

УДК 621.396

ОБЗОР МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЛИНЕЙНОГО РАДИОЛОКАТОРА

М.М. ИВАНОВ, д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, В.М. ЧЕРТКОВ
(Полоцкий государственный университет)

Выполнен обзор методов обнаружения нелинейных элементов с помощью нелинейного радиолокатора. Дано определение понятию нелинейной радиолокации и раскрыт ее принцип работы. Представлены математические выкладки, поясняющие физические процессы, происходящие в нелинейном элементе при взаимодействии с зондирующим сигналом. Рассмотрено применение новых для нелинейной радиолокации способов зондирования: последовательностью сверхширокополосных импульсов, зондирование сверхширокополосными импульсами и сверхвысокочастотным гармоническим сигналом одновременно, моноимпульсного зондирования. Рассмотрены классический метод анализа второй и третьей гармоник, режим «20К», применение аудиосигналов, двухчастотных и многочастотных сигналов. Проведен сравнительный анализ, выявлены достоинства и недостатки рассмотренных методов обнаружения нелинейных элементов.

Ключевые слова: нелинейный радиолокатор, сверхширокополосный сигнал, нелинейный элемент, обнаружение нелинейных элементов.

Введение. Принцип работы нелинейной радиолокации полностью аналогичен традиционной радиолокации для случая поиска объектов с активным ответом, при этом уравнение нелинейной радиолокации [1] имеет следующий вид:

$$P_{N_{\text{пр}}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{изл}} G_{N_{\text{пр}}} \lambda^2}{(4\pi r)^4} \cdot \frac{\lambda^2}{N^2} \cdot G_{\text{НО}_{\text{пр}}} \cdot G_{N_{\text{изл}}} \cdot \zeta_N(\omega, P_{\text{изл}}) \cdot K_1(\omega) K_2(\omega_N), \quad (1)$$

где $P_{N_{\text{пр}}}$ – мощность отклика объекта на N -й гармонике в месте расположения приемной антенны радиолокатора;

$P_{\text{изл}}$ – мощность излучения радиолокатора;

$G_{\text{изл}}$ – коэффициент усиления излучающей антенны радиолокатора;

$G_{N_{\text{пр}}}$ – коэффициент усиления приемной антенны радиолокатора на N -й гармонике;

$\lambda = c / f$ – длина волны излучения радиолокатора (эквивалентна частоте, где c – скорость света, f – частота излучения радиолокатора);

r – расстояние до объекта;

N – номер принимаемой радиолокатором гармоники;

$G_{\text{НО}_{\text{пр}}}$ – коэффициент усиления эквивалентной приемной антенны нелинейного элемента (НЭ);

$G_{N_{\text{изл}}}$ – коэффициент усиления эквивалентной излучающей антенны НЭ;

$K_1(\omega)$ – частотно-зависимый коэффициент затухания зондирующего сигнала радиолокатора в среде распространения;

$K_2(\omega_N)$ – частотно-зависимый коэффициент затухания сигнала N -й гармоники от НЭ в среде распространения;

$\zeta_N(\omega, P_{\text{изл}})$ – коэффициент нелинейного преобразования для N -й гармоники, зависящий от частоты и мощности излучения радиолокатора.

Нелинейными называются элементы, обладающие нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), к ним относятся диоды, транзисторы, микросхемы, контакты металл – окисел – металл. Кроме того, к нелинейным элементам относится классическая двуокись железа – ржавчина.

Существенным отличием нелинейной радиолокации от классической с активным ответом является прямое преобразование падающей на НЭ энергии зондирующего сигнала в энергию высших гармоник. В связи с этим процесс обнаружения в условиях нелинейной локализации можно классифицировать как наблюдение с полуактивным ответом, что связано с отсутствием потребления энергии объектом от спе-

циального источника питания. Особенности обнаружения НЭ являются очень малое значение коэффициента нелинейного преобразования ($\zeta_N \ll 1$) и зависимость от частоты и мощности зондирующего сигнала локатора [1].

Вольт-амперная характеристика любого НЭ разлагается в ряд Тейлора в виде аппроксимирующего степенного полинома [1]. Выходной ток при воздействии гармонического сигнала будет иметь следующий вид:

$$i_{\text{вых}}(t) = i_0 + \alpha e_s(t) + \beta e_s^2(t) + \gamma e_s^3(t) + \dots, \quad (2)$$

где $e_s(t)$ – входной сигнал на нелинейном элементе.

Из выражения (2) следует, что нелинейность ВАХ приводит к появлению в выходном сигнале постоянной составляющей i_0 , основной гармонике с амплитудой, умноженной на коэффициент α , и высших гармоник основной частоты, амплитуды которых пропорциональны соответствующим коэффициентам. Коэффициенты β и γ представляют первую, вторую производные от крутизны ВАХ (α) соответственно [1]:

$$\alpha = \left. \frac{di}{de} \right|_{e=E_0},$$

$$\beta = \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d^2i}{d^2e} \right|_{e=E_0} = \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d\alpha}{de} \right|_{e=E_0},$$

$$\gamma = \frac{1}{3!} \cdot \left. \frac{d^3i}{d^3e} \right|_{e=E_0} = \frac{1}{3!} \cdot \left. \frac{d^2\alpha}{d^2e} \right|_{e=E_0}.$$

Если входной сигнал имеет вид

$$e_s(t) = A_0 \cos \omega t, \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда сигнала;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота сигнала (рад/с), f – частота сигнала (Гц),

то, подставив выражение (3) в формулу (2), получим

$$i_{\text{вых}}(t) = (i_0 + \beta A_0^2 + \dots) + (\alpha A_0 + 1, 25\gamma A_0^3) \cos \omega t + 0, 5\beta A_0^2 \cos 2\omega t + 0, 25\gamma A_0^3 \cos 3\omega t + \dots \quad (4)$$

Появление дополнительной постоянной составляющей βA_0^2 , добавленной к основному току i_0 , что соответствует смещению рабочей точки в сторону увеличения крутизны, если элемент находится в активном режиме. В пассивном режиме рабочая точка не смещается и располагается там, где крутизна ВАХ минимальна [1].

Методы обнаружения нелинейных элементов

Существует много разнообразных методов обнаружения НЭ, использующих различные принципы нелинейной радиолокации, имеющих свои достоинства и недостатки. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

1. Зондирование гармоническим сигналом.

При облучении полупроводника гармоническим сигналом переотраженный сигнал обогащается гармониками. Вольт-амперная характеристика полупроводникового радиоэлектронного элемента имеет квадратичный характер, а ВАХ ложных полупроводников, полученных в местах соединения различных металлов, окислений, аппроксимируется полиномом третьей степени. При использовании этого метода в отраженном сигнале особый интерес представляют вторая и третья гармоники, так как соотношение их уровней указывает на тип НЭ [1]. Для настоящего полупроводникового элемента уровень второй гармоники выше уровня третьей, а при облучении ложного полупроводника – ситуация обратная.

Задача обнаружения НЭ сводится к узкополосному приему отраженных эхо-сигналов и анализу второй и третьей гармоник, соответствующих единственной частоте зондирования.

Работающие по такому принципу нелинейные радиолокаторы (НРЛ) обладают возможностью определять тип полупроводника. Но данное достоинство порождает основной недостаток НРЛ такого типа – наличие двух приемников, работающих на удвоенной и утроенной гармонике соответственно. Это приводит к проблеме радиочастотной изоляции.

2. Зондирование двухчастотным сигналом.

В данном методе НЭ зондируется двухчастотным сигналом, то есть НЭ зондируется одновременно гармоническими сигналами S_1 и S_2 с частотами f_1 и f_2 ($f_2 > f_1$) соответственно. Приемник такого НРЛ выделяет из спектра отраженного сигнала комбинационные гармоники вида $n_1f_1 \pm n_2f_2$, где $n = \{1, 2, 3, \dots\}$. При этом сигналы от НЭ, как правило, имеют наибольшую величину на частотах $f_1 \pm f_2$. Данные комбинационные частоты обусловлены, квадратичным членом ВАХ настоящего полупроводникового перехода. При наличии ложных полупроводников переизлученный сигнал имеет наибольший уровень на частотах $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$ [2].

3. Зондирование многочастотным сигналом.

Иногда в качестве зондирующего сигнала используют сигнал, спектр которого состоит из N равноамплитудных спектральных составляющих. В этом случае удастся увеличить мощность принимаемого сигнала. Данный прием используется вместо увеличения мощности зондирующего сигнала [3]. Средняя мощность удвоенных спектральных составляющих отраженного сигнала увеличивается пропорционально N при выполнении следующего условия:

$$\omega_i - \omega_{i+1} = \omega_{i+1} - \omega_{i+2}.$$

Таким образом, в образовании удвоенных частот в спектре отраженного сигнала участвуют более двух гармонических составляющих. Так, когерентно суммируются $N - 1$ гармонических составляющих:

$$\omega_{отр} = \omega_1 + \omega_N = \omega_2 + \omega_{N-1} = \omega_3 + \omega_{N-2} = \dots$$

Увеличение мощности выполняется при условии полной синфазности спектральных составляющих [3].

Достоинства многочастотного зондирующего сигнала сведены в таблицу 1.

Таблица 1. – Достоинства многочастотного сигнала

Положительный эффект (по сравнению с одночастотным режимом)	Физический процесс, обусловленный многочастотным режимом работы
Увеличение дальности обнаружения нелинейных объектов: в 2–2,5 раза в свободном пространстве; в 1,6–1,8 раза вблизи поверхности грунта	Возрастание нелинейной эффективной поверхности рассеяния на 15–25 дБ при перестройке частоты на ± 15 –20 % за счет резонансных явлений при переизлучении СВЧ-сигнала
Увеличение вероятности обнаружения неподвижных объектов с изрезанной диаграммой обратного рассеяния (ДОР)	Изменение ДОР нелинейного объекта
Увеличение дальности обнаружения объектов с электронными устройствами, имеющих экранирующие металлические корпуса	Резонансные явления в отверстиях и щелях металлического корпуса
Распознавание обнаруженного нелинейного объекта	Совокупность устойчивых резонансных эффектов в линейных и нелинейных элементах объекта поиска при переизлучении СВЧ-сигнала
Увеличение дальности обнаружения объектов, расположенных за экранирующими препятствиями (ж/б сооружениями, неровностями грунта и др)	Интерференционные и дифракционные явления на верхнем крае препятствия (эффект «усиления» поля препятствием)
Уменьшение требований к уровню собственных гармоник СВЧ-передатчика нелинейной радиолокационной станции (НРЛС) при двухчастотном режиме работы	Использование при приеме фиксированных комбинационных частот в спектре отраженного сигнала (вместо гармоник)
Уменьшение помехового воздействия корпуса носителя (на 30–60 дБ) при двухчастотном режиме работы НРЛС	Несовпадение боковых и задних лепестков диаграмм направленности передающих антенн НРЛС. Разнос между антеннами не менее $(2-3)\lambda_1$

Недостатком такого метода обнаружения нелинейных объектов является то, что при увеличении полосы спектра зондирующего сигнала необходимо увеличить и полосу приемника нелинейного радио-

локатора, что приводит к уменьшению отношения сигнал-шум. Кроме того, необходимо использовать антенну с более широкой полосой пропускания, что уменьшает ее коэффициент усиления.

4. Зондирование амплитудно-модулируемым сигналом с подавленной несущей.

В данном случае в качестве зондирующего сигнала используется амплитудно-модулируемый сигнал (АМ-сигнал) с подавленной несущей. Спектр такого сигнала представляет две гармонические составляющие, отстоящие от подавленной несущей на одинаковое расстояние вверх и вниз, численно равное номиналу поднесущей частоты [4].

При наличии нелинейности на приемной стороне регистрируют зависимости уровней амплитуд комбинационных от боковых составляющих зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей на третьей и второй гармониках, а также амплитуды восстановленной несущей частоты на второй гармонике [5]. По виду полученной зависимости осуществляют распознавание типа нелинейности на основе расчета значений коэффициентов степенного полинома, аппроксимирующего ВАХ нелинейного элемента [6].

Преимущество использования сигнала такого вида заключается в повышении надежности идентификации нелинейного объекта, тем самым уменьшается количество ложных срабатываний и, как следствие, повышается вероятность распознавания типа объекта с нелинейными свойствами.

5. Эффект затухания.

Согласно методу «эффект затухания» обнаружение НЭ осуществляется благодаря регистрации изменения уровня аудиошума вблизи НЭ [7].

В случае когда антенна НРЛ находится на малом расстоянии от НЭ, демодулированный аудиосигнал от полупроводника имеет низкий уровень шума, а при удалении антенны шум увеличивается. Таким образом, аудиосум имеет минимальное значение непосредственно над полупроводником и нормальный уровень в стороне от него. При зондировании ложных полупроводников наблюдается увеличение уровня аудиошума [8]. Зависимость уровня аудиошума от расстояния антенны НРЛ до НЭ представлена на рисунке 1.

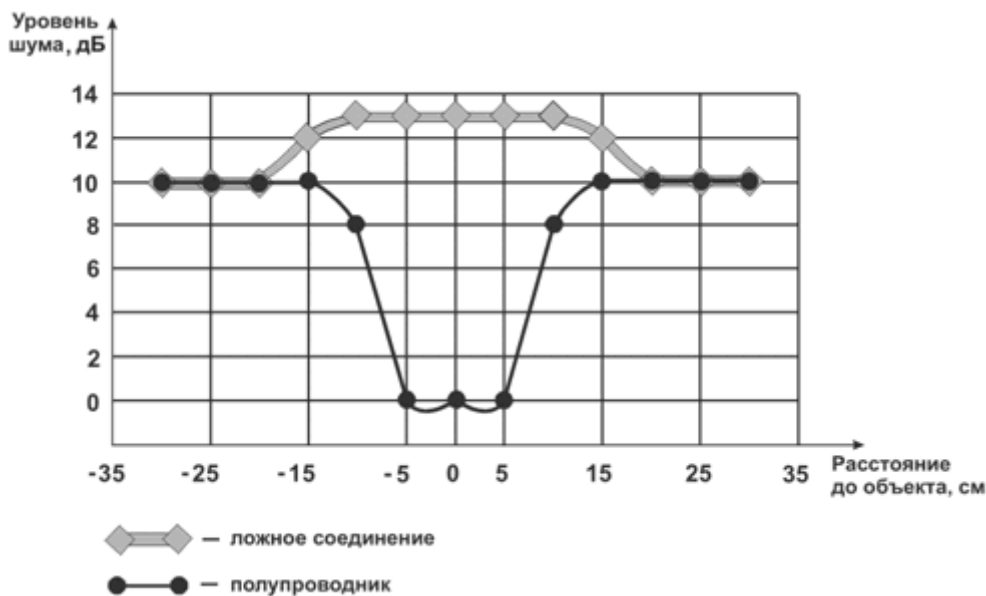


Рисунок 1. – Зависимость уровня аудиошума от расстояния антенны НРЛ до НЭ

Недостатком метода является то, что некоторые ложные полупроводники могут снижать уровень шума, поэтому возможны ошибочные определения настоящего полупроводника. Для устранения данного недостатка дополнительно используется метод «простукивания» – механического воздействия на предполагаемое место нахождения НЭ [8]. В свою очередь механическое воздействие приводит к изменению геометрии полупроводника и его свойств, поэтому в преобразованном сигнале ясно прослушивается частота простукивания. К достоинству метода можно отнести то, что он может быть реализован как НРЛ постоянного излучения, так и НРЛ импульсного излучения [7].

6. Режим «20К».

Режим «20К» получил название исходя из частоты следования зондирующих импульсов равной 20кГц [8]. При этом осуществляется выделение огибающей переизлученного сигнала. Для настоящего

полупроводника детектированный звуковой сигнал не является слышимым человеческим ухом. Если полупроводниковое соединение ложное, то не все зондирующие импульсы переотражаются, следовательно, детектируется аудиосигнал с более низкой частотой, которая прослушивается человеческим ухом. Недостаток данного метода заключается в большой вероятности ошибочного определения настоящего НЭ вместо ложного [9].

7. Применение аудиосигналов в НРЛ.

Некоторые НРЛ используют метод прослушивания демодулированных аудиосигналов [7]. Примером может служить прослушивание синхронизирующего видеосигнала камер наблюдения. Нелинейный радиолокатор должен обеспечивать качественную аудиодемодуляцию как в АМ-, так и в ЧМ-режимах, чтобы использовать ее возможности для идентификации НЭ [7]. Например, используя частотную демодуляцию, можно услышать переключение фаз в электронных устройствах. Недостаток данного метода заключается в том, что необходимо уметь распознавать характерные звуки определенных электронных устройств. С помощью данного метода также можно отличить ложный полупроводник от настоящего, используя метод «простукивания». Настоящий полупроводник при этом не издает дополнительных звуков, а ложный сопровождается треском. Кроме того, для обнаружения НЭ можно использовать ЧМ-тон, что повышает вероятность обнаружения, но при этом теряется возможность различать настоящий полупроводник от ложного [7].

8. Моноимпульсное зондирование.

Метод моноимпульсной локации позволяет выполнять практически мгновенный обзор заданной зоны пространства, используя ограниченное число многодиапазонных антенн, допускающих излучение и прием многодиапазонного широкополосного сигнала [10].

Типовой частотный диапазон систем радиопередачи соответствует частотному диапазону связанных радиостанций, которые часто используются в качестве каналов радиоуправления, и занимает полосу частот от 30 до 3000 МГц.

Для построения такого НРЛ зондирующий сигнал разбивается на дискретные зоны, спектр в которых является непрерывным. Ширина спектра каждой из дискретных зон соизмерима с их центральной частотой. Расстановка центральных частот дискретных зон широкополосных сигналов соизмерима с их шириной спектра. Сигналы, излученные в таких дискретных зонах, относятся к классу многодиапазонных широкополосных сигналов [10].

Для обнаружения отраженных сигналов от НЭ на 2-й гармонике спектр зондирующих сигналов в каждой из дискретных зон должен иметь октавную структуру. Число октавных зон обычно составляет примерно 3–4. Спектр зондирующего сигнала для данного случая представлен на рисунке 2.

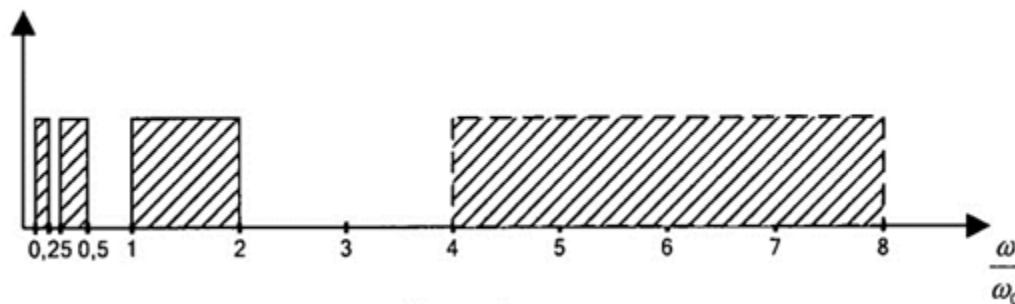


Рисунок 2 – Спектр зондирующего сигнала многодиапазонного широкополосного сигнала

Ограничение по ширине спектра каждой дискретной зоны является необходимым условием для выделения на фоне основной гармоники гармоник высшего порядка [10].

При зондировании в НЭ возникают вынужденные колебания. Если резонансный контур радиоприемного/передающего устройства совпадает со спектром дискретных зон зондирующего сигнала, то в контуре возникают резонансные колебания, амплитуда которых нарастает по линейному закону. Резонансные колебания также возникают и на кратных гармониках. Но для возникновения резонанса на кратных гармониках необходим зондирующий сигнал с большей энергией. Требуемое увеличение энергии минимально для гармоник с наименьшей кратностью, например для второй гармоники [10].

Возникновение резонансных колебаний в резонансном контуре приводит к модуляции по периодическому закону входного сопротивления радиоприемного или выходного радиопередающего устройства. В таком случае резонансный контур превращается в контур с переменными параметрами, работающий как параметрический усилитель, что приводит к увеличению амплитудного уровня отклика, отраженного от НЭ зондирующего сигнала, и расширению полосы пропускания контура [11]. Усиление от-

клика возникает за счет использования энергии зондирующего сигнала либо энергии источника питания нелинейного элемента.

Расширение полосы пропускания контура происходит не только на основной гармонике, но также на наборе гармонических составляющих $2\omega_0/K$, где $K = 1, 2, 3, \dots$ – целое число. Эти резонансные колебания называются «обобщенным» резонансом [12].

При условии возбуждения параметрических колебаний в НЭ происходит увеличение дальности обнаружения, по сравнению с нерезонансным (непараметрическим) возбуждением отклика. Увеличение дальности обнаружения происходит за счет параметрического усиления отклика на основной гармонике и возникновения окна «прозрачности» на высших гармониках, например второй, и составляет величину в 10–30 раз большую по сравнению с нерезонансным возбуждением НЭ [10].

9. Зондирование сверхширокополосным сигналом.

В данном методе НРЛ в качестве зондирующего сигнала использует последовательность сверхширокополосных (СШП) импульсов. Количество импульсов должно быть не менее двух. При этом первый импульс является опорным сигналом, а последующие – результатом фазовой или амплитудной обработки первого по известному закону. Под характеристикой нелинейности понимается набор временных зависимостей разностей отклика исследуемого НЭ на опорное тестовое воздействие и свертки обратного преобразования Фурье от отношения спектров отклика объекта на n -е воздействие [13].

Как утверждается в [4], благодаря данному подходу более чем в 20 раз улучшается чувствительность к НЭ. При этом энергия тестового воздействия в 17,5 раз ниже по сравнению с классическим одночастотным подходом. Кроме того, увеличение базы второго тестового воздействия позволяет повысить обнаружительную способность СШП НРЛ.

Существует еще один способ обнаружения НЭ с помощью СШП сигналов. Суть его состоит в том, что НЭ зондируется одновременно СШП сигналом и мощным монохроматическим гармоническим СВЧ-колебанием. В результате наблюдается эффект взаимной модуляции [14]. В таком случае переизлученный от НЭ сигнал имеет в своем составе гармонику излучаемого СВЧ-сигнала, а также удвоенную и утроенную. Вместе с тем наблюдается взаимная модуляция между гармоническим и СШП сигналами, причем спектр подобен АМ-сигналу, где в качестве несущей выступает гармонический сигнал. Следовательно, настроив приемник на одну из боковых полос модулированного сигнала, можно определять наличие нелинейного элемента, а также появляется возможность отследить дальность до закладного устройства по задержке отраженного импульса.

Недостатком СШП НРЛ являются сложности в реализации СШП приемника и вычислительные сложности при обработке приемного сигнала. Кроме того, данный подход работает только при большой мощности гармонического СВЧ-сигнала [14].

Закключение. В результате анализа методов обнаружения нелинейных элементов можно сделать вывод о том, что глобально принцип работы нелинейного локатора остается неизменным в большинстве случаев и четко просматриваются два основных подхода:

- регистрация на приемной стороне удвоенной и утроенной гармоник переизлученного НЭ зондирующего сигнала;
- регистрация комбинационных частот в спектре переизлученного сигнала.

Применение метода зондирования СШП-сигналом позволяет значительно уменьшить мощность излучения по сравнению с классическим методом одночастотного зондирования. Выявленные достоинства дополняются положительными эффектами многочастотного зондирования благодаря тому, что спектр СШП-сигнала состоит из множества гармоник, а также улучшаются массогабаритные свойства НРЛ. Кроме того, несмотря на основной недостаток, который заключается в вычислительной сложности при обработке переизлученных сигналов, сверхширокополосная НРЛ является перспективным направлением исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернигоров, Н. С. Принцип обнаружения объектов нелинейным локатором / Н. С. Вернигоров // Защита информации. Конфидент. – № 4. – 1998. – С. 65–70.
2. ПВ.РФ Международный промышленный портал [Электронный ресурс] / Применение нелинейной радиолокации для обнаружения неизлучающих устройств промышленного шпионажа и металлических предметов. – 2011. – Режим доступа: <http://promvest.info/ru/inzhenernyie-seti-zhkh/primenenie-nelineynouy-radiolokatsii-dlya-obnaruzeniya-neizluchayuschih-ustroystv-promyishlennogo-shpionaja-i-metallicheskikh-predmetov/>. – Дата доступа: 05.08.2017.
3. Ларцов, С. В. Нелинейное рассеяние при использовании многочастотного и одночастотного зондирующих сигналов / С. В. Ларцов // Нелинейный мир. – 2006. – № 7–9. – С. 463–469.

4. Чертков, В. М. Использование фазоманипулированного сигнала в задачах нелинейной радиолокации / В. М. Чертков, С. В. Мальцев // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 129–134.
5. Иванов, М. М. Способ обнаружения нелинейного объекта с распознаванием типа нелинейности / М. М. Иванов, В. М. Чертков, Ю. А. Андреев // Актуальные вопросы физики и техники : II Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, 18 апр. 2013 г. : в 2 ч. / редкол. : А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2013. – Ч. 1. – С. 112–115.
6. Чертков, В. М. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска с возможностью идентификации радиоэлектронных средств скрытого съема информации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2016. – № 4. – С. 99-105.
7. Джонс, Т. Обзор технологии нелинейной радиолокации / Т. Джонс // Специальная техника. – 1999. – № 3.
8. Техника для спецслужб [Электронный ресурс] // Нелинейные радиолокаторы и особенности их применения для поиска закладных устройств. – БНТИ, 2008. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=839&lvl=04.01.02>. – Дата доступа: 14.09.2017.
9. Защита переговоров, видеонаблюдение, контроль доступа, охранно-пожарная безопасность [Электронный ресурс] // Зачем нужен нелинейный локатор и как с ним работать! – 2010. – Режим доступа: <http://www.detsys.ru/article/zachem-nujen-nelineynyy-lokator>. – Дата доступа: 05.08.2017.
10. Способ и устройство измерения угловой высоты объекта поиска в обзорных нелинейных радиолокаторах : 2013116170/07 (2013) // И. Н. Замятина, В. И. Ирхин ; дата публ.: 10.10.2014.
11. Харкевич, А. А. Линейные и нелинейные системы / А. А. Харкевич. – М. : Наука, 1973. – Т. 2.
12. Жаботинский, М. Е. Основы теории и техники умножения частоты / М. Е. Жаботинский, Ю. Л. Свердлов. – М. : Сов. радио, 1964. – С. 328.
13. Лоцилов, А. Г. Разработка принципов нелинейной сверхширокополосной радиолокации / А. Г. Лоцилов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 4 (30). – С. 31–38.
14. Иванов, М. М. Повышение чувствительности нелинейного радиолокатора / М. М. Иванов, В.К. Железняк, В. М. Чертков // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 4. – С. 72–77.

Поступила 20.09.2017

REVIEW OF METHODS OF DETECTING NONLINEAR ELEMENTS BY THE NONLINEAR RADAR

M. IVANOU, V. ZHELEZNYAK, V. CHERTKOV

In this article, an overview is given of methods for detecting nonlinear elements by means of a nonlinear radar. The definition of the concept of nonlinear radar is given and its working principle is disclosed. Mathematical calculations explaining the physical processes that occur in a nonlinear element when interacting with a sounding signal are also presented. The application of new sensing methods for nonlinear radiolocation: the sequence of ultrawideband pulses, probing with ultra-wideband pulses and ultrahigh-frequency harmonic signals simultaneously, and monopulse sounding are considered. Also considered classical methods such as the analysis of the second and third harmonics, «20K» mode, audio application, two- and multi-frequency signals, and others. Comparative analysis is carried out and advantages and disadvantages of the methods are revealed.

Keywords: *nonlinear radiolocation, nonlinear radiolocation, ultra-wideband signal, nonlinear object, detection of nonlinear objects.*