

## Дистанционная сверхширокополосная томография нелинейных радиоэлектронных элементов

© В.П. Якубов,<sup>1</sup> С.Э. Шипилов,<sup>1</sup> Р.Н. Сатаров,<sup>1</sup> А.В. Юрченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

e-mail: s.shipilov@gmail.com

(Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.)

Исследована возможность использования сверхширокополосных (СШП) сигналов для нелинейной локации, когда по возмущениям рассеянного поля необходимо определить наличие или отсутствие в поле наблюдения нелинейных включений. Предложенное решение заключается в сравнении формы СШП импульсов, отраженных от заданной области зондирования в двух режимах — при выключенном и при включенном дополнительном генераторе подсветки зондируемой области относительно мощным монохроматическим излучением. Если в области зондирования присутствуют нелинейный радиоэлектронный элемент, первый и второй СШП отраженные импульсы различаются по форме. При различии в форме импульсов констатируется наличие в исследуемой области пространства элемента с нелинейной характеристикой.

### Введение

Рассматриваемая в настоящей работе задача относится к так называемой нелинейной радиолокации, когда по возмущениям рассеянного поля необходимо тем или иным способом определить наличие или отсутствие в поле наблюдения нелинейных включений. В первом приближении все среды зондирования являются линейными, что обуславливает линейность материальных уравнений. Однако при увеличении мощности излучения эта линейность нарушается. Как правило, это происходит в сосредоточенных областях расположения радиоэлектронных элементов (диодов, транзисторов, микросхем) или местах неплотного соприкосновения различных металлических конструкций. Обычно первые формируют продукты четного порядка нелинейности, а вторые — нечетного порядка нелинейности. На этом основаны технологии их распознавания.

Рассмотрим состояние решения задачи нелинейной радиолокации. В настоящее время основная задача нелинейной радиолокации связана с проблемой противодействия промышленному и экономическому шпионажу. Современные передающие и регистрирующие устройства настолько малы, что их можно принести и спрятать практически в любом месте, закамуфлировав в самых различных бытовых приборах и предметах интерьера (строительных конструкциях). Элементы питания с повышенным сроком службы обеспечивают их работу в течение нескольких месяцев, а то и лет. Обнаружить закладки по радиоизлучению крайне сложно, поскольку многие из них дистанционно отключаются. На помощь приходят нелинейные радиолокаторы [1–3]. Работа нелинейного радиолокатора основана на облучении объекта монохроматическим СВЧ-сигналом и на способности этого объекта переотражать (переизлучать) зондирующий сигнал на кратных гармониках частоты

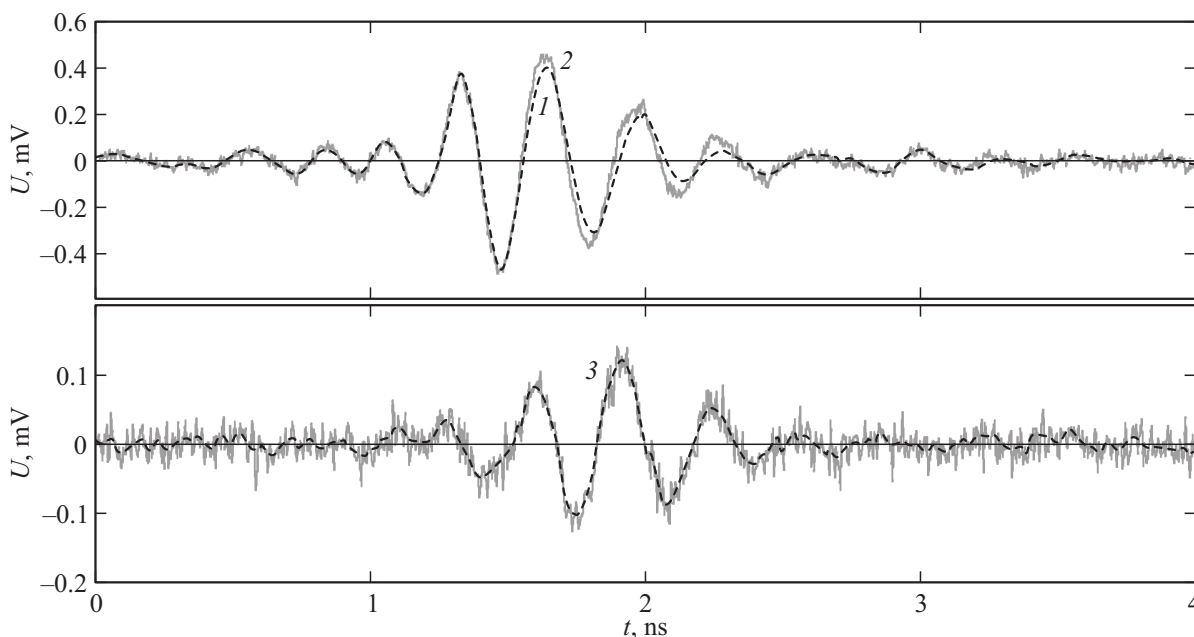
зондирования (комбинационные частоты). Это явление связано с тем, что наводимая на нелинейном объекте разность потенциалов вызывает нелинейно связанный с ней ток. Этот ток содержит комбинационные гармоники. Наводимый переменный ток создает переизлученное электромагнитное поле, которое также содержит эти комбинационные гармоники. Обычно по возникновению таких гармоник и судят о наличии нелинейностей.

Если исключить возможность случайного обнаружения в результате физического поиска или с помощью рентгеновского оборудования, нелинейный радиолокатор остается пока единственным средством, способным определять местонахождение неизлучающих электронных устройств, в том числе в разрушенном состоянии или с выгоревшими полупроводниковыми переходами.

Использование импульсных СШП-средств для целей нелинейной локации до сих пор практически не рассматривалось в литературе. Основная причина — малая энергетика используемых импульсов не позволяет заставить „раскрыться“ нелинейные элементы.

### 1. СШП-томография нелинейных включений

Настоящая работа направлена на исследование возможности использования СШП-сигналов для нелинейной локации. В основу предлагается положить хорошо известный люксембург-горьковский эффект (ЛГЭ) [4]. Основная идея, лежащая в основе этого эффекта, заключается в возникновении перекрестной модуляции (кросс-модуляции) при распространении радиоволн в нелинейных средах. Кросс-модуляция — явление, заключающееся в том, что при приеме радиоволн передающей радиостанции, работающей на несущей частоте  $f_1$ , прослушивается передача другой мощной радиостанции, расположенной на трассе и работающей на несущей частоте  $f_2$ ,



**Рис. 1.** Формы сигналов, принятых при СШП-зондировании диода Д20 при отсутствии (1) и при наличии подсветки (2), а также разностный сигнал (3).

существенно отличной от  $f_1$ . Этот эффект впервые наблюдался в 1933 г. в Эйндховене (Нидерланды), где при приеме швейцарской радиостанции прослушивалась работа лежащей на пути мощной станции „Люксембург“. Аналогичное явление наблюдалось в городе Горький, где при приеме радиостанций, расположенных на западе от Москвы, прослушивались мощные московские станции. Глубина такой перекрестной модуляции радиоволн обеих станций может достигать 10% и даже большего значения, но обычно не превосходит 1–2%. Считается, что ЛГЭ — это один из источников помех радиоприему.

Теория ЛГЭ разрабатывалась австралийскими физиками В. Бейли и Д. Мартином (1934–1937 г.), советским физиком В.Л. Гинзбургом (1948 г.) и другими. Впервые на возможность существования эффекта кросс-модуляции в ионосфере было указано советским ученым М.А. Бонч-Бруевичем в 1932 г. Суть явления заключается в следующем: одна мощная волна „разогревает“ среду, а другая волна в этой среде распространяется, перенося информацию. При этом обе волны начинают испытывать кросс-модуляцию, т.е. обретают возможность „видеть“ одна другую. В основе лежит эффект нелинейной кросс-модуляции. На физическом уровне этот эффект подобен известному явлению, возникающему в смесителе, когда на него одновременно подаются два сигнала.

Рассмотрим применимость этого эффекта для СШП-зондирования нелинейных включений. Пусть  $E_0(t)$  — импульсный СШП-сигнал, падающий на нелинейное включение. Тогда с точностью до некоторого множителя рассеянное поле записывается как

$$E_r(t) = E_0(t) + g[E_0(t)],$$

где  $g(x)$  — вид нелинейности. Обычно можно считать

$$E_r(t) \approx E_0(t).$$

Если теперь к засвечиваемому полю добавить поле „подсветки“, например, мощной монохроматической волной

$$E_1(t) = A \sin(\omega t + \varphi_1),$$

то полное рассеянное поле будет представляться как

$$E_r(t) = E_0(t) + A \sin(\omega t + \varphi_1) + g[E_0(t) + A \sin(\omega t + \varphi_1)].$$

Фаза монохроматического сигнала подсветки никак не связана с СШП-сигналом, и поэтому после усреднения можно записать, что

$$\langle \tilde{E}_r(t, A) \rangle = E_0(t) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g[E_0(t) + A \sin(\varphi)] d\varphi.$$

Это означает, что нелинейное включение проявится в форме усредненного рассеянного импульсного сигнала. При малой подсветке эффект не проявится

$$\langle \tilde{E}_r(t, A \ll |E_0|) \rangle \approx E_0(t).$$

Разность полученных сигналов является информационной величиной для диагностики вида нелинейности. Проведенная компьютерная симуляция подтверждает этот вывод [5]. Именно этот эффект используется в разработке.

Подчеркнем, что хотя кратные частоты не регистрируются в отличие от традиционного метода НЛ, но

нелинейность проявляется в искажении формы рассеянного СШП-импульса. Идеологически это соответствует использованию ЛГЭ. Предлагаемый авторами метод защищен патентом РФ [6].

В качестве источника СШП-сигналов использовался импульсный генератор, выдающий импульсы биполярной формы длительностью 0.2 ns. Сигнал излучался СШП-антенной в область пространства, где находился исследуемый диод. Аналогичная СШП-антенна принимала отраженный сигнал, который поступал на СШП-усилитель, а затем на стробирующий СШП-приемник. После оцифровки сигнал поступал в компьютер. Нелинейный элемент находился на расстоянии 100 см от приемной и передающей СШП-антенн. В исследуемую зону подавали подсветку монохроматической волной с частотой 850 МГц. Включение и выключение генератора монохроматического сигнала было синхронизовано со временем приема СШП-сигнала. При получении нечетного СШП-сигнала генератор был выключен, при получении четного СШП-сигнала генератор был включен. Мощность генератора подсветки, при которой разность амплитуд принимаемых сигналов превышает статистическую погрешность измерений, т.е. достаточная для выявления нелинейного элемента, составляла 4–5 Вт.

На рис. 1 показаны типичные формы сигналов, принятых при СШП-зондировании диода Д20 при отсутствии (1) и при наличии подсветки (2), а также разностный сигнал (3). Диод не был ни на что нагружен и представлял собой свободно расположенный заводской элемент. Видно, что разностный сигнал составляет 20–25%, что является вполне значимой величиной и превышает уровень шума стробоскопического приемника. Наблюдается также некоторая инерционность (запаздывание) нелинейного отклика диода. Подобные характеристики наблюдаются и для ряда других нелинейных включений.

## 2. Результаты СШП-томографии нелинейных включений

Метод линейной радиоволновой томографии достаточно подробно освещен в [7]. Получение данных основано на последовательном СШП-локационном сканировании с заданным шагом исследуемой сцены по двум координатам. В каждой точке остановки сканера зондирование сцены производилось в двух последовательно включаемых режимах: с подсветкой и без подсветки монохроматическим излучением большой амплитуды. Сканирование осуществляется путем автоматизированного механического перемещения антенного блока. Накопленные массивы передавались в программу томографической обработки и выделения нелинейных включений.

В ходе эксперимента три неоднородности были помещены между двумя газобетонными блоками толщиной 10 см (рис. 2). Две неоднородности представляли собой плоские квадраты из алюминиевой фольги

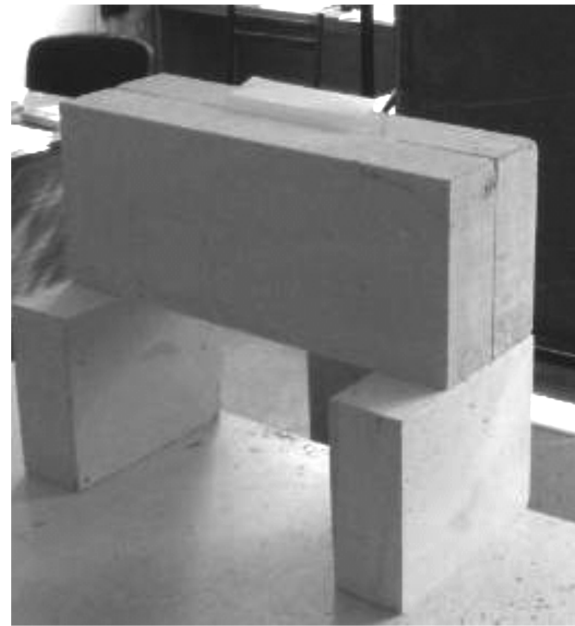


Рис. 2. Тестовая сцена неоднородностей, расположенных между газобетонными блоками.

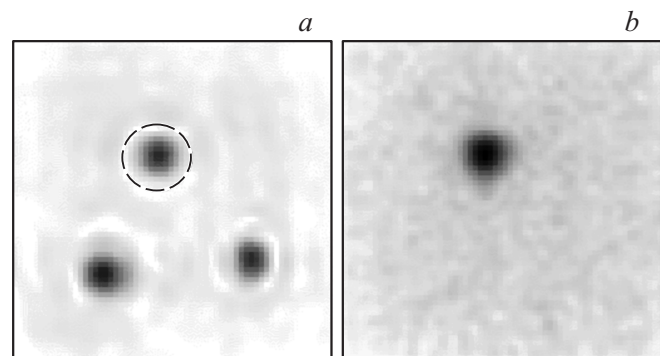


Рис. 3. Пример среза 3D-радиоизображения на глубине 10 см внутри газобетонного блока с использованием метода линейной радиоволновой томографии (а) и с использованием предложенного метода (б).

размером 2 × 2 см, а третья неоднородность, располагавшаяся сверху, представляла детекторный СВЧ-диод длиной 2 см. Результаты томографической обработки экспериментальных результатов приведены на рис. 3.

Восстановленное радиоизображение представляет собой поле обзора 33 × 33 см на глубине 10 см от поверхности СК. На рис. 3, а представлено радиоизображение неоднородностей, полученное методом линейной радиоволновой томографии. Все три неоднородности явно просматриваются на радиоизображении. Две нижних неоднородности — это плоские квадраты из алюминиевой фольги размером 2 × 2 см, а верхняя неоднородность — это детекторный СВЧ-диод длиной 2 см. На рис. 3, б представлено радиоизображение с использованием метода томографического выделения нелинейных элементов. Из рисунка видно, что предложенный

метод позволяет выделять на фоне неоднородных включений нелинейные радиоэлектронные элементы. Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного решения.

## Заключение

Возможность использования СШП-излучения для радиотомографии нелинейных включений искусственного происхождения открывает широкие возможности для их 3D-томографии. В отличие от традиционной нелинейной радиолокации при этом не используется выделение комбинационных частот. Однако для раскрытия нелинейных свойств неоднородностей в СШП-излучении требуется иметь возможность их возбуждения мощным СВЧ-излучением.

Работа выполнена по программе повышения конкурентоспособности Томского государственного университета.

## Список литературы

- [1] Джонс Т. // Специальная техника. 1998. № 4–5. С. 27–31.
- [2] Семенов Д.В., Ткачев Д.В. // Специальная техника. 1999. № 1–2. С. 17–22.
- [3] Щербаков В.Г. // Специальная техника. 1999. № 6. С. 34–39.
- [4] Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. 1960. С. 529.
- [5] Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 7. С. 645–651.
- [6] Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я. Способ обнаружения скрытых нелинейных радиоэлектронных элементов. Патент на изобретение РФ. № 2516436. Дата приоритета 24.07.2012.
- [7] Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы. Томск: Изд-во НТЛ, 2014. 264 с.