

# Особенности нелинейного рассеяния сверхширокополосных электромагнитных импульсов электронными устройствами с резонансом внутренних цепей

Э. В. Семенов

*Институт сильноточной  
электроники СО РАН;  
Томский государственный  
университет систем управления  
и радиоэлектроники*

edwardsemyonov@narod.ru

К. М. Полторыхин

*Институт сильноточной  
электроники СО РАН;  
Томский государственный  
университет систем управления  
и радиоэлектроники*

kpoltorykhin@inbox.ru

А. А. Березин

*Институт сильноточной  
электроники СО РАН;  
Томский государственный  
университет систем управления  
и радиоэлектроники*

andrei0433@mail.ru

**Аннотация.** С использованием техники видеоимпульсной нелинейной локации получен отклик от малоразмерного электронного устройства на сверхширокополосные импульсы. Показано, что отклик содержит две части: короткоимпульсный линейный отклик от внешних контуров объекта и нелинейный резонансный отклик от внутренних цепей устройства. Примечательно, что зондирующие сигналы с одинаковой спектральной плотностью мощности на частоте указанного резонанса, но с разной длительностью фронта дают весьма разные нелинейные отклики объекта.

**Ключевые слова:** нелинейная локация; сверхширокополосные сигналы; обнаружение электронных устройств; отклик на импульсные воздействия

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интерес вызывает технология нелинейной видеоимпульсной локации [1–3] как способ обнаружения беспилотных летательных аппаратов в сложной фоно-целевой обстановке (например, для их различения от ложных целей в виде птиц [4]). Потенциально нелинейная видеоимпульсная локация дает лучшую точность и разрешающую способность по дальности, а также большую дальность обнаружения за счет концентрации зондирующего сигнала в короткий импульс с большой пиковой мощностью [5].

Однако на пути создания нелинейных видеоимпульсных локаторов существует ряд разнородных технических проблем [5]. Одна из них – отсутствие информации о нелинейных рассеивающих свойствах электронных устройств в режиме видеоимпульсного (сверхширокополосного) воздействия. Нам не известно ни одной публикации на эту тему ни в российской, ни в зарубежной литературе. Более того, до последнего времени не было публикаций и об инструментальных средствах (установках), которые позволяли бы измерять нелинейность рассеяния электромагнитных волн объектами в сверхширокополосном режиме.

В [5] мы рассмотрели такую установку на основе измерительной камеры с ТЕМ-волной и техники зондирования с использованием двух импульсов противоположной полярности. Установка протестирована на мерах с известными параметрами и реальном малоразмерном электронном устройстве. Показано, что с ее помощью можно получать достоверные результаты измерения нелинейного отклика малоразмерных электронных устройств.

Следующим этапом работы должен стать анализ структуры и основных особенностей отклика (общего и нелинейного) электронных устройств на сверхширокополосные короткоимпульсные воздействия. Этому и посвящен настоящий доклад.

## II. ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 приведена фотография использованной измерительной установки. От описанной в [5] она отличается использованием осциллографа реального времени (поз. 1), поскольку, как оказалось, стробоскопические осциллографы формируют слишком неравномерную сетку времени (с неравномерностью до 15 пс и более), что для сигналов с длительностями фронта порядка сотен пс эквивалентно появлению нелинейных искажений в приемной системе величиной 3...6 % [5]. Кроме того, установка включает задающий генератор меандра (поз. 2) с управляющим компьютером (поз. 3), двухтактный обостритель импульсов (поз. 4), тройник для регистрации тестовых сигналов (поз. 5), ТЕМ-камеру (поз. 6) и направленный ответвитель (поз. 7) для регистрации отраженного от объекта измерения сигнала.

Принцип измерения нелинейного отклика объекта основан на воздействии на него двумя видеоимпульсами близкой формы и противоположной полярности [6]. Если объект содержит односторонне проводящие электронные приборы, то отклики объекта на тестовые сигналы оказываются различными. Эта разница и регистрируется как сигнал нелинейного отклика. Для формирования пар импульсов противоположной полярности используется обостритель импульсов со специальной топологией [7]. Он обеспечивает амплитуду импульса 13.1 В с длитель-

---

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2024-0001)

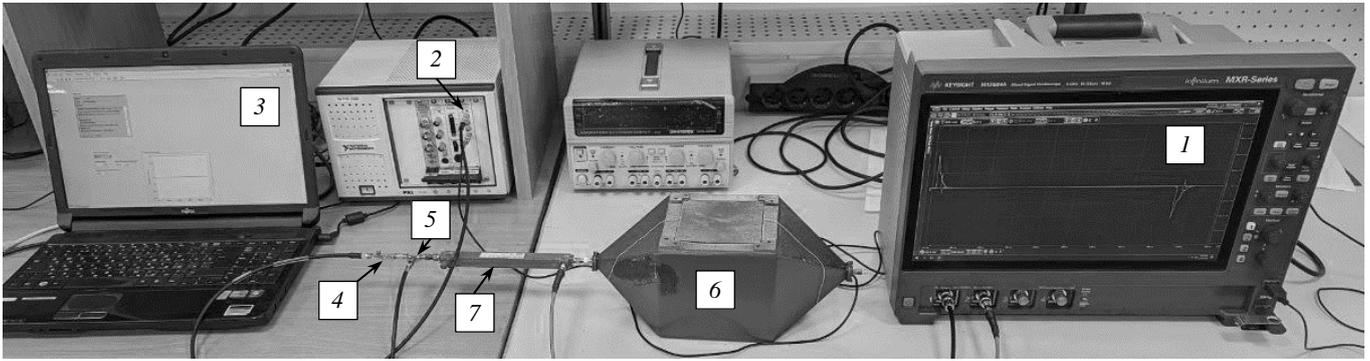


Рис. 1. Измерительная установка: осциллограф (1), генератор меандра (2), управляющий компьютер (3), двухтактный обостритель импульсов (4), тройник для регистрации тестовых сигналов (5), ТЕМ-камера (6), направленный ответвитель (7)

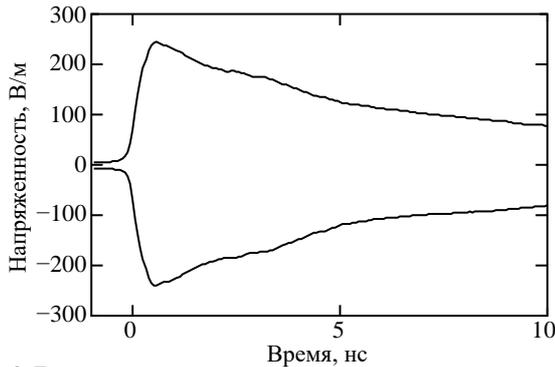


Рис. 2. Тестовые сигналы

ностью фронта 0.23 нс по уровням 20...80 %. С учетом ослабления в измерительном тройнике амплитуда импульса в измерительном тракте оказывается несколько меньше (11.5 В). В пересчете на параметры поля в камере такой сигнал дает пиковую напряженность поля 240 В/м (рис. 2).

Дополнительно отметим, что от элементов измерительного тракта и пустой камеры возникает заметное отражение, поэтому для селекции отклика от объекта измерения применяется калибровка на пустую камеру [5].

### III. ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЯ

Мы выбирали объект измерения среднего для электронных гаджетов размера. Был выбран FM-приемник Precision PS-298 (рис. 3) размерами 60×73×16 мм. Детали структуры отклика электронных устройств меньшего размера сложнее анализировать.



Рис. 3. Объект измерения: FM-приемник Precision PS-298

Обычно для синтеза основанных на измерениях поведенческих моделей объектов при видеоимпульсных воздействиях используется семейство откликов объекта на ступенчатые сигналы разной амплитуды [8]. Поэтому приведем результаты такого тестирования (рис. 4).

Тестирование выполнено для пяти амплитуд тестовых импульсов с напряженностями в диапазоне 96...240 В/м. На рис. 4 приведен только один общий отклик объекта (кривая 1) на тестовый сигнал с максимальной амплитудой. Это связано с тем, что нелинейный отклик объекта составляет небольшую долю относительно общего и визуально общий отклик просто пропорционален увеличению амплитуды входного сигнала. Отметим, что на рис. 4 и далее сигналы приведены в размерности потенциала рассеянного объектом поля.

Из рис. 4 можно видеть, что отклик объекта состоит из двух частей. Первая часть (левее вертикальной штриховой линии) – моноцикл большой амплитуды – обусловлена отражением электромагнитной волны от внешних контуров объекта. В этой части отклика не усматривается нелинейных свойств, так как волна не

### IV. СТРУКТУРА И АМПЛИТУДНЫЕ СВОЙСТВА ОБЩЕГО И НЕЛИНЕЙНОГО ОТКЛИКА ОБЪЕКТА

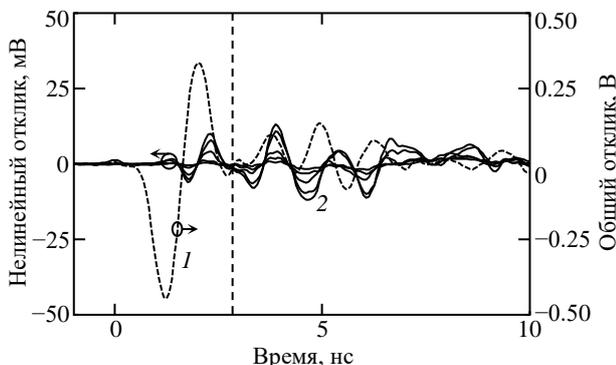


Рис. 4. Общий отклик объекта (кривая 1) и его нелинейные отклики на сигналы разной амплитуды (семейство кривых 2)

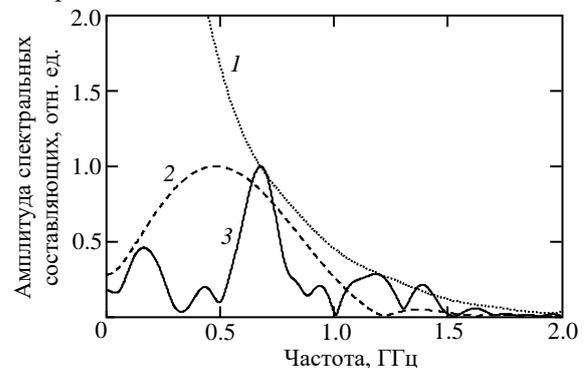


Рис. 5. Нормированные амплитудные спектры: тестового сигнала (кривая 1), общего отклика объекта (кривая 2) и нелинейного отклика (кривая 3)

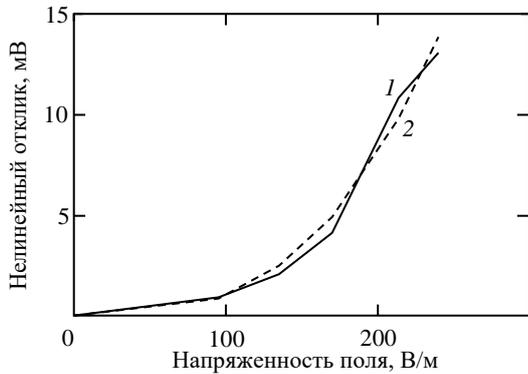


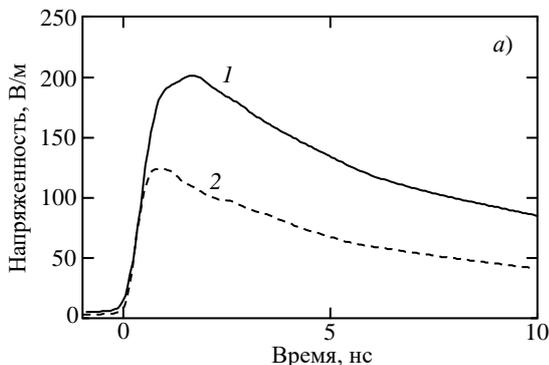
Рис. 6. Зависимость амплитуды нелинейного отклика объекта (потенциал) от пиковой напряженности зондирующего поля (кривая 1) и ее аппроксимация кубическим законом (кривая 2)

взаимодействует с электронными приборами внутри объекта.

Вторая часть общего отклика на рис. 4 (правее вертикальной штриховой линии) представляет собой резонансный пик. В этом же временном диапазоне наблюдается и нелинейный отклик (семейство кривых 2 на рис. 4) также в виде резонансного пика. Из этого мы заключаем, что это отклики от внутренних электронных цепей приемника.

Приведенные выводы подтверждаются и при анализе амплитудных спектров рассмотренных сигналов (рис. 5). Спектр общего отклика (кривая 2) широкополосный, не обнаруживает резонансной природы. Спад в области нижних частот по отношению к тестовому сигналу (кривая 1) образуется за счет интерференции отражений от переднего и заднего края объекта (вдоль луча волны). Отметим, что спектр общего отклика получен без учета резонансного пика, располагающегося на рис. 4 правее штриховой вертикальной линии. Нелинейный отклик объекта (кривая 3 на рис. 5) носит резонансный характер с выраженным экстремумом на частоте 0.68 ГГц. Все спектры, на рис. 5 приведены только для максимальной амплитуды воздействия на объект и нормированы либо на собственный максимум (кривые 2 и 3), либо на значение амплитудного спектра на частоте экстремума нелинейного отклика (кривая 1).

Резонансный характер нелинейного отклика объекта создает преимущество сверхширокополосным системам зондирования в сравнении с локаторами с гармоническим воздействием на определенной частоте. Если частота тестового сигнала не попадает в область резонанса объекта, то нелинейность рассеяния сигнала объектом, очевидно, существенно уменьшается. В данном конкретном случае резонансная частота лежит



ниже широко используемых в нелинейной локации зондирующих частот 0.9 и 2.4 ГГц. Сверхширокополосный короткоимпульсный тестовый сигнал же, как мы видим, возбуждает ударный колебательный процесс на собственных резонансных частотах объекта.

Характеристическое значение, также, имеет зависимость амплитуды нелинейного отклика объекта от пиковой напряженности зондирующего поля (рис. 6, кривая 1). Эта зависимость в использованном диапазоне амплитуд поля имеет примерно кубический характер (рис. 6, кривая 2). Данная ситуация нетипична для детекторов электронных приборов. Они в качестве основного идентифицирующего признака опираются на наличие второй гармоники зондирующего сигнала, которая в большей части диапазона амплитуд этого сигнала имеет квадратичную зависимость от параметров зондирующего поля. Кубический характер зависимости в данном случае говорит о том, что этот амплитудный диапазон для объекта является большесигнальным и в нем существенный вклад вносят нелинейности выше второго порядка.

#### V. ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛИКА ОБЪЕКТА

##### ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТЕСТОВОГО ФРОНТА ПРИ ОДИНАКОВОМ АМПЛИТУДНОМ СПЕКТРЕ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА НА ЧАСТОТЕ РЕЗОНАНСА ОБЪЕКТА

Резонансный характер отклика той части объекта, которая проявляет нелинейные свойства, говорит о том, что моделью объекта мог бы стать колебательный контур с нелинейными элементами в нем. Дополнительно нужно продумать только способ инжекции и вывода энергии из этого контура.

Однако такая модель будет давать примерно одинаковый нелинейный отклик на сигналы с одинаковой спектральной плотностью мощности на частоте резонанса нелинейных цепей объекта. Следует проверить, выполняется ли это условие в отклике реального объекта измерения.

Выберем два тестовых сигнала с одинаковым амплитудным спектром на частоте резонанса нелинейных цепей объекта, однако имеющих разную временную форму. Проще всего взять сигналы с разной длительностью фронта и разной амплитудой (рис. 7а). Видно, что у первого сигнала (кривая 1), больше амплитуда, но больше и длительность фронта, чем у второго сигнала (кривая 2). В итоге амплитуда спектральных составляющих этих сигналов (рис. 7б) на частоте резонанса нелинейных цепей объекта практически одинакова (различие составляет 0.6 %). Обе

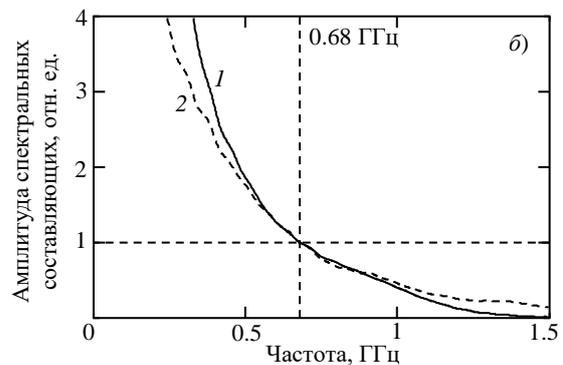


Рис. 7. Временная форма (а) и амплитудный спектр (б) сигналов с одинаковой амплитудой спектральной составляющей на частоте резонанса нелинейных цепей объекта

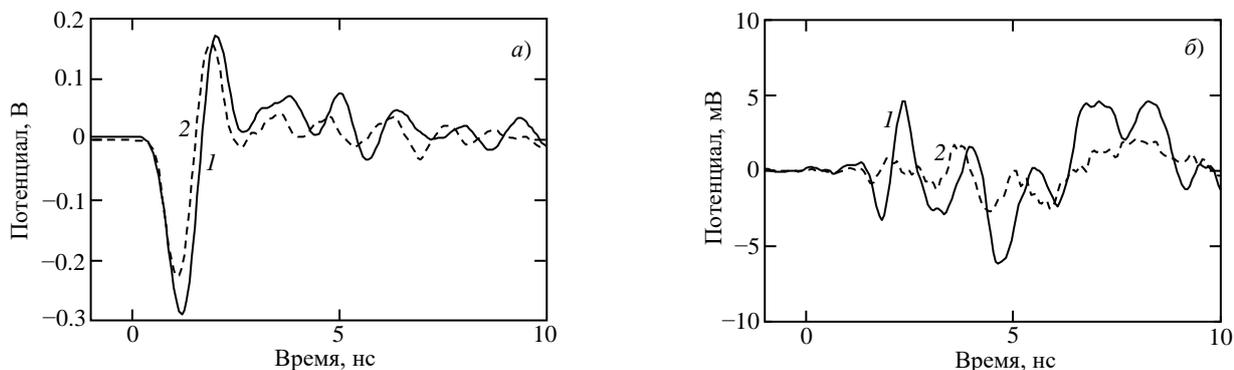


Рис. 8. Общие (а) и нелинейные (б) отклики объекта на тестовые сигналы, изображенные на рис. 7. Номера кривых соответствуют рис. 7

кривые на рис. 8 нормированы на амплитуду спектральной составляющей первого тестового сигнала на частоте 0.68 ГГц.

На рис. 8 представлены общие (а) и нелинейные (б) отклики объекта на тестовые сигналы, изображенные на рис. 7. Номера кривых откликов на рис. 8 соответствуют номерам кривых тестовых сигналов на рис. 7. Видно, что общие отклики отличаются не так уж сильно (на 22 %) при разнице амплитуд тестовых сигналов в 39 %. Это вполне объяснимо, так как протяженность фронта тестового сигнала вдоль луча составляет 24 и 16 см соответственно для кривых 1 и 2. Протяженность объекта измерения вдоль луча составляет 7 см, что значительно меньше длины фронта волны. В этих условиях интерференция откликов от переднего и заднего края объекта функционально соответствует дифференцированию падающей волны, т. е. отклик оказывается пропорциональным скорости нарастания тестового сигнала. Скорости нарастания обоих тестовых сигналов, как видно на рис. 7, примерно одинаковые, следовательно общие отклики объекта на них также будут близки по амплитуде.

Нелинейные же отклики объекта (рис. 8б) различаются весьма сильно – в 2.3 раза. Существенно различается также форма откликов. Поскольку больший нелинейный отклик наблюдается для первого тестового сигнала, следовательно, его величина объясняется большим уровнем спектральных составляющих первого тестового сигнала в области нижних частот (рис. 7б). Т. е. мы констатируем ситуацию, когда линейный отклик от внешних контуров малоразмерного объекта малочувствителен к низкочастотным составляющим поля, в то время как нелинейный отклик от внутренних цепей демонстрирует существенную чувствительность к низкочастотным электромагнитным полям с длиной фронта существенно большей длины объекта вдоль луча.

Из обнаруженного эффекта следуют два вывода для дальнейшего структурного синтеза нелинейной поведенческой модели объекта зондирования. Первое – модели, в которых отклик объекта рассматривается как зависящий от скорости нарастания тестового поля, не будут адекватными. Действительно, скорости нарастания тестовых сигналов на рис. 7 практически одинаковые, в то время как нелинейный отклик объекта на них различается весьма сильно.

Второе – модель объекта в виде эквивалентной схемы, состоящей из колебательного контура с цепями ввода и вывода энергии в него, скорее всего, также не будет обеспечивать удовлетворительную точность моделирования, поскольку низкочастотное воздействие

на емкость и параллельную к ней проводимость, которые могут проявлять нелинейные свойства, будет шунтироваться параллельно подключенной к ним индуктивностью.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанные исследования дают информацию о физике нелинейного рассеяния объектами сверхширокополосных сигналов, а также полезны при структурном синтезе поведенческих моделей объектов зондирования.

Резонансный характер нелинейного отклика указывает на то, что модель объекта лучше строить в классе нелинейных рекурсивных фильтров [8]. Понятно, что соответствующая фильтру эквивалентная схема будет содержать емкостной и индуктивный элементы с обменом энергии между ними. Однако следует синтезировать эквивалентную схему так, чтобы на ее нелинейные элементы имели возможность воздействовать низкочастотные спектральные составляющие, существенно влияющие на нелинейный отклик объекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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 (RSEMW): proceedings of IEEE int. conf. Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2023. 4 p.
- [2] Лоцилов А.Г. Разработка принципов нелинейной сверхширокополосной радиолокации // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 4. С. 31–38.
- [3] Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. Использование сверхширокополосного излучения для диагностики нелинейностей // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar00/1/text.html>, свободный (дата обращения 22.02.2023).
- [4] Лук Д.В. Распознавание малоразмерных воздушных РЛЦ по траекторным признакам с использованием методов машинного обучения // 78-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. Санкт-Петербург, 24–27 апреля 2023. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. С. 58–61.
- [5] Семенов Э.В., Назаров М.А., Фатеев А.В., Полторыхин К.М., Березин А.А., Поздняков В.С. Установка для измерения нелинейного рассеяния видеоимпульсных электромагнитных волн малоразмерными объектами // Приборы и техника эксперимента. 2024. [В печати].
- [6] Авдеев В.Б., Бердышев А.В., Паньчев С.Н. Сверхкороткоимпульсная сверхширокополосная нелинейная радиолокация // Телекоммуникации. 2006. № 8. С. 23–27.
- [7] Семенов Э.В., Поздняков В.С., Полторыхин К.М., Березин А.А. Увеличение выходной мощности двухтактных обстрелителей импульсов на диодах с накоплением заряда // Доклады ТУСУР. 2023. Т. 26. № 3. С. 7–13.
- [8] Semyonov E.V. Simple behavioral model of baseband pulse devices in the form of a second-order nonlinear recursive filter // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021. V. 68, No. 6. P. 2192–2196.