присутствующие в исследуемой среде образования вида «металл-окисел-металл» (МОМ-структуры), окисленные контакты, плохо спаянные или сваренные соединения также являются нелинейными рассеивателями (НРс) [2].

Типичный метод нелинейной радиолокации включает прием эхо-сигналов от ЗУ на второй и третьей гармониках зондирующего сигнала, обработку и индикацию их уровней для распознавания ЗУ оператором. Это обусловлено тем, что обычно радиолокационные цели, содержащие полупроводниковые компоненты, имеют на второй гармонике уровень сигналов отклика на 20-30 дБ более высокий, чем на третьей гармонике. Для рассеивателей контактного типа (МОМ-структур), как правило, выполняется обратное соотношение.

Штатные нелинейные радиолокаторы (НР) работают в диапазоне близком к 900 МГц. Такой выбор связан с компромиссом в решении следующего противоречия:

- с одной стороны, чем ниже частота ЗС, тем лучше его проникающая способность внутрь предметов и сред, в которых могут быть спрятаны ЗУ;
- с другой стороны – чем выше частота излучения, тем уже диаграмма направленности антенны НР при фиксированных геометрических размерах, а значит большая плотность потока мощности ЗС.

Максимальное расстояние, на котором проводится эффективное выявление ЗУ, названное поисковым, как правило, ограничено значением 0,7 м. Глубина выявления объектов в исследуемой среде может достигать нескольких десятков сантиметров. Например, НР серии «Циклон» выявляют радиоэлектронные приборы в железобетонных стенах толщиной до 30 см, кирпичных и деревянных – до 60 см [3].

Постановка задачи

Распространённая технология нелинейной радиолокации связана с импульсным излучением. Типичный импульсный НР содержит в своем составе задающий импульсный генератор, формирователь высокочастотного ЗС, приемо-передающую антенну, а также приемник, подключенный к приемо-

передаючої антенні і настроєній на другу або третю гармоніку ЗС. Вероятність правильного розпізнавання НРС (от МОМ-структур) розглянутої технології являється достатньо низкою, порядку 0,5, оскільки величини приймаємих на гармоніках сигналів зависят, помімо своїх властивостей розсеивателя, от форм діаграм вторичного розсеивання НРС, котрі на різних гармоніках можуть отличатся между собой [2, 4]. Також затруднительно однозначно ідентифікувати розсеиватель ввиду суттєвої різниці вида зависимостей амплитуд нелінійних продуктів, отриманих на частотах $2f_0$ і $3f_0$, от амплитуди ЗС на частоті f_0 в случает сложних вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових приборів, входящих в состав НРС (рис.1) [5]. Известно, что розсеиваючіє свойства НРС зависят от мощности ЗС НР. На рис. 1 приведені результати експериментальних досліджень впливу мощности ЗС НР на іскаженіє ВАХ напівпровідникового прибора, что связано с детекторным ефектом и розогревом свободных носителей зарядов [5].

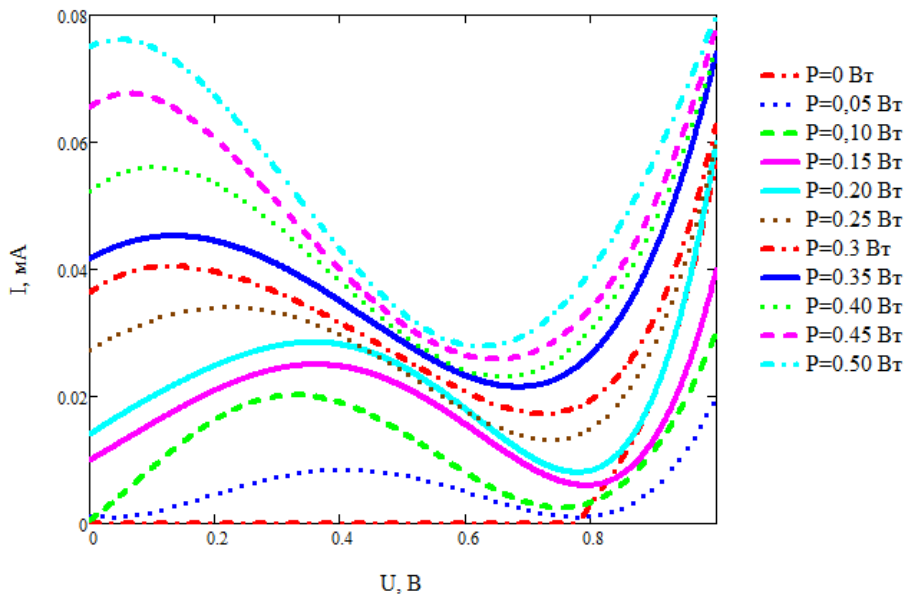


Рис.1. Іскаженіє ВАХ СВЧ діода типа А606 при різних рівнях мощности ЗС НР

Таким образом, технология нелинейной радиолокации характеризуется недостаточной вероятностью правильной идентификации вида НРС из-за неустойчивости соотношений уровней принятых гармоник сигнала отклика по многим факторам. Оперативность поиска ЗУ рассмотренной технологией зависит от навыков и опыта оператора, причем автоматизация процесса идентификации объекта поиска чрезвычайно усложнит аппаратуру. Задача усовершенствования технологии нелинейной радиолокации с целью повышения вероятности правильного распознавания вида НРС сводится к эффективному выявлению и анализу в процессе зондирования дополнительной информации о нелинейном объекте.

Основная часть

Для повышения вероятности правильного распознавания вида НРС рационально использовать зависимость интенсивности сигнала отклика на гармониках ЗС от амплитуды воздействующего сигнала [6]. Также в силу равенства Парсеваля [7] дополнительная информация для определения вида НРС имеется и в частотной области:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{S}(\omega)|^2 d\omega,$$

где $u(t)$, E и $|\dot{S}(\omega)|$ – соответственно принимаемый сигнал отклика от НРС, его энергия и амплитудно-частотный спектр:

$$|\dot{S}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \exp\{-j\omega t\} dt. \tag{1}$$

Для вычисления амплитудно-частотного спектра (1) на отрезке времени, в течение которого принимается радиоимпульс сигнала отклика от НРС, выбирается k равных по величине и равноотстоящих друг от друга временных интервалов. Каждый из k импульсов с периодом следования T имеет длительность τ_0 , причем время принимаемого радиоимпульса сигнала отклика от НРС равно $\tau_H = kT$. Спектральный анализ принимаемого сигнала осуществляется преобразованием Фурье в течение временных

інтервалов от $(i-1)T$ до $\tau_0 + (i-1)T$, где $i = \overline{1, k}$. Таким образом, на каждом из временных интервалов осуществляется получение амплитудно-частотного спектра:

$$|\dot{S}_i(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{(i-1)T}^{\tau_0 + (i-1)T} u(t) \exp\{-j\omega t\} dt, \quad (2)$$

а также выделяются спектральные составляющие $|\dot{S}_1(\omega)|, |\dot{S}_2(\omega)| \dots |\dot{S}_K(\omega)|$, которые могут отображаться визуально как дополнительные информационные признаки о виде НРС, поскольку их последовательность обеспечивает отображение передаточной характеристики зондируемого объекта. При этом неизменными должны быть амплитуды ЗС $G_{3Ci} = const$ и сигнала отклика от НРС $u_{mi} = const$ в течение временных интервалов от $(i-1)T - \tau_3$ до $\tau_0 + (i-1)T - \tau_3$ и от $(i-1)T$ до $\tau_0 + (i-1)T$ соответственно ($\tau_0 \ll \tau_H$), где $\tau_3 = 2R_H/c$ – время задержки принимаемого сигнала отклика относительно ЗС, R_H – расстояние между НРС и НР, c – скорость света.

Выше сказанное имеет смысл и практическую применимость при выполнении условия, что НРС восприимчив к воздействию ЗС НР, т. е. имеем эффективное поглощение объектом энергии внешнего электромагнитного поля. Из чего следует необходимость в максимальном «навязывании» энергии ЗС НР исследуемому объекту.

Закладное устройство как НРС, в своем составе имеет токопроводящие элементы – ансамбль «случайных» антенн, в нагрузке которых могут находиться полупроводниковые приборы. При этом почти все «случайные» антенны с нелинейной нагрузкой «электрически малые», т. е. намного меньше длины волны ЗС НР. Наводимый в такой антенне ток будет незначителен и создаваемое им поле очень слабо исказит падающую волну, т. е. не будем иметь эффективного поглощения НРС энергии ЗС (при уменьшении приёмной антенны принимаемый сигнал существенно уменьшается) [8].

Представим зависимость поглощенной НРС энергии воздействующего импульсного СВЧ сигнала $J_{3C}(x)$ от длины «электрически малой» антенны x :

$$J_{3C}(x) = \int D(E) \cdot \varphi(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot x) dE, \quad (3)$$

где $D(E)$ – функция спектрального преобразования НРС; $\varphi(E)$ – спектр импульсного ЗС НР; $\mu(E)$ – коэффициент ослабления принимаемого сигнала «электрически малой» антенной.

Уравнение (3) является уравнением Фредгольма 1-го рода относительно функции $\varphi(E)$. Оно относится к классу некорректно поставленных задач, когда незначительные флуктуации величины $J_{3C}(x)$ могут вызвать существенные изменения $\varphi(E)$.

Таким образом, энергия воздействующего поля поглощается «случайными электрически малыми» антеннами рассеивателя. Максимально эффективно поглощается объектом энергия тех спектральных составляющих зондирующего сигнала, длины волн которых соизмеримы с длинами «случайных» антенн. Поскольку для типичного НРС число «электрически малых» антенн, их длины и взаимная ориентация трудно прогнозируемы, а во многих случаях и неизвестны, то нельзя однозначно подобрать спектральный состав ограниченного по мощности ЗС. Увеличение уровней отдельных диапазонов частот спектра ЗС неэффективно, поскольку не известно, с какой вероятностью будут соизмеримы характерные им длины волн с длинами «случайных» антенн рассеивателя. Поэтому рациональной для практики есть реализация чередования разных по амплитуде и форме ЗС со сплошным спектром, причем длительность каждого сигнала должна быть больше или равна τ_H .

При использовании как минимум двух различных по форме и/или амплитуде ЗС со сплошным спектром $x_1(t)$ и $x_2(t)$, преобразование рассеивателем ЗС является нелинейным, если не выполняется относительно $x_i(t)$ равенство

$$u_i(t) = h(t) * x_i(t),$$

где $u_i(t)$ – отклик объекта на i -й ЗС, $h(t)$ – импульсная характеристика НРС, * – символ свертки, а знак равенства понимается как тождество относительно $x_i(t)$.

Характеристика нелинейности $\varepsilon^*(t)$ преобразования сигналов НРС определяется выражением

$$\varepsilon^*(t) = u_1(t) - F^{-1} |1/K(\omega)| * u_2(t), \quad (4)$$

где F^{-1} – обратное преобразование Фурье, $K(\omega)$ – передаточная функция фазового корректора между спектрами ЗС (различие форм ЗС связано с различием их фазовых спектров).

Характеристика нелинейности (4) отражает нелинейность преобразования сигналов не только собственно НРС, а совокупную нелинейность преобразования сигналов излучателем НР, рассеивателем и

приемником НР.

Нелинейные искажения ЗС излучателем НР могут быть учтены, если использовать двухканальный приемник: первый (опорный) канал регистрирует ЗС на выходе излучателя НР, а второй (измерительный) – отклики НРс. В таком случае характеристика нелинейности принимает следующий вид:

$$\varepsilon^*(t) = Q_u [u_1(t)] - F^{-1} \left[F \{ Q_u [u_2(t)] \} / F \{ Q_x [x_2(t)] \} \right] * Q_x [x_1(t)], \quad (5)$$

где F – преобразование Фурье. Преобразование сигналов приемником учитывается при помощи нелинейного оператора измерительного канала Q_u , преобразующего временную функцию отклика объекта на входе измерительного канала приемника во временную функцию на его выходе, и нелинейного оператора опорного канала Q_x [9, 10].

В результате оказывается возможным применение ЗС со случайной (наперед не заданной) формой, что позволяет применять в качестве $x_1(t)$ и $x_2(t)$ сигналы, представляющие собой реализацию случайного процесса.

Учитывать искажения сигналов приемником возможно в случае линейного преобразования сигналов объектом, тогда (5) отражает нелинейность преобразования сигналов только приемником:

$$\varepsilon_{II}^*(t) = Q_u [h(t) * x_1(t)] - F^{-1} \left[F \{ Q_u [h(t) * x_2(t)] \} / F \{ Q_x [x_2(t)] \} \right] * Q_x [x_1(t)].$$

Таким образом, выделенные спектральные составляющие $|\dot{S}_1(\omega)|$, $|\dot{S}_2(\omega)|$... $|\dot{S}_K(\omega)|$ в течение нескольких (k) временных интервалов за период принимаемого радиоимпульса сигнала отклика от НРс $\tau_{II} = kT$, являются дополнительными информационными признаками о виде НРс, поскольку их последовательность отображает передаточную характеристику зондируемого объекта. Эффективное выявление дополнительных демаскирующих признаков НРс возможно при максимальном поглощении энергии ЗС НР исследуемым объектом путем чередования друг за другом разных по амплитуде и форме ЗС, представляющих реализацию случайного процесса со сплошным спектром длительностью равной или большей τ_{II} .

Выводы

Вероятность правильной идентификации нелинейных рассеивателей (НРс) является достаточно низкой, поскольку величины принимаемых на гармониках сигналов зависят, помимо свойств рассеивателя, от форм диаграмм обратного рассеяния НРс, которые на различных гармониках могут отличаться между собой. Также затруднительно однозначно идентифицировать рассеиватель ввиду существенной разницы вида зависимостей амплитуд нелинейных продуктов от амплитуды зондирующего сигнала в случае сложных вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов, входящих в состав НРс. Повышения точности распознавания вида НРс требует эффективного выявления и анализа в процессе зондирования дополнительной информации о нелинейном объекте.

Спектральные составляющие, полученные в течение нескольких временных интервалов за период принимаемого радиоимпульса сигнала отклика от НРс τ_{II} , являются дополнительными информационными признаками о типе НРс, поскольку их последовательность отображает передаточную характеристику зондируемого объекта. Эффективное выявление дополнительных демаскирующих признаков возможно при максимальном поглощении энергии зондирующего сигнала исследуемым объектом. Максимально эффективно поглощается объектом энергия тех спектральных составляющих зондирующего сигнала, длины волн которых соизмеримы с длинами его «случайных» антенн. Поэтому рациональной для практики есть реализация чередования разных по амплитуде и форме зондирующих сигналов, представляющих реализацию случайного процесса со сплошным спектром длительностью равной или большей τ_{II} .

Литература

1. Беляев В.В. Состояние и перспективы развития нелинейной радиолокации / В.В. Беляев, А.Т. Маюнов, С.Н. Разиньков // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 6. – С. 59–78.
2. Колбанов А.П. Распознавание нелинейных рассеивателей, содержащих несовершенные металлические контакты или полупроводниковые радиокомпоненты / А.П. Колбанов, А.А. Потапов, Е.Е. Степанов, Е.П. Чигин // Нелинейный мир. – 2005. – Т. 3, № 4. – С. 239–244.
3. Хорошко В.А. Методы и средства защиты информации / В.А. Хорошко, А.А. Чекатков – К. : «Юниор», 2003. – 504с.
4. Горбачев А.А. Амплитудные характеристики нелинейных рассеивателей / А.А. Горбачев, С.В. Ларцов, С.П. Тараканов, Е.П. Чигин // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41, № 5. – С. 558–562.
5. Зинченко М.В. Рассеивание плоских волн системой симметричных вибраторов с нелинейными нагрузками при воздействии нелинейного радиолокатора / М.В. Зинченко, Ю.Ф. Зиньковский // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. НТУУ «КПИ». – 2010. – Том 53. – № 10. – С. 24–34.

6. Пат. RU 2205419 С2, 7 G01S 13/00, 7/292, G08B 13/24. Способ обнаружения нелинейного объекта с распознаванием типа нелинейности / Паньчев С.Н., Хакимов Н.Т. №2001110922/09. Заявлено 20.04.2001. Оpubл. 27.05.2003 // Бюл. №15.
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов / А.Б. Сергиенко. – 2-е изд.– СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
8. Пат. 2393493 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/08. Способ определения затухания сигнала в распределенной случайной антенне / Маслов О. Н., Раков А. С., Рябушкин А. В. – № 2009114611/09; заявл. 06.04.2009; опубл.27.06.2010.
9. Семенов Э.В. Исследование нелинейности преобразования детерминированных сверхширокополосных сигналов путем линейного комбинирования откликов объекта на линейно зависимые тестовые сигналы/Э.В. Семенов // Изв. Томск.политехн. ун-та. - 2004. - Т. 307, № 4. - С. 18-21.
10. Давенпорт В. Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов / В.Б. Давенпорт, В. Л. Рут. – М. : Изд-во Иностранной Литературы, 1960. – 468 с.

References

1. Beliaev V.V. Sostoianie i perspektivy razvitiia nelineinoi radiolokatsii / V.V. Beliaev, A.T. Maiunov, S.N. Razinkov // Zarubezhnaia radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniky'i. – 2002. – № 6. – S. 59–78. [in Russian]
2. Kolbanov A.P. Raspoznavanie nelineinykh rasseivatelei, soderzhashchikh nesovershennyye metallicheskie kontakty ili poluprovodnikovyye radiokomponenty / A.P. Kolbanov, A.A. Potapov, E.E. Stepanov, E.P. Chihin // Nelineinyi mir. – 2005. – Т. 3, № 4. – S. 239–244. [in Russian]
3. Khoroshko V.A. Metody i sredstva zashchity informatsii / V.A. Khoroshko, A.A. Chekatkov – К. : «Yunior», 2003. – 504s. [in Russian]
4. Horbachev A.A. Amplitudnye kharakteristiki nelineinykh rasseivatelei / A.A. Horbachev, S.V. Lartsov, S.P. Tarakanov, E.P. Chihin // Radiotekhnika i elektronika. – 1996. – Т. 41, № 5. – S. 558–562. [in Russian]
5. Zinchenko M.V. Rasseivanie ploskikh voln sistemoi simmetrichnykh vibratorov s nelineinymi nahruzkami pri vozdeistvii nelineinogo radiolokatora / M.V. Zinchenko, Yu.F. Zinkovskii // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Radioelektronika. NTUU «KPI». – 2010. – Tom 53. – № 10. – S. 24–34. [in Russian]
6. Pat. RU 2205419 S2, 7 G01S 13/00, 7/292, G08B 13/24. Sposob obnaruzheniia nelineinogo obekta s raspoznavaniem tipa nelineinosti / Panychev S.N., Khakimov N.T. №2001110922/09. Zaiavleno 20.04.2001. Opubl. 27.05.2003 // Biul. №15. [in Russian]
7. Serhienko A.B. Tsifrovaia obrabotka signalov: Uchebnik dlia vuzov /A.B.Serhienko. – 2-е изд.– СПб.: Питер, 2006. – 751 s. [in Russian]
8. Pat. 2393493 S1 Rossiiskaia Federatsia, MPK G 01 R 29/08. Sposob opredeleniia zatukhaniia signala v raspredelennoi sluchainoi antenne / Maslov O. N., Rakov A. S., Riabushkin A. V. – № 2009114611/09; zaiavl. 06.04.2009; opubl.27.06.2010. [in Russian]
9. Semenov Э.В. Issledovanie nelineinosti preobrazovaniia determinirovannykh sverkhshirokopolosnykh signalov putem lineinogo kombinirovaniia otklikov obekta na lineino zavisimyye testovyye signaly/E.V. Semenov // Izv. Tomsk.politekh. un-ta. - 2004. - Т. 307, № 4. - S. 18-21. [in Russian]
10. Davenport V. B. Vvedenie v teoriyu sluchainykh signalov i шумов / V.B. Davenport, V. L. Rut. – М. : Изд-во Inostrannoi Literatury, 1960. – 468 s. [in Russian]

Рецензія/Peer review : 29.9.2015 р.

Надрукована/Printed :20.10.2015 р.