

УДК 621.396.96

А.Г. Лоцилов

## Разработка принципов нелинейной сверхширокополосной радиолокации

Предложен подход к дистанционному обнаружению объектов, обладающих нелинейными свойствами, основанный на использовании комбинации сверхширокополосных тестовых сигналов с малой и большой базой. Разработана модель экспериментальной установки для оценки эффективности использования предложенного подхода. В результате моделирования было установлено, что для рассмотренного частного случая предложенный подход обладает лучшей чувствительностью к продуктам нелинейного преобразования (более чем в 20 раз) при меньшей энергии тестового воздействия (в 17,5 раза) по сравнению с классическим одночастотным подходом. Результаты моделирования позволяют утверждать о перспективности применения предложенного подхода для задач нелинейной радиолокации.

**Ключевые слова:** нелинейная локация, сверхширокополосное импульсное воздействие.

**Состояние проблемы.** Первые упоминания об эффекте нелинейного рассеяния электромагнитных волн относятся к началу 40-х годов прошлого века. Было установлено, что окислившиеся соединения металлических палубных конструкций [1, 2] приводили к значительным интермодуляционным искажениям сигналов мощных коротковолновых радиостанций. Позднее данный вид искажений получил название эффекта «ржавого болта» [3]. В работах [4, 5] исследованы режимы работы вибраторов, нагруженных на нелинейные неоднородности в виде контактов двух металлов.

В конце 70-х годов прошлого века появились первые сведения о прикладных работах, основанных на использовании эффекта нелинейного рассеяния. В патенте США [6] описана установка для дистанционной диагностики состояния обшивки космического аппарата по критерию величины отклика объекта на третьей гармонике зондирующего сигнала. Аналогичный подход был использован в [7] при создании мощного нелинейного локатора METTRA для обнаружения замаскированной бронетанковой техники. В работах [8–12] приводятся материалы, обобщающие результаты ключевых отечественных коллективов в данном направлении.

Следует отметить, что основные принципы работы нелинейных радиолокаторов на протяжении последних 40 лет не претерпели значительных изменений. В настоящее время применяется два подхода к построению нелинейных радиолокаторов, отличающихся режимом работы и используемыми тестовыми сигналами: гармонический и комбинационный. Первый режим основан на излучении гармонического зондирующего сигнала и приеме второй и/или третьей гармоники отраженного сигнала. Во втором режиме тестовый сигнал – двухчастотный радиоимпульс (в публикациях по нелинейной радиолокации такой сигнал также называется многочастотным), при этом продукты нелинейного преобразования измеряются на комбинационных частотах тестового сигнала. В работах авторов [13, 14] обсуждаются вопросы нелинейного рассеяния одночастотных и многочастотных сигналов. Показано влияние различных типов сигналов на чувствительность нелинейных радиолокаторов к продуктам нелинейного преобразования сигналов.

Существующие нелинейные радиолокаторы можно также разделить по виду воздействия: непрерывный и импульсный. В [15, 16] показана связь между дальностью обнаружения цели и скважностью радиоимпульсов, предложено для увеличения дальности нелинейных радиолокаторов использовать мощные радиоимпульсы со скважностью 1000–10000. В обзорной статье [17] рассмотрены особенности излучения и приема сверхширокополосных сигналов, пространственная длительность которых значительно меньше размеров антенны и/или продольного размера облучаемой цели. В [18] предложена схема нелинейного радиолокатора с использованием фазокодоманипулированных радиоимпульсных последовательностей, чем достигается улучшение разрешающей способности по дальности и дальности действия нелинейного радиолокатора.

В таблице приведены сравнительные технические характеристики некоторых выпускаемых нелинейных радиолокаторов.

## Сравнительные технические характеристики нелинейных радиолокаторов

Наименование	Частота излучаемого сигнала, МГц	Мощность, Вт	Вид воздействия	Номер гармоники
ORION HGO-4000	850–1005	0,03–3	Импульсный	2, 3
ORION NJE-4000	850–1005	0,014–1,4	Импульсный	2, 3
NR-МЮ	848	0,2–2	Импульсный	2, 3
NR-900EM	860	20–200	Импульсный	2, 3
NR-900P	900	25–150	Импульсный	2
ЛОРНЕТ-24	2400–2483	1-10	Импульсный, непрерывный	2, 3
ЛОРНЕТ	880–906	1–15	Импульсный, непрерывный	2, 3
Циклон-М2Ч		120–150	Двухчастотный, импульсный	Комбинацион- ные частоты
Циклон-М1А	680	250–300	Импульсный	2
Онега-2М	910	100	Импульсный	2
Онега-3М	910	100	Импульсный	2, 3
Родник-2К	980–1020	0,8	Непрерывный	2, 3
Катран-Люкс	800	1–15	Импульсный, непрерывный	2, 3
Super Broom 204	888,5	Не более 4	Непрерывный	2,3
RFD 23	860	25–150	Импульсный	2,3

Анализ технических характеристик и ассортимента выпускаемых радиолокаторов позволяет утверждать, что большинство выпускаемых в настоящее время нелинейных локаторов работают на основной частоте в диапазоне 850–1000 МГц. В представленных радиолокаторах преимущественно используется импульсный режим излучения со значениями пиковой мощности зондирующего сигнала от единиц до сотен ватт. Продукты нелинейного рассеяния наблюдаются на 2-й и 3-й гармониках тестового воздействия. В одном из выпускаемых нелинейных локаторов реализован режим измерения нелинейных искажений при воздействии двухчастотного зондирующего сигнала пиковой мощностью 120–150 Вт, что эквивалентно, по утверждению разработчиков [19], пиковой мощности 480–600 Вт для локатора с одночастотным режимом.

Ключевые задачи нелинейной радиолокации на ее текущей стадии развития можно свести к следующим:

- повышение чувствительности нелинейных локаторов к продуктам нелинейного рассеяния;
- увеличение дальности обнаружения цели;
- обеспечение высокого пространственного разрешения нелинейных объектов;
- классификация объектов по параметрам нелинейного отклика.

Существующие подходы, основанные на одночастотном воздействии на объект с последующим анализом продуктов нелинейного преобразования на 2-й и 3-й гармониках, подошли к границе технической реализуемости: переносные нелинейные радиолокаторы обеспечивают пиковую мощность в импульсе до 700 Вт при чувствительности приемников на гармониках сигнала до минус 120 дБм. Дальнейшее повышение тактико-технических характеристик нелинейных локаторов сопряжено с использованием новых типов тестовых воздействий, алгоритмов и аппаратуры для обработки продуктов нелинейного преобразования сигналов.

**Методы исследований.** В основе предлагаемого подхода лежит способ исследования нелинейных свойств объектов в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия [20]. Разработаны измерительный комплекс [21] и измерительный прибор для анализа временных и частотных характеристик цепей, а также характеристик нелинейности преобразования сигналов [22], в том числе с использованием упомянутого способа. Разработаны устройства формирования и обработки сверхширокополосных сигналов пикосекундной длительности для задач нелинейной рефлектометрии [23]. Разработаны и реализованы измерительные установки для исследования характеристик нелинейности объектов при воздействии сверхширокополосными тестовыми сигналами с фронтами пикосекундной длительности [24, 25]. Показано, что применение метода нелинейной рефлектометрии при исследовании характеристик СВЧ-цепей в пикосекундном диапазоне позволяет выделить и локализовать во времени отклики объектов, осуществляющих линейное и нелинейное преобразование

сигналов. Достигнутые научно-практические результаты в данной области позволили предложить использовать данный подход для задач сверхширокополосной нелинейной радиолокации.

Сущность предлагаемого подхода состоит в воздействии на объект последовательно сверхширокополосных тестовых сигналов. Число таких сигналов – два или более. Первый из сигналов является референсным (опорным), второй и последующие – результатом фазовой (амплитудной) обработки первого по известному закону. Под характеристикой нелинейности [20] понимается набор временных зависимостей разностей отклика исследуемого объекта  $u_0(t)$  на референсное тестовое воздействие  $x_0(t)$  и свертки обратного преобразования Фурье от отношения спектров отклика объекта  $u_n(t)$  на  $n$ -е воздействие  $x_n(t)$  с функцией тестового воздействия  $x_0(t)$ :

$$\varepsilon_n(t) = u_0(t) - F^{-1} \left[ \frac{F\{u_n(t)\}}{F\{x_n(t)\}} \right] \times x_0(t). \quad (1)$$

Для оценки эффективности использования предложенного подхода в решении задач нелинейной радиолокации разработана модель экспериментальной установки в среде численного электромагнитного моделирования, представляющая собой две встречно расположенных сверхширокополосных (СШП) антенны на заданном расстоянии 1 м, в центре между которыми установлен нелинейный отражатель. Внешний вид модели приведен на рис. 1.

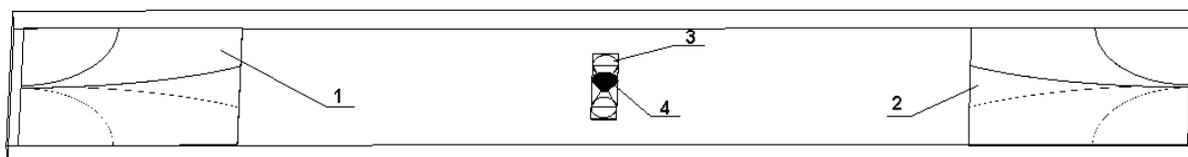


Рис. 1. Модель экспериментальной установки: приемная (1) и передающая (2) антенны, отражатель (3) и нелинейный элемент (4)

Для использования в составе экспериментальной установки была спроектирована сверхширокополосная антенна Вивальди со следующими параметрами:

- коэффициент стоячей волны напряжения в полосе 1,2–10 ГГц не более 1,5;
- уровень боковых лепестков диаграммы направленности: –6, –13,7 и –5 дБ, на частотах 1, 5 и 10 ГГц соответственно;
- ширина основного лепестка диаграммы направленности по уровню –3 дБ на частотах 1, 5 и 10 ГГц составляла: 65, 33 и 18 град.

Разработан сверхширокополосный отражатель в виде печатного диполя с вибраторами, вырождающимися в окружности. Диаметр окружностей 35 мм, подложка отражателя – стеклотекстолит FR4, расчетный коэффициент стоячей волны на входе в полосе от 1,2 до 10 ГГц не превышал 5.

Для моделирования нелинейного элемента (см. рис. 1, поз. 4) использовалась spice-модель [26] СВЧ-диода Aeroflex MGV075-08.

С использованием предложенной модели проведены предварительные исследования режимов работы классического (одночастотного) нелинейного локалатора с анализом продуктов нелинейного рассеяния на высших гармониках тестового воздействия и предложенного принципа построения сверхширокополосного нелинейного локалатора. Для этого были рассчитаны параметры матриц рассеяния экспериментальной установки в полосе частот от 1 до 10 ГГц в режиме работы отражателя на согласованную нагрузку. Затем последовательно задавались режимы возбуждения передающей антенны (см. рис. 1, поз. 1), рассчитывались напряжения на входах/выходах приемной и передающих антенн, а также на входе/выходе нелинейного отражателя.

Первый из режимов возбуждения соответствовал работе одночастотного импульсного нелинейного локалатора. Передающая антенна возбуждалась радиоимпульсом амплитудой 5 В. Длительность радиоимпульса равна 100 нс, несущая частота 1,5 ГГц, огибающая – окно Кайзера с параметром  $B = 10$ . Расчетная пиковая мощность локалатора составляла  $P_{п} = 0,5$  Вт, средняя мощность равна  $P_{ср} = 1,75$  мВт. Форма радиоимпульсного воздействия и его спектр приведены на рис. 2.

В результате численного моделирования рассчитаны временные зависимости напряжений на входах/выходах приемной и передающей антенн. На рис. 3 приведены вычисленные спектральные характеристики сигналов. Значения спектральных характеристик сигналов на входах/выходах передающей и приемной антенн нормированы к значению амплитудного спектра на основной гармонике (1,5 ГГц) на входе соответствующей антенны.

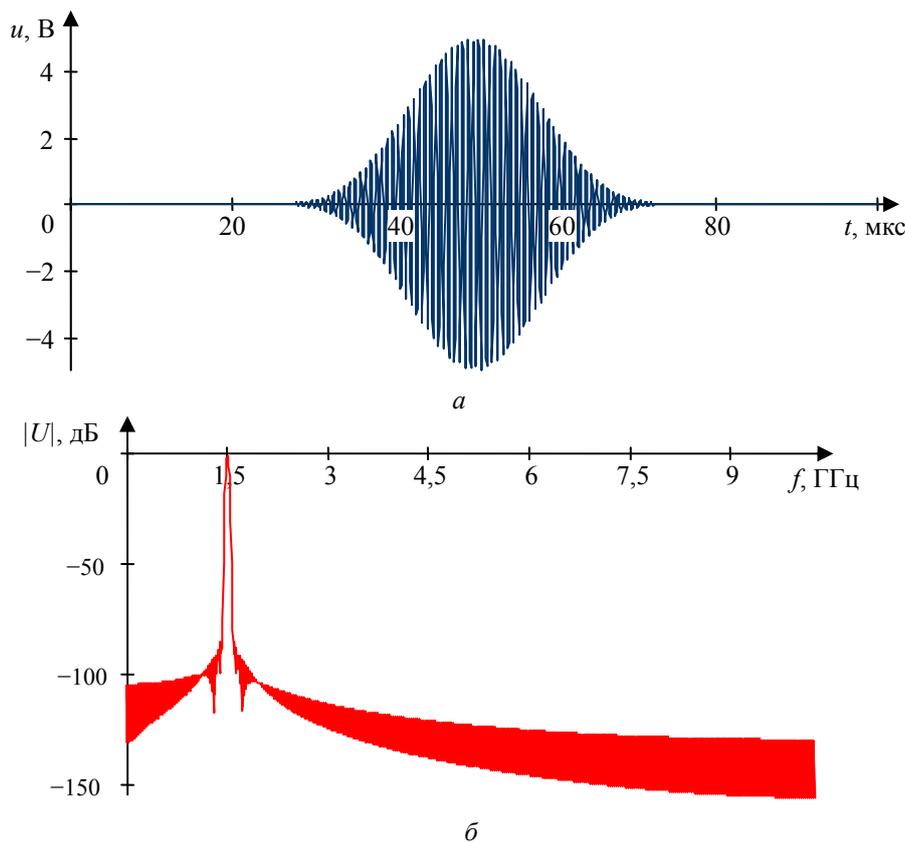


Рис. 2. Форма (а) и амплитудный спектр (б) тестового воздействия в режиме одночастотного импульсного нелинейного радиолокатора

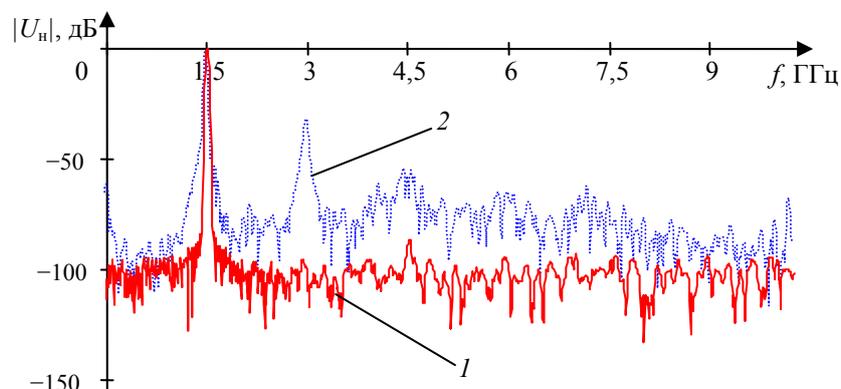


Рис. 3. Нормированные амплитудные спектры сигналов на входе приемной (2) и передающей (1) антенн

По полученным значениям были рассчитаны коэффициенты гармонических искажений сигналов на входе передающей и приемной антенн. При расчете учитывались все высшие гармоники тестового сигнала, попадающие в анализируемую полосу частот (со второй по шестую). Рассчитанные значения коэффициентов гармонических искажений составили:  $K_{Г1} = 0,007\%$  – для сигнала на входе передающей антенны;  $K_{Г2} = 3\%$  – для сигнала на входе приемной антенны.

При этом коэффициент гармонических искажений, рассчитанный для модели тестового сигнала (см. рис. 2), не превышал 0,0001%.

Для исследования работы сверхширокополосного нелинейного локатора в качестве референсного тестового сигнала использовалась первая производная от импульса Гаусса. Амплитуда сигнала равна 5 В. Длительность, измеренная по уровню 50% от амплитудного значения, равна 200 пс. Форма сигнала и его амплитудный спектр приведены на рис. 4.

Пиковая мощность сверхширокополосного импульсного воздействия, как и гармонического воздействия, составила 0,5 Вт при том, что средняя мощность в данном режиме не превышает 50 мВт.

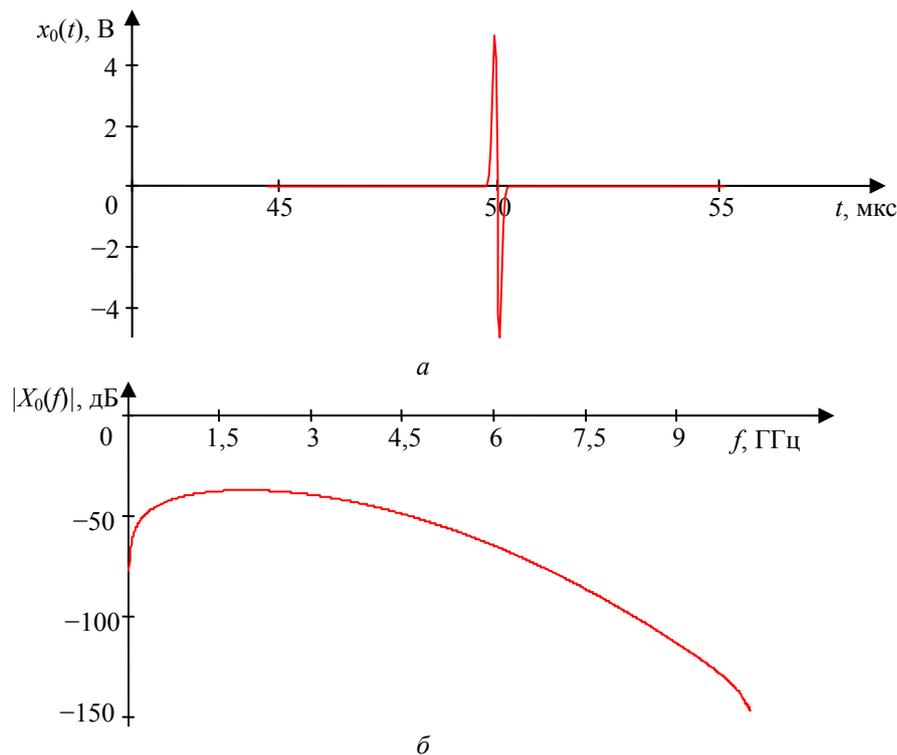


Рис. 4. Форма (а) и амплитудный спектр (б) референсного тестового воздействия в режиме работы СШП нелинейного радиолокатора

Для получения второго и третьего тестовых воздействий была задана функция фазовой обработки референсного сигнала вида

$$H(f) = e^{-i \cdot 4 \cdot d \cdot \pi^2 \cdot f^2}, \tag{2}$$

где  $f$  – частоты спектральных компонент сигнала;  $d$  – коэффициент, определяющий наклон характеристики группового времени запаздывания спектральных компонент сигнала на выходе фазового фильтра.

При некоторых допущениях можно считать коэффициент  $d$  параметром, пропорциональным расширению базы сигнала в результате фазовой обработки. Были рассчитаны формы дополнительных тестовых воздействий ( $x_1$  и  $x_2$ ) для двух значений коэффициента  $d$ :  $d_1 = 0,08 \cdot 10^{18}$  и  $d_2 = 0,4 \cdot 10^{18}$ , что соответствует увеличению базы референсного сигнала ( $x_0$ ) в 10 и 50 раз соответственно. На рис. 5 приведены формы второго (кривая 1) и третьего (кривая 2) тестовых воздействий в режиме сверхширокополосной нелинейной радиолокации.

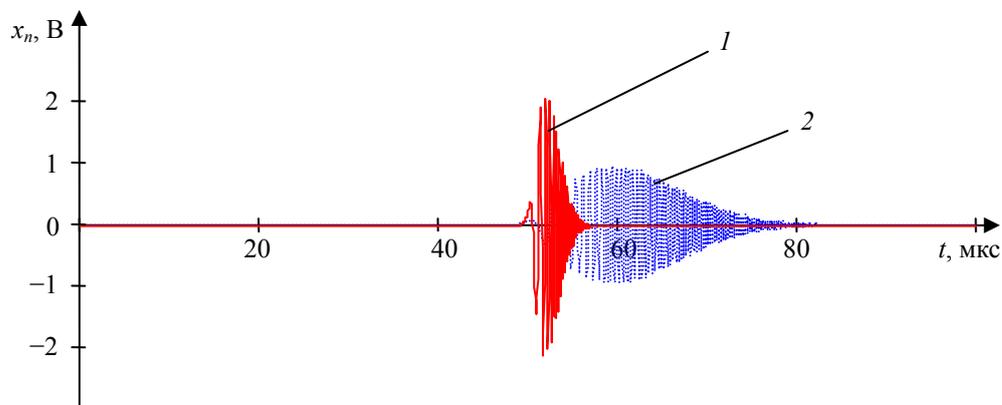


Рис. 5. Форма второго (1) и третьего (2) тестовых воздействий в режиме работы СШП нелинейного радиолокатора

В результате численного моделирования рассчитаны временные формы сигналов на входах приемной и передающей антенн в трех режимах воздействия: при воздействии референсным сигна-

лом (см. рис. 4, а), а также с использованием дополнительных воздействий (см. рис. 5), полученных в результате фазовой обработки референсного воздействия по закону (2).

На рис. 6 показаны формы сигналов на входе передающей (кривая 1) и приемной (кривая 2) антенн, полученные при воздействии референсного сигнала.

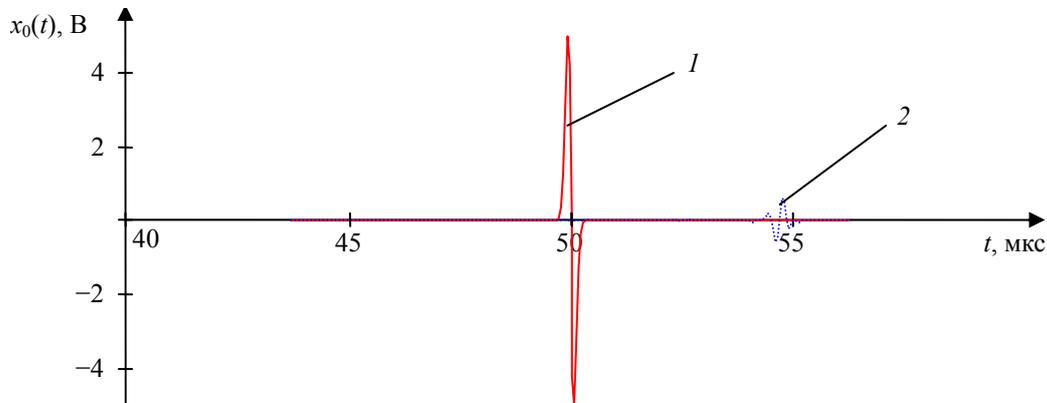


Рис. 6. Формы сигналов на входе передающей (1) и приемной (2) антенн в режиме работы СШП нелинейного радиолокатора

Задержка между импульсами соответствует времени распространения сигнала с выхода передающей на вход приемной антенны, расстояние между которыми составляет 1,6 м.

Результаты, аналогичные представленным на рис. 6, были получены для второго и третьего тестовых воздействий (см. рис. 5), после чего с использованием выражения (1), были рассчитаны характеристики нелинейности преобразования сигналов, наблюдаемых на выходе приемной антенны.

На рис. 7 показаны рассчитанные характеристики нелинейности преобразования сверхширокополосных тестовых сигналов, полученные путем совместной обработки откликов объекта на пары тестовых воздействий, первый из которых представлял собой производную от импульса Гаусса, второй – результат фазовой обработки первого по закону (2) при двух значениях наклона характеристики группового времени запаздывания.

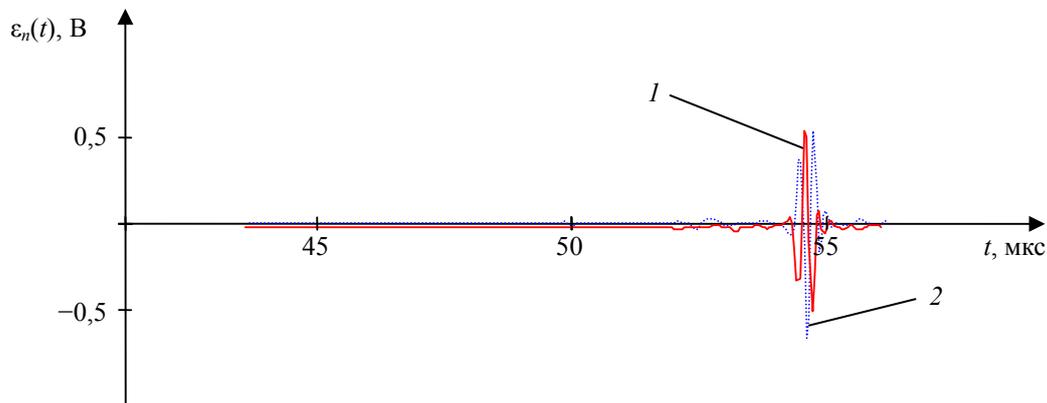


Рис. 7. Характеристики нелинейности преобразования сверхширокополосных тестовых сигналов

Количественная оценка нелинейных искажений по аналогии с коэффициентом гармоник возможна путем вычисления отношения энергии нелинейного отклика ( $\varepsilon_n(t)$ ) и отклика на референсное воздействие ( $u_0(t)$ )

$$E_n = \int_0^T \frac{\varepsilon_n(t)^2}{u_0(t)^2} dt, \quad (3)$$

где  $T$  – время наблюдения;  $u_0(t)$  – линейный отклик объекта на референсное тестовое воздействие;  $\varepsilon_n(t)$  – характеристика нелинейности объекта, рассчитанная в соответствии с (1).

Пределы интегрирования могут быть изменены в случае, если имеется возможность временно-го разделения откликов (как линейных, так и нелинейных) от нескольких объектов.

Рассчитанные с использованием (3), коэффициенты нелинейных искажений сверхширокополосного сигналов составили  $E_1 = 74,18\%$  и  $E_2 = 96,21\%$ , что более чем в 20 раз превышает аналогичные в сущности оценки, выполненные с использованием классического подхода. При этом средняя мощность сверхширокополосного импульсного воздействия в 17,5 раза меньше, чем средняя мощность гармонического воздействия.

**Заключение.** В результате моделирования было установлено, что для рассмотренного частного случая предложенный подход обладает лучшей чувствительностью к продуктам нелинейного преобразования (более чем в 20 раз) при меньшей энергии тестового воздействия (в 17,5 раза) по сравнению с классическим одночастотным подходом. При этом увеличение базы второго тестового воздействия позволяет повысить обнаружительную способность сверхширокополосного нелинейного лоатора (более чем на 20% при увеличении базы в 5 раз для представленной модели).

Результаты моделирования позволяют утверждать о перспективности применения предложенного подхода для задач нелинейной радиолокации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-07-31162 мол\_а).

#### *Литература*

1. Eastman A. The Generation of Spurious Signal by Nonlinearity of the Transmission Path / A. Eastman, L. Horle // Proc. IRE. – 1940. – Vol. 28. – P. 438–443.
2. Betts J. Intermodulation interference in mobile multiple-transmission communication systems operating at high frequencies (3–30 MHz) / J. Betts, D. Ebenezer // Proc. IEE. – 1973. – Vol. 120. – P. 1337–1344.
3. Mason H.P. Multiple channel VHF reception on naval ships // The Radio and Electronic Engineer. – 1973. – Vol. 43, № 5. – P. 299–311.
4. Исследование нелинейных электрических эффектов в контакте двух металлов, включенном в дипольную антенну / Г.С. Мисежников, М.М. Мухина, А.Г. Сельский, В.Б. Штейншлейгер // Вопросы радиоэлектроники. – 1978. – Вып. 1.
5. Штейншлейгер В.Б. К теории рассеяния электромагнитных волн вибратором с нелинейным контактом // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, вып.7. – С. 1329.
6. Pat. USA № 3732567 Junction range finder / Low G.M., Morisette S., Sea P.G., Frazlmer M.J.
7. Mettra signature – radars section measurement / D.A. Danber, D. Hull // Final Report instrumentation Manual. – San-Diego, 1978. – 88 p.
8. Кузнецов А.С. Методы исследования эффекта нелинейного рассеяния электромагнитных волн / А.С. Кузнецов, Г.И. Кутин // Зарубежная электроника. – 1985. – № 4. – С. 51–53.
9. Разиньков С.Н. Математическое моделирование нелинейного рассеяния электромагнитных волн в радиолокации // Зарубежная электроника. – 1997. – № 1. – С. 87–96.
10. Горбачев А.А. Особенности зондирования электромагнитными волнами сред с нелинейными включениями // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41, № 2. – С. 152–157.
11. Вернигоров Н.С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами // Радиотехника и электроника. – 1997. – № 10. – С. 1181–1185.
12. Петров Б.М. Эффект нелинейного рассеяния / Б.М. Петров, Д.В. Семенихина, А.И. Паньчев. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 202 с.
13. Ларцов С.В. О нелинейном рассеянии при использовании многочастотного и одночастотного зондирующих сигналов // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 7. – С. 833–838.
14. Вернигоров Н.С. К вопросу о применении многочастотного сигнала в нелинейной радиолокации / Н.С. Вернигоров, А.Р. Борисов, В.В. Харин // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, вып. 1. – С. 63–66.
15. Harger R. Harmonic Radar System for Near-Ground In-Foliage Nonlinear Scatterers // IEEE Trans., AES-12. – 1976. – № 2. – P. 230–245.
16. Беляев В.В. Состояние и перспективы развития нелинейной радиолокации / В.В. Беляев, А.Т. Маюнов, С.Н. Разиньков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 6. – С. 59–78.
17. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54. – С. 5–31.
18. Пат 2382380 РФ. МПК G01S13/00. Способ нелинейной радиолокации / В.П. Лихачев, Н.А. Усов. – 2008131114/09; заявл. 28.07.2008; опубл. 20.02.2010.

19. Сайт ООО «Вихрь» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vikhr.ru/product>, 137, свободный (дата обращения: 22.10.2013).
20. Пат. 2263929 РФ, МПК7 G01S13/00. Способ исследования нелинейности преобразования сигналов объектом. / Э.В. Семенов (РФ). – № 2004110640; заявл. 07.04.2004; опубл. 11.10.2005; Бюл. № 31. – 1 с.
21. Лошилов А.Г. Цифровой измерительный комплекс для измерения частотных и импульсных характеристик четырехполюсников / А.Г. Лошилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин // Изв. Том. политех. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 37–42.
22. Векторный импульсный измеритель характеристик цепей и проводных систем / А.А. Бомбизов, А.А. Ладур, А.Г. Лошилов и др. // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.
23. Разработка устройств обработки сверхширокополосных импульсных сигналов для исследования нелинейных свойств объектов методом нелинейной рефлектометрии / А.Г. Лошилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин и др. // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 166–170.
24. Semyonov E. Measurements of the Nonlinearity of the Ultra Wideband Signals Transformation / E. Semyonov, A. Loschilov // Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation. – Rijeka, Croatia : InTech, 2011. – P. 3–16.
25. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности объектов при воздействии импульсами пикосекундной длительности / А.Г. Лошилов, Т.Х. Бибииков, Э.В. Семёнов, Н.Д. Малютин // Тр. 22-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрымиКо'2012). – Севастополь: Вебер. – 2012. – С. 815–816.
26. MGV Spice models / Aeroflex [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.aeroflex.com/ams/Metelics/pdffiles/MGV\\_spice\\_models.pdf](http://www.aeroflex.com/ams/Metelics/pdffiles/MGV_spice_models.pdf), свободный (дата обращения: 22.10.2013).

---

**Лошилов Антон Геннадьевич**

Канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник СКБ «Смена»

Тел.: 8 (383-2) 25-33-60

Эл. почта: [main@skbsmena.ru](mailto:main@skbsmena.ru)

Loschilov A.G.

**Development of principles of nonlinear ultra-wideband radar**

The approach for remote detection of objects with non-linear properties is proposed. The approach investigates the combinations of nonlinear scattering of ultra-wideband test signals with small and large base. A model of an experimental setup to evaluate the efficiency of the proposed approach was designed.

The efficiency is demonstrated on a special case where the proposed approach showed better sensitivity to nonlinear transformation products (more than 20 times) at a lesser energy test exposure (17.5-fold) compared to the classical single-frequency approach. The simulation results suggest promising applications of the proposed approach to problems of nonlinear radiolocation.

**Keywords:** nonlinear radar, ultra-wideband pulse.