

УДК 537.874.4

А.Е. Байкалова, Э.В. Семенов

Экспериментальное исследование нелинейной эффективной площади рассеяния объектов в видеоимпульсном режиме

Впервые (судя по литературным источникам) представлена количественная информация о нелинейных рассеивающих свойствах объектов зондирования при воздействии сигналов, близких к видеоимпульсным, что позволит предъявлять требования к передатчикам и приемникам нелинейных видеоимпульсных локаторов. Для проведения исследований разработан прототип нелинейного видеоимпульсного локатора на лабораторных приборах. В апертуре антенны он создает импульсное поле интенсивностью 35 Вт/м^2 с длительностью фронта $0,23 \text{ нс}$. В качестве объектов зондирования используются кольца диаметром 6 см из медного провода поперечным сечением 4 мм^2 (короткозамкнутое кольцо в качестве линейного объекта и кольцо, в разрыв которого включен диод HSMS-8101 в качестве нелинейного объекта). Нелинейная эффективная площадь рассеяния (НЭПР) нелинейного объекта составила $0,041 \text{ мм}^2$, что укладывается в типичный диапазон НЭПР объектов для обычной (гармонической) нелинейной локации.

Ключевые слова: нелинейность, локатор, эффективная площадь рассеяния, сверхширокополосное зондирование.
DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-13-18

Применение сверхширокополосных видеоимпульсных сигналов потенциально позволяет увеличить дальность, разрешающую способность по дальности и проникающую способность нелинейной локации [1–3]. При использовании коротких видеоимпульсных сигналов (в сравнении с радиоимпульсами большой длительности) увеличивается пиковая мощность зондирующего сигнала при фиксированной средней мощности. Это позволяет рассчитывать на увеличение уровня нелинейного отклика, поскольку при более мощных воздействиях объект отказывается в режиме более сильной нелинейности. Кроме того, увеличивается проникающая способность за счет наличия низкочастотной части спектра.

В работах [2, 4] рассматриваются установки, которые могут послужить прототипами для создания видеоимпульсных нелинейных локаторов. Однако в этих статьях протестирована их работа на относительно крупных объектах с фронтальным поперечным сечением около $0,05 \text{ м}^2$. Поэтому актуальной остается повышение чувствительности этих установок по отношению к нелинейным объектам.

В настоящей статье рассмотрен прототип нелинейного видеоимпульсного локатора с улучшенной чувствительностью и показана возможность обнаружения с его помощью малоразмерных нелинейных объектов.

Обнаружительная способность систем локации определяется рассеивающими свойствами объектов.

Традиционным параметром, описывающим рассеивающие свойства объекта в линейной локации, служит эффективная площадь рассеяния (ЭПР), являющаяся отношением полной рассеянной объектом мощности к интенсивности зондирующего поля [5]. Для объектов с нелинейным откликом можно определить аналогичный параметр, называемый нелинейной эффективной поверхностью рассеяния (НЭПР), определяемый как отношение мощности нелинейного отклика объекта к интенсивности зондирующего поля [6–10].

Как правило, в существующих работах по измерению НЭПР экспериментальные исследования проводятся в гармоническом режиме, с определенными шириной спектра и длительностью сигнала [6–10]. Для видеоимпульсного режима, по нашим сведениям, таких публикаций нет, поэтому в настоящей статье представлена методика расчета нелинейной эффективной площади рассеяния видеоимпульсных сигналов исследуемыми объектами.

Прототип нелинейного видеоимпульсного локатора

Структурная схема разработанного нелинейного видеоимпульсного локатора представлена на рис. 1. За основу мы приняли прототип, описанный в [4].

В качестве зондирующих импульсов используются сверхширокополосные сигналы положительной x_1 и отрицательной x_2 полярности (рис. 2), формируемые двухтактным обострителем импульсов [11].

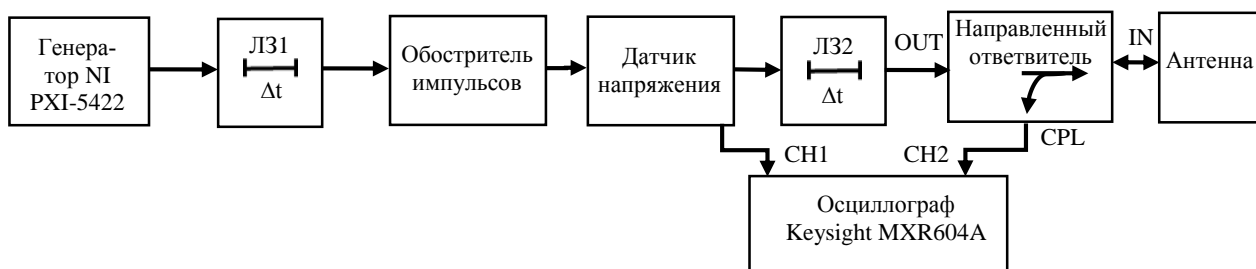


Рис. 1. Структурная схема прототипа нелинейного видеоимпульсного локатора

На его вход подается запускающий сигнал: меандр амплитудой 12 В от генератора National Instruments PXI-5422. Поскольку вход обострителя не является согласованным по волновому сопротивлению, сигнал на него подается через линию задержки ЛЗ1 (для уменьшения влияния переотражений во входной цепи). Амплитуда быстрой части фронта выходного сигнала обострителя импульсов составляет 7,2 В. Длительность фронтов сигнала на согласованной нагрузке равна 0,23 нс.

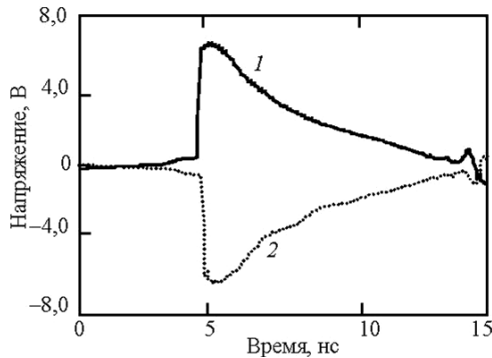


Рис. 2. Зондирующие сигналы x_1 (1) и x_2 (2)

В данной работе используется метод определения нелинейности [4], в котором нелинейный отклик объекта $\varepsilon(t)$ отыскивается как взвешенная разность откликов $u_{1,2}$ на зондирующие сигналы $x_{1,2}$ разной полярности:

$$\varepsilon(t) = u_1(t) - u_2(t) * x_1(t) * F^{-1}\{1/F[x_2(t)]\},$$

где F и F^{-1} — прямое и обратное преобразование Фурье соответственно, $*$ — символ свертки.

Интересующие нас объекты содержат p - n -переходы, которые дают различные отклики на сигналы разной полярности, что и создает разностный сигнал при обработке откликов (нелинейный отклик). Для учета возможного различия формы зондирующих сигналов требуется регистрировать не только отклики от объектов, но и зондирующие сигналы. Для этого к выходу обострителя импульсов присоединен датчик напряжения, состоящий из резистора сопротивлением 470 Ом, который подключен к проходящему коаксиальному волноводу. Сигнал с выхода датчика напряжения подается на первый канал регистрирующего устройства (осциллографа).

В представленных исследованиях используется однополярный ступенчатый зондирующий сигнал [4], поэтому от антенны возникает достаточно сильное отражение (преимущественно в области нижних частот). Если не предпринять специальных мер, то это отражение попадает в канал регистрации зондирующих сигналов. Для исключения этого эффекта после датчика напряжения включена линия задержки ЛЗ2. Она сдвигает отражения от антенны за пределы окна наблюдения.

В качестве антенны использована совмещенная приемопередающая антенна типа «улитка» [12]. Она выполнена из листа латуни и помещена в пластиковый корпус размерами 26×19,5×17,5 см. Комбинированная антенна излучает сигнал в пространство и

принимает отраженный сигнал, который регистрируется вторым каналом осциллографа. Отделение отраженной от объекта волны обеспечивает направленный ответитель Mini-Circuits ZUDC20-183+ [13].

Отраженная от объекта волна регистрируется на выходе CPL направленного ответителя (см. рис. 1). Использованный направленный ответитель, по данным производителя [13], вносит ослабление от своего входа IN до выхода CPL, равное 20 дБ. Соответственно, для получения отклика объекта из сигнала, зарегистрированного вторым каналом осциллографа, нужно зарегистрированный сигнал увеличить на 20 дБ. Далее в статье на графиках и в формулах фигурируют уже отклики объекта.

Исследуемые объекты

В качестве тестового используется объект с известными параметрами: кольцо диаметром 6 см из медного провода поперечным сечением 4 мм², в разрыве которого находится диод HSMS-8101 [14] (рис. 3, а). По предварительным оценкам, отражение от такого кольца может примерно соответствовать отражению от малоразмерных электронных устройств.

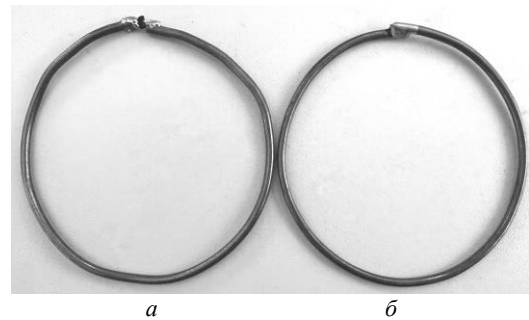


Рис. 3. Тестовые объекты:

а — кольцо с диодом, б — короткозамкнутое кольцо

Регистрирующая система локатора обладает собственной нелинейностью, величину которой нужно знать, чтобы по превышении этой величины обнаруживать нелинейные объекты. Для оценки собственной нелинейности приемной системы локатора использован тестовый линейный объект. Он представляет собой короткозамкнутое кольцо с такой же геометрией (см. рис. 3, б).

Радиолокационный отклик от линейного и нелинейного объектов

Тестовые объекты поочередно располагались на расстоянии 3 см от антенны на ее оптической оси (расстояние, согласно [15], рассчитывалось от антенны до центра объекта). Плоскости колец были перпендикулярны вектору магнитного поля. Далее отклики на импульсы разной полярности регистрировались осциллографом и обрабатывались с использованием калибровки на свободное пространство [4].

Данная калибровка состоит в том, что приемной системой локатора регистрируется сигнал в отсутствие исследуемого объекта. Весь этот сигнал рассматривается как систематическая погрешность и затем вычитается из сигнала, зарегистрированного приемником при наличии объекта зондирования.

На рис. 4 изображены общий отклик (кривая 1) и нелинейные отклики (кривые 2 и 3) для объекта, представленного короткозамкнутым кольцом. Здесь и далее под общим откликом объекта понимается его отклик на зондирующий сигнал положительной полярности. Кривая 2 получена при регистрации сигналов стробоскопическим осциллографом Pico Technology 9301-25 [16] (как в [4]), а кривая 3 – с использованием осциллографа реального времени Keysight MXR604A [17]. Можно видеть, что стробоскопический осциллограф имеет значительно большие собственные нелинейные искажения. Причина этого, по нашим оценкам, состоит в систематическом смещении отдельных фрагментов сигнала при установке задержки стробирующего импульса [18]. Поэтому далее регистрация сигналов выполнялась осциллографом Keysight MXR604A.

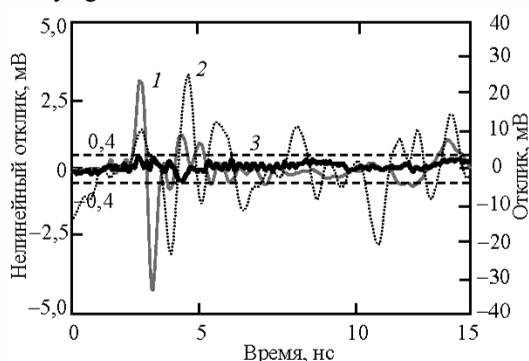


Рис. 4. Общий отклик (1) и нелинейные отклики для объекта, представленного короткозамкнутым кольцом: 2 – при регистрации сигналов стробоскопическим осциллографом; 3 – при регистрации осциллографом реального времени

При использовании осциллографа реального времени амплитуда нелинейного отклика, регистрируемого при линейных свойствах исследуемого объекта (собственная нелинейность приемника), не превышает 0,4 мВ (горизонтальные штриховые линии). Это составляет примерно 1,3 % по сравнению с уровнем общего отклика, равного 32 мВ. Эта величина (0,4 мВ) представляет собой порог, определенное превышение которого позволяет идентифицировать исследуемый объект как нелинейный.

На рис. 5 изображены общий (кривая 1) и нелинейный (кривая 2) отклики объекта, представленного кольцом с диодом.

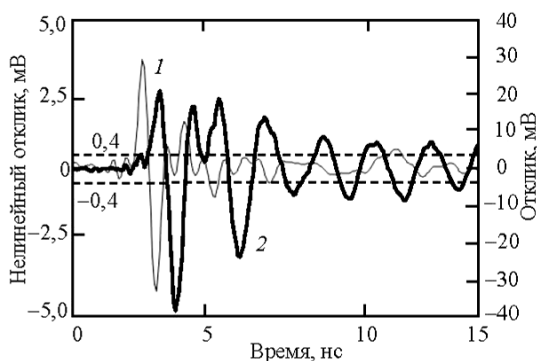


Рис. 5. Общий (1) и нелинейный (2) отклики для объекта, представленного кольцом с диодом

Можно заметить, что при аналогичном уровне общего отклика регистрируется нелинейный отклик (5,0 мВ), значительно превышающий указанный порог; объект идентифицируется как нелинейный.

Методика расчета эффективной площади рассеяния

НЭПР объекта S , как и ЭПР в линейной локации, определяется как отношение полной рассеянной объектом мощности $P_{об}$ к интенсивности падающего поля $I_{пад}$:

$$S = P_{об} / I_{пад}. \quad (1)$$

Данные энергетические параметры будут определяться по отношению к пиковым значениям сигналов.

Классически ЭПР объекта определяется в дальней зоне антенны в условиях плоской волны. Однако специфика нелинейных локаторов небольшой мощности не позволяет выполнить это условие: интенсивность поля вдали от антенны будет слишком малой, и объект не будет проявлять нелинейность в достаточной степени. Поэтому в данном случае объект располагается вблизи антенны. Так можно поступить потому, что антенна (рис. 6) включает ТЕМ-рупор, в котором формируется волна, близкая к плоской поперечной. Конечно, в устье рупора (апертура антенны) имеют место краевые эффекты, что обуславливает некоторую методическую погрешность в определении ЭПР.

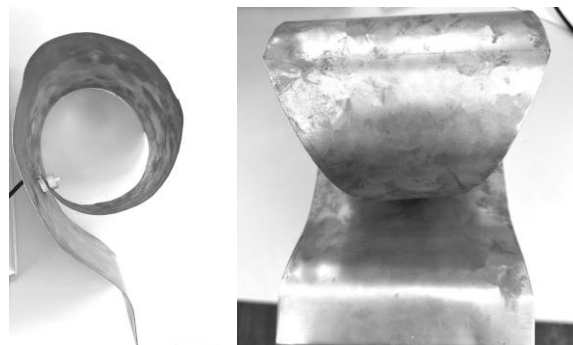


Рис. 6. Общий вид приемопередающей антенны и геометрические размеры рупора

Интенсивность поля в апертуре антенны можно определить как отношение пиковой мощности передатчика $P_{пер}$ к площади устья рупора антенны $S_{ант}$. Мощность передатчика, при этом будет определяться как отношение квадрата максимума генерируемого напряжения, равного 7,2 В, к волновому сопротивлению подводящей линии, равному 50 Ом (1,0 Вт). Тогда интенсивность падающего поля вблизи антенны можно определить по формуле

$$I_{пад} = P_{пер} / S_{ант}. \quad (2)$$

Площадь устья рупора антенны определяется как произведение высоты и ширины рупора антенны (см. рис. 6) и составляет 0,0298 м². Получаем, что интенсивность падающего поля вблизи антенны, в соответствии с (2), будет составлять 34,8 Вт/м².

Рассеянная объектом мощность $P_{об}$ при этом будет определяться в момент времени, когда напряжение отклика объекта в приемном тракте $U_{об}$ достигает своего максимума, по следующей формуле:

$$P_{\text{об}} = k U_{\text{об}}^2 / \rho, \quad (3)$$

где ρ – волновое сопротивление нагрузки антенны, k – коэффициент, учитывающий, что антенна принимает только часть мощности, рассеянной объектом.

Для отыскания коэффициента k примем, что излучение объекта является изотропным. Будем считать также, что апертура антенны лежит в основании сферического сегмента и площадь этого основания равна апертуре $S_{\text{ант}}$. При этом условии радиус основания сферического сегмента равен $a = \sqrt{S_{\text{ант}} / \pi}$. Для вышеуказанной площади апертуры получаем $a = 97,4$ мм. Расстояние d от центра объекта зондирования до апертуры равно 30 мм (рис. 7), откуда находим радиус r сферы, из которой образован сегмент: $r = \sqrt{a^2 + d^2} = 102$ мм. Высота сегмента $h = r - d = 72$ мм. Отсюда по известной формуле находим площадь сферического сегмента $A = 2\pi rh = 0,0461$ м². Отношение полной площади сферы $4\pi r^2$ к площади сферического сегмента A и даст коэффициент k :

$$k = 4\pi r^2 / A.$$

В нашем случае $k = 2,83$.

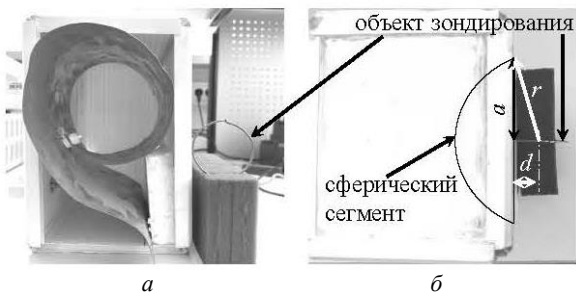


Рис. 7. Геометрия эксперимента:
а – вид сбоку, б – вид сверху

Исходя из экспериментальных графиков, представленных на рис. 5, амплитуды общего и нелинейного откликов объекта составляют 32 и 5,0 мВ соответственно. Таким образом, вычислив по (3) мощность общего и нелинейного откликов и отнеся ее по (1) к интенсивности падающего поля, получим эффективные поверхности рассеяния (ЭПР и НЭПР) тестового объекта. Для кольца, в разрыв которого установлен диод, получаем ЭПР и НЭПР 1,7 и 0,041 мм² соответственно.

При оценке погрешности полученных результатов мы исходим из того, случайной погрешностью при регистрации сигналов можно пренебречь. Действительно, экстремумы на кривой 3 рис. 4 четко синхронизированы с принимаемым сигналом, т.е. представляют собой систематическую погрешность по отношению к нему. Эти экстремумы обусловлены собственной нелинейностью приемного тракта и, как показано в проведенных экспериментах, не превышают по абсолютной величине 0,4 мВ. Получаем, что в отношении к общему и нелинейному откликам (амплитудой 32 и 5,0 мВ) эта систематическая погрешность составляет 1,3 и 8% соответственно.

Согласно [7], в гармоническом режиме измерения НЭПР большинства малоразмерных объектов составляют и 0,00001...0,1 мм² (НЭПР) на второй гармонике при $I_{\text{пад}} = 1$ Вт/м². Мощность сигнала на второй гармонике квадратично зависит от $I_{\text{пад}}$, поэтому НЭПР увеличивается пропорционально интенсивности. Для использованной в данном эксперименте интенсивности 34,8 Вт/м² диапазон НЭПР составит 0,00035...3,5 мм².

Полученное значение нелинейной эффективной поверхности рассеяния объекта в видеоимпульсном режиме зондирования входит в диапазон НЭПР для обычной (гармонической) локации. Это, с одной стороны, указывает на корректность проведенного эксперимента, с другой – позволяет рассчитывать на перспективность развития нелинейной видеоимпульсной локации. Действительно, если отражательная способность объектов для гармонического и видеоимпульсного сигнала сопоставима, то, переходя к коротким видеоимпульсным воздействиям, мы можем значительно увеличить пиковую мощность сигнала, а следовательно, и дальность обнаружения объектов.

Отметим, что указанный в [7] диапазон НЭПР соответствует объектам с ЭПР 10...1000 см², что намного больше ЭПР объектов в нашем эксперименте. Несмотря на то, что тестовый объект обладает относительно небольшой площадью рассеяния, нелинейный видеоимпульсный локатор способен обнаружить его и отличить от линейного объекта.

Заключение

В данной работе впервые (судя по известным нам литературным источникам) была представлена количественная информация о нелинейных рассеивающих свойствах объектов при зондировании в видеоимпульсном режиме.

В качестве экспериментальной установки использовался прототип нелинейного видеоимпульсного локатора. Такой локатор является первым локатором с совмещенной приемной и передающей антеннами, который способен обнаружить нелинейные объекты в видеоимпульсном режиме.

Удалось обнаружить и идентифицировать по нелинейным свойствам объекты с эффективной площадью рассеяния 1,7 мм².

Полученные данные позволяют предъявлять требования к передатчику и приемнику нелинейного видеоимпульсного локатора для достижения требуемой дальности обнаружения объектов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0015).

Литература

1. Semyonov E. V. Nonlinear scattering of narrowband and ultra-wideband signals at equal peak intensity // 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE – 2021): proceedings. Novosibirsk, November 19–21, 2021. – P. 295–298.

2. Semyonov E.V. Modeling and Experimental Study of the Nonlinear Baseband Pulse Radar Prototype / E.V. Semyonov, A.V. Fateev, M.A. Nazarov, A.A. Berezin // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. Divnomorskoe, Russian Federation. – 2023. – P. 428–431.
3. Якубов В.П. Использование сверхширокополосного излучения для диагностики нелинейностей / В.П. Якубов, Д.В. Лосев, А.И. Мальцев // *Журнал радиоэлектроники*. – 2000. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar00/1/text.html>, свободный (дата обращения: 25.11.2023).
4. Baikalova A.E. Means and Methods for Decoupling of Receiving and Transmitting Paths of Nonlinear Baseband Pulse Radar / A.E. Baikalova, E. V. Semyonov // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. – Divnomorskoe, Russia, 2023. – P. 288–291.
5. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы. Основы теории и построение: справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис». – 1998. – 825 с.
6. Щербаков Г.Н. Исследование рассеивающих свойств нелинейного биконического отражателя физической модели боеприпаса с электронными устройствами / Г.Н. Щербаков, А.В. Николаев, Р.И. Усманов, Ю.А. Шлыков // *Спецтехника и связь*. – 2011. – № 1. – С. 33–39.
7. Щербаков Г.Н. К оценке фундаментальных пределов в нелинейной радиолокации / Ю.А. Шлыков, А.В. Николаев, А.В. Бровин // *Спецтехника и связь*. – 2008. – № 2. – С. 21–25.
8. Gallagher K.A. Harmonic Radar: Theory and Applications to Nonlinear Target Detection, Tracking, Imaging and Classification. The dissertation in electrical engineering. – The Pennsylvania State University, 2015. – 175 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/11380 (дата обращения: 15.12.2023).
9. Fazi C. Design Considerations for Nonlinear Scattering: Report of U.S. Army Research Laboratory No. ARL-TR-5684 / C. Fazi, F. Crowne, M. Ressler. – 2011. – 16 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-D101-PURL-gpo14593/pdf/GOVPUB-D101-PURL-gpo14593.pdf>, свободный (дата обращения: 15.12.2023).
10. Anderson S.J. Nonlinear Scattering at HF: Prospects for Exploitation in OTH Radar Systems // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. – 2010. – Vol. 18, No. 3. – P. 439–456.
11. Березин А.А. Двухтактный обостритель импульсов на диодах с накоплением заряда // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо–2022): матер. 32-й Междунар. конф. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2022. – С. 247–248.
12. Андреев Ю.А. Малогабаритные сверхширокополосные антенны для излучения мощных электромагнитных импульсов / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев // *Журнал радиоэлектроники*. – 2015. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/apr06/1/abstract.html>, свободный (дата обращения: 28.11.2023).
13. Направленный ответвитель Mini Circuits ZUDC20-183+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZUDC20-183+.pdf>, свободный (дата обращения: 15.11.2023).
14. Высокочастотный диод Шотки HSMS-8101 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/527214/AVAGO/HSMS-8101.html>, свободный (дата обращения: 20.11.2023).
15. Ruck G.T. Radar Cross Section Handbook / G.T. Ruck, D.E. Barric, W.D. Stuart, C.K. Krichbaum. – New York, USA: Springer, 1970. – 949 p.
16. Стробоскопические осциллографы USB PicoScope серии 9300 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope9300-series-sampling-oscilloscopes-data-sheet.pdf> (дата обращения: 15.10.2023).
17. Осциллограф Keysight Infinium MXR604A [Электронный ресурс]. – URL: <https://akmetron.ru/upload/iblock/fdc/fdcd1e56698db6933ddc19200552a729.pdf> (дата обращения: 20.11.2023).
18. Шипилов С.Э. Нелинейные преобразования сигналов в импульсной радиотомографии / С.Э. Шипилов, В.П. Якубов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 5–14.

Байкалова Анна Евгеньевна

Мл. науч. сотр. Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, ассистент каф. радиоэлектроники и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
Эл. почта: annabajkalova2016@gmail.com

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, с.н.с. ИСЭ СО РАН, проф. ТУСУРа Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
ORCID: 0000-0001-5470-1185
Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Baikalova A.E., Semyonov E.V.

Experimental study of object’s nonlinear radar cross section in baseband pulse mode

Quantitative information on the nonlinear scattering properties of probed objects at the impacts with signals close to baseband is presented, that will allow to make the requirements on transmitters and receivers of nonlinear baseband pulse radars. A prototype of a nonlinear baseband pulse radar using laboratory instruments has been developed. In the aperture of the antenna, it creates a pulsed field with an intensity of 35 W/m² and at a front duration of 0,23 ns. The rings with a diameter of 6 cm made of copper wire with a cross section of 4 mm² are used as sounding objects (a short-circuited ring as a linear object and a ring with the HSMS-8101 diode in its gap as a nonlinear object). The nonlinear radar cross section (NRCS) of a nonlinear object was 0,041 mm², that fits into the typical range of NRCS for objects in a conventional (harmonic) nonlinear sounding.

Keywords: nonlinearity, radar, radar cross section, ultra-wideband sounding.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-13-18

References

1. Semyonov E.V. Nonlinear scattering of narrowband and ultra-wideband signals at equal peak intensity. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*. Proceedings of 15th International Scientific-Technical Conference. Novosibirsk, November 19–21, 2021, pp. 295–298.
2. Semyonov E.V., Fateev A.V., Nazarov M.A., Berezin A.A. Modeling and Experimental Study of the Nonlinear Baseband Pulse Radar Prototype. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*. Proceedings of International IEEE Conference. Divnomorskoe, Russia, 2023, pp. 428–431.

3. Yakubov V.P., Losev D.V., Maltsev A.I. *Ispol'zovanie sverhshirokopolosnogo izlucheniya dlja diagnostiki nelinejnostej* [The Use of Ultra-Wideband Radiation for the Diagnosis of Nonlinearities]. *Zhurnal radioelektroniki* [*Journal of Radio Electronics*], 2000, no. 3 (in Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/mar00/1/text.html>, free (Accessed: November 25, 2023).

4. Baikalova A.E., Semyonov E.V. Means and Methods for Decoupling of Receiving and Transmitting Paths of Nonlinear Baseband Pulse Radar. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*. Proceedings of International IEEE Conference. Divnomorskoe, Russia, 2023, pp. 288–291.

5. Shirman J. D. *Radioelektronnye sistemy. Osnovy teorii i postroenie* [Radioelectronic Systems. Fundamentals of Theory and Construction]. Ed. by J.D. Shirman M.: CJSC «Makvis», 1998. 825 p. (in Russ.).

6. Shcherbakov G.N., Nikolaev A.V., Usmanov R.I., Shlykov Yu.A. *Issledovanie rasseivajushhih svojstv nelinejnogo bikonicheskogo otrazhatelja fizicheskoy modeli boepripasa s jelektronnymi ustroystvami* [Investigation of scattering properties of a nonlinear biconic reflector of a physical model of ammunition with electronic devices]. *Special Equipment and Communications*, 2011, no. 1, pp. 33–39 (in Russ.).

7. Shcherbakov G.N., Shlykov Yu.A., Nikolaev A.V., Brovin A.V. [To the assessment of fundamental limits in nonlinear radar]. *Spektelnika i svjaz'* [*Special Equipment and Communications*], 2008, no. 2, pp. 21–25 (in Russ.).

8. Gallagher K. A. Harmonic Radar: Theory and Applications to Nonlinear Target Detection, Tracking, Imaging and Classification. Dissertation in electrical engineering. The Pennsylvania State University, 2015. Available at: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/11380, free (Accessed: December 15, 2023).

9. Fazi C., Crowne F., Ressler M. Design Considerations for Nonlinear Scattering: Report of U.S. Army Research Laboratory No. ARL-TR-5684. 2011. Available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-D101-PURL-gpo14593/pdf/GOVPUB-D101-PURL-gpo14593.pdf>, free (Accessed: December 15, 2023).

10. Anderson S.J. Nonlinear scattering at HF: Prospects for exploitation in OTH radar systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 439–456.

11. Berezin A.A. *Dvuhtaknyj obostritel' impul'sov na odoh s nakopleniem zarjada* [Two-Stroke Step Recovery Diode Pulse Sharpener]. SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (CriMiCo 2022). Materialy 32 Mezhdunarod. konf. [*Microwave & Telecommunication Technology*. Proceedings of the 32nd International Conference]. Sevastopol, SevSU, 2022, pp. 247–248 (in Russ.).

12. Andreev Yu.A., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. *Malogabaritnye sverhshirokopolosnye anteny dlja izlucheniya moshhnyh jelektromagnitnyh impul'sov* [Small-Size Ultra-Wideband Antennas for the Radiation of Powerful Electromagnetic Pulses]. *Zhurnal radioelektroniki* [*Journal of Radio Electronics*], 2015, no. 4 (in Russ.).

13. Directional coupler Mini Circuits ZUDC20-183+. Available at: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZUDC20-183+.pdf>, free (Accessed: November 15, 2023).

14. High-frequency Schottky diode HSMS-8101. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/527214/AVAGO/HSMS-8101.html>, free (Accessed: November 20, 2023).

15. Ruck G.T., Barric D.E., Stuart W.D., Krichbaum C.K. *Radar Cross Section Handbook*. New York, USA, Springer, 1970, 949 p.

16. Stroboscopic USB Oscilloscopes PicoScope Series 9300. Available at: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope9300-series-sampling-oscilloscopes-datasheet.pdf>, free (Accessed: October 15, 2023).

17. Keysight Infiniium MXR604A Oscilloscope. Available at: <https://akmetron.ru/upload/iblock/fdc/fdcd1e56698db6933ddc19200552a729.pdf>, free (Accessed: November 20, 2023).

18. Shipilov S.E., Yakubov V.P. Nonlinear Transformations of Pulsed Signals in Radar Tomography. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 5–14.

Anna E. Baikalova

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Assistant, Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 2/3, Akademicheskyy pr., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: annabajkalova2016@gmail.com

Edward V. Semyonov

Doctor of Science in Engineering, Senior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Professor, TUSUR 2/3, Akademicheskyy pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0001-5470-1185
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: edwardsemyonov@narod.ru