

УДК 621.317.757

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО РАССЕЯНИЯ ВИДЕОИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МАЛОРАЗМЕРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

© 2024 г. Э. В. Семенов^{a, b, *}, М. А. Назаров^{a, b}, А. В. Фатеев^{a, b},
К. М. Полторыхин^{a, b}, А. А. Березин^{a, b}, В. С. Поздняков^{a, b}

^aИнститут сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

^bТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

*e-mail: edwardsemyonov@narod.ru

Поступила в редакцию 14.11.2023 г.

После доработки 05.12.2024 г.

Принята к публикации 19.02.2024 г.

Рассмотрена установка, позволяющая измерять рассеяние ступенчатой сверхширокополосной электромагнитной волны (субнаносекундная длительность фронта) малоразмерными объектами. Основной особенностью установки является выделение в рассеянном сигнале со сплошным спектром нелинейной составляющей отклика. Достигнутая в экспериментах интенсивность зондирующего поля составляет 135 Вт/м^2 . Показано, что пороговая чувствительность по нелинейному отклику объекта определяется, в основном, сдвигом отдельных фрагментов регистрируемых сигналов, возникающим в стробоскопическом регистрирующем устройстве. За счет коррекции этих сдвигов удалось получить пороговую чувствительность по потенциалу нелинейно рассеянного поля не хуже 3.5 мВ при потенциале рассеянного объектом поля не более 520 мВ . Приведены результаты тестирования установки посредством линейных и нелинейных мер с известными параметрами, а также наблюдения нелинейного отклика малоразмерного электронного прибора.

DOI: 10.31857/S0032816224040132 EDN: NYIEKR

1. ВВЕДЕНИЕ

Волны, рассеянные объектами нелинейным образом, регистрируются для решения различных задач. Сюда входят обнаружение электронных устройств при досмотре [1], мониторинг самодвижущихся электронных устройств [2], обнаружение некачественных электрических контактов [3] и т.д.

Обычно нелинейный отклик объекта селекционируется на фоне линейного по частотному признаку, для чего тестовый сигнал выбирается узкополосным (гармоническим) [4]. Узкая полоса сигнала означает его большую длительность, что

ухудшает пространственное разрешение и снижает пиковую излучаемую мощность при заданной средней [5]. Последнее приводит к ускоренному снижению относительного уровня нелинейного отклика (квадратичному для второй гармоники). Кроме того, фиксированная частота зондирующего сигнала может не попасть в область частот эффективного взаимодействия с внутренней структурой объекта [5].

Все перечисленные недостатки в принципе преодолевает видеоимпульсная нелинейная локация [6–8], в которой используются близкие к видеоимпульсным зондирующие сигналы. Однако разработка нелинейных видеоимпульсных

локаторов требует одновременного решения ряда разнородных технических проблем. Сложность этих проблем такова, что до сих пор нет публикаций (по нашим сведениям), в которых бы описывались эксперименты по дистанционному нелинейному зондированию реальных электронных приборов посредством видеоимпульсов. При этом сами принципы нелинейного видеоимпульсного тестирования известны достаточно давно [9–14].

Одной из упомянутых проблем является то, что нелинейные рассеивающие свойства объектов зависят от формы зондирующего сигнала, поэтому имеющиеся результаты зондирования электронных приборов гармоническими полями [15] не могут быть распространены на случай видеоимпульсных сигналов. В связи с этим актуальной задачей является создание установки для измерения рассеяния видеоимпульсных электромагнитных волн, позволяющей селективно регистрировать нелинейную составляющую в рассеянном сигнале. В настоящей статье описаны основные особенности такой установки, а также результаты ее тестирования на мерах с известными параметрами и малоразмерных электронных устройствах.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПРИНЦИП СЕЛЕКЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ОТКЛИКА ОБЪЕКТА

Нелинейные искажения сигнала объектом (нелинейный отклик) $\varepsilon(t)$ в общем смысле находятся как разность между откликом объекта $u(t)$ и его откликом без нелинейных искажений $u_0(t)$ [16]:

$$\varepsilon(t) = u(t) - u_0(t). \quad (1)$$

В нашем случае источником нелинейных искажений сигналов являются, в основном, p – n -переходы. Проще всего выполнить вычисления по формуле (1), если зондировать объект двумя ступенчатыми функциями $x_{1,2}(t)$ одинаковой формы, но разной полярности:

$$x_1(t) = -x_2(t). \quad (2)$$

При воздействии одним из тестовых сигналов (например, первым) p – n -переходы будут в прямом смещении, и мы можем считать отклик $u_1(t)$ на первый тестовый сигнал сигналом с нелинейными искажениями, $u(t) = u_1(t)$. При другой полярности p – n -переходы будут в обратном

смещении, и нелинейность рассеяния сигнала будет мала. Поэтому $u_0(t)$ можно найти, просто проинвертировав отклик $u_2(t)$ на второй тестовый сигнал: $u_0(t) = -u_2(t)$. Таким образом, мы можем переписать формулу (1) в виде

$$\varepsilon(t) = u_1(t) + u_2(t). \quad (3)$$

При феноменологическом исследовании мы не можем сказать, какой из сигналов $u_{1,2}$ имеет больше нелинейных искажений, а какой меньше. Однако это и несущественно в силу симметрии правой части в равенстве (3). Объективно мы будем получать разную полярность $\varepsilon(t)$ при разном ракурсе зондируемого объекта.

3. ТЕСТОВЫЕ СИГНАЛЫ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ КАМЕРА И СПОСОБ СЕЛЕКЦИИ ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ

Для уменьшения уровня помех и дрейфовой погрешности измерять рассеяние электромагнитных волн предпочтительно в экранированных камерах. Возможно использование двух видов камер. Первый вариант – безэховые камеры большого размера, где объект располагается в дальней зоне передающей антенны [6]. Второй вариант – малогабаритные камеры с ТЕМ-волной [17]. По существу, они представляют собой воздушные линии передачи с площадью поперечного сечения порядка нескольких дециметров.

Предпочтительность ТЕМ-камер для рассматриваемой задачи обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых, для того чтобы объект исследования проявлял нелинейные свойства, интенсивность зондирующего поля должна быть достаточно большой. Мы ориентируемся на значение интенсивности порядка 100 Вт/м^2 . Получить данное значение интенсивности гораздо проще в камере малого размера. Во-вторых, исчерпывающий тест объекта по отношению к видеоимпульсному воздействию подразумевает регистрацию семейства переходных характеристик объекта, т.е. откликов на ступенчатые воздействия разной амплитуды [18, 19]. Получить ступенчатую электромагнитную волну (со спектром от постоянного тока) возможно только в волноводах с ТЕМ-волной.

Используемая ТЕМ-камера [17] (камера 5 на рис. 1) представляет собой отрезок прямоугольной линии передачи с пирамидальными

рупорами на концах. К вершине одного из рупоров подводится тестовый сигнал, на втором рупоре устанавливается терминатор для реализации режима бегущей волны с возможно меньшими переотражениями.

Поперечное сечение измерительной камеры изображено на рис. 2. Площадь поперечного сечения составляет 0.0172 м^2 . Таким образом, для получения интенсивности поля порядка 100 Вт/м^2 поступающая в камеру мощность должна составлять не менее 1.72 Вт . При волновом сопротивлении подводящей линии 50 Ом это соответствует амплитуде тестового сигнала более 9 В .

В части длительности фронта тестового сигнала мы ориентируемся на значения около 0.25 нс (пространственная протяженность фронта 7.5 см). Фронт большей длительности создает недостаточный градиент поля вдоль луча для малоразмерных объектов, а сигнал, фронт которого короче указанного значения, хуже проникает во внутренние структуры объекта и шунтируется емкостями электронных приборов.

Для реализации изложенного в разд. 2 принципа селекции нелинейного отклика объекта необходимо генерировать пары импульсов противоположной полярности. Серийные генераторы такого типа с требуемой мощностью и длительностью фронта не выпускаются. Поэтому нужно использовать либо специализированную конструкцию в виде двух отдельных генераторов с последующим суммированием сигналов, либо двухтактный обостритель импульсов на диодах с накоплением заряда [20] (2 на рис. 1). Последний вариант проще, и он обеспечивает в нашем случае требуемые параметры. Для описанного в работе [20] обострителя импульсов выходное напряжение составляет 13.1 В (выходная мощность 3.4 Вт), длительность фронта 0.23 нс (по уровням $20\text{...}80\%$ от максимального напряжения). На вход обострителя подается меандр амплитудой $\pm 12 \text{ В}$ (на холостом ходу) от генератора 1 (рис. 1) с внутренним сопротивлением 50 Ом . Мы использовали генератор National Instruments PXI-5422 с длительностью фронта меандра 4 нс . На рис. 3 приведена

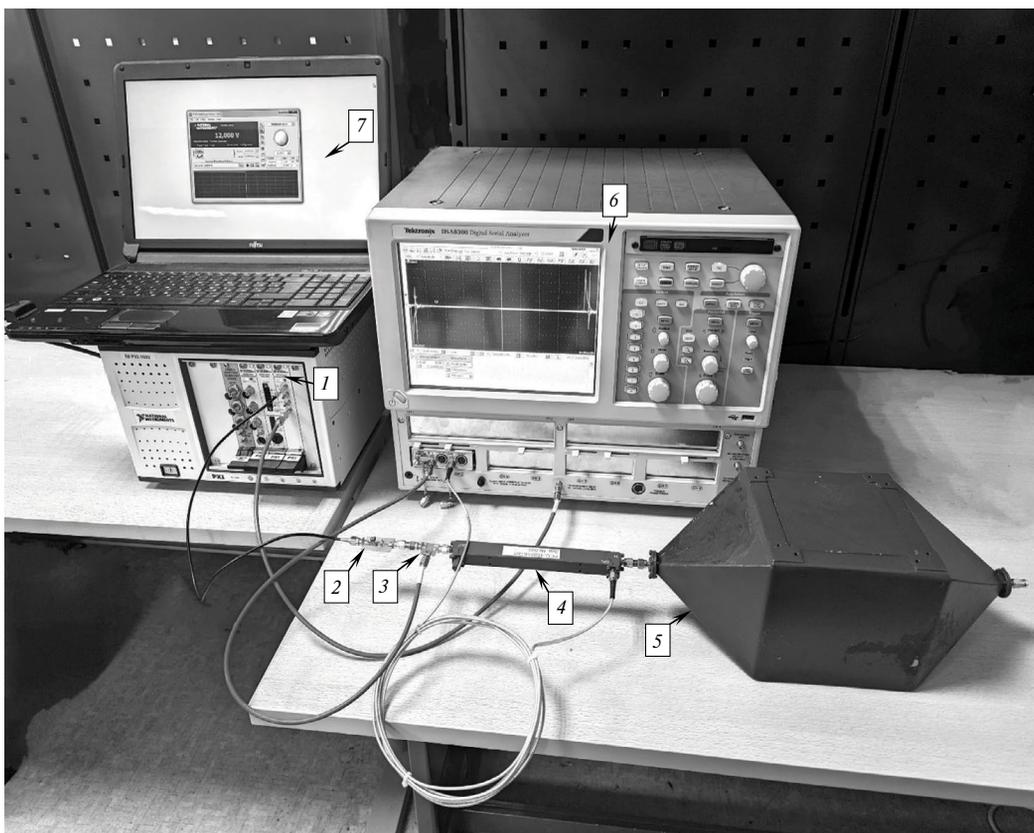


Рис. 1. Измерительная установка: 1 – генератор меандра, 2 – обостритель импульсов, 3 – датчик напряжения, 4 – направленный ответвитель, 5 – измерительная камера, 6 – осциллограф, 7 – управляющий компьютер.

форма сигнала на выходе обострителя. Спад сигнала экспоненциальный с длительностью около 20 нс. Он не создает существенного зондирующего действия по сравнению с фронтом.

С учетом некоторого ослабления сигнала обострителя при передаче его в ТЕМ-камеру интенсивность поля в камере составляет 135 Вт/м².

Отклик объекта целесообразно принимать на том порту, к которому подводится тестовый сигнал. В этом случае падающая и рассеянная волны имеют разные направления и могут быть разделены направленным ответвителем или мостом. Длина камеры обеспечивает наблюдение рефлектограммы длительностью 2.2 нс без переотражения от заднего рупора и терминатора (которое может быть сопоставимо с отражением от малоразмерного объекта зондирования).

4. УМЕНЬШЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Нелинейный отклик отыскивается по формуле (1) как малая разность между близкими сигналами. На практике условие (2) выполняется лишь приближенно. Исключить связанную с этим погрешность можно, если ввести в рассмотрение тестовый сигнал $x_0(t)$, форма которого определяется как средняя между $x_1(t)$ и $-x_2(t)$. Отклик $u_{10}(t)$ на сигнал $x_0(t)$ можно рассчитать из величины $u_1(t)$, если считать оператор объекта $S[x(t)]$ линейным для малых отклонений от значений формулы (2). В этом случае

в формуле $u_1(t) = S[x_1(t)]$ мы можем свернуть обе части с функцией $h_1(t) = F^{-1}[X_0(\omega)/X_1(\omega)]$, где $X_{0,1}(\omega)$ – спектры сигналов $x_{0,1}(t)$, F^{-1} – обратное преобразование Фурье. Тогда мы получаем

$$u_1(t) * h_1(t) = S[x_1(t) * h_1(t)] = S[x_0(t)].$$

Отсюда ясно, что

$$u_{10}(t) = u_1(t) * h_1(t). \quad (4)$$

Сигнал $u_2(t)$ пересчитывается в отклик на сигнал $-x_0(t)$ следующим образом:

$$u_{20}(t) = u_2(t) * h_2(t), \quad (5)$$

где $h_2(t) = F^{-1}[-X_0(\omega)/X_2(\omega)]$. Нелинейный отклик рассчитывается по формуле (3) путем подстановки сигналов $u_{10,20}(t)$ вместо $u_{1,2}(t)$.

Заметим, что тестовые сигналы $x_{1,2}(t)$ имеют ограниченный сверху частотный диапазон, за пределами которого регистрируются, в основном, шумы и помехи, а не компоненты сигнала. Поэтому вычислять отношения $X_0(\omega)/X_1(\omega)$ и $X_0(\omega)/X_2(\omega)$ (близкие к единице) нужно только внутри полосы тестовых сигналов. За пределами частотного диапазона тестовых сигналов спектр функций $h_{1,2}(t)$ устремим к нулю для уменьшения влияния шумов и помех при помощи фильтра нижних частот. Поскольку наблюдения выполняются во временной области, важно, чтобы этот фильтр не имел осцилляций на переходной характеристике. Поэтому будем использовать фильтр Гаусса с передаточной функцией $\exp(-\tau^2\omega^2/4)$. Здесь τ – постоянная времени фильтра, определяющая длительность фронта его переходной характеристики. В итоге формулы для функций $h_{1,2}(t)$ получаются следующие:

$$h_1(t) = F^{-1}[\exp(-\tau^2\omega^2/4) X_0(\omega)/X_1(\omega)],$$

$$h_2(t) = F^{-1}[-\exp(-\tau^2\omega^2/4) X_0(\omega)/X_2(\omega)].$$

Мы использовали $\tau = 50$ пс.

Нужно также учесть, что регистрируемые отклики $u_{1r,2r}(t)$ включают как отклик от исследуемого объекта, так и отклики от элементов измерительной камеры $u_{1c,2c}(t)$. Зарегистрируем отклики $u_{1c,2c}(t)$ отдельно при пустой камере и применим к ним коррекцию по формулам (4) и (5), определяя сигналы $u_{10c,20c}(t)$. Эта коррекция применяется также и к функциям $u_{1r,2r}(t)$ с вычислением сигналов $u_{10r,20r}(t)$. Считая

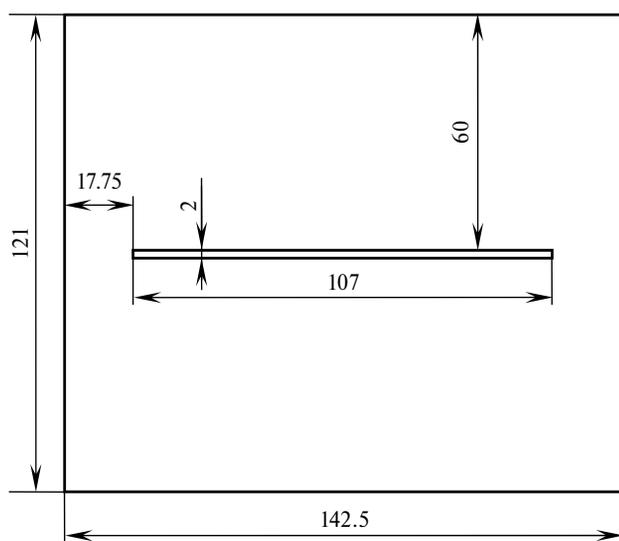


Рис. 2. Поперечное сечение использованной ТЕМ-камеры.

отклики от исследуемого объекта и камеры аддитивными, окончательно получаем следующие отклики от исследуемого объекта:

$$u_{10} = u_{10r} - u_{10c}, \quad u_{20} = u_{20r} - u_{20c}. \quad (6)$$

5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОЙ ОБЪЕКТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Найденные напряжения откликов объекта $u(t)$ на выходе камеры позволяют отыскать характеристики рассеянной объектом электромагнитной волны. В радиолокации обычно для характеристики рассеивающих свойств объекта вычисляется полная мощность рассеянного им поля [21]. Будем полагать, что потери энергии в камере отсутствуют, а объект рассеивает электромагнитную волну изотропно (и, следовательно, одинаково в направлении обоих портов камеры). Тогда величина

$$p(t) = 2u^2(t)/\rho, \quad (7)$$

где ρ – волновое сопротивление камеры (50 Ом), даст полную рассеянную объектом мощность.

Однако параметр $p(t)$ является энергетической характеристикой и поэтому правильно отражает фазо-временную структуру сигнала только по огибающей. Энергетическая характеристика поля не очень хорошо подходит для случая видеоимпульсных воздействий, при которых форма сигнала служит одним из информативных признаков рассеянного поля.

Представляется, что в случае сверхширокополосных сигналов правильнее использовать временную зависимость напряженности рассеянного поля в качестве характеристической функции рассеяния. Поскольку напряженность рассеянного объектом поля зависит от расстояния до него, целесообразно указывать эту напряженность на некотором референсном расстоянии до объекта. Если это расстояние выбрать равным 1 м, то фактически мы будем регистрировать потенциал поля $e(t)$, рассеянного объектом. Напряженность поля связана с его интенсивностью $i(t)$ соотношением

$$e(t) = \sqrt{i(t)z}, \quad (8)$$

где z – волновое сопротивление вакуума. В свою очередь, интенсивность для расстояния 1 м определяется по формуле $i(t) = p(t)/4\pi$.

Подставляя данную формулу в равенство (8), а в получившееся выражение формулу (7), получим

$$e(t) = u(t)\sqrt{z/(2\pi\rho)}. \quad (9)$$

Коэффициент $\sqrt{z/(2\pi\rho)}$ с точностью до трех значащих цифр равен 1.10 и дает простой способ пересчета зарегистрированного на выходе камеры напряжения в потенциал поля, рассеянного объектом в изотропном приближении.

6. НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ И РЕГИСТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Для селекции отклика объекта требуется устройство с направленными свойствами: мост Уитстона или направленный ответвитель. Мосты Уитстона вносят достаточно большое ослабление в канал тестового сигнала [22], поэтому в данном случае уместно применять направленные ответвители. Мы использовали направленный ответвитель Mini Circuits ZUDC20–183+ (4 на рис. 1), так как он имеет относительно низкую нижнюю граничную частоту (0.34 ГГц). Это дает длительность спада наблюдаемых импульсов около 1 нс, что вчетверо больше рабочей длительности фронта тестового сигнала. При необходимости нижнюю граничную частоту можно дополнительно снизить за счет коррекции передаточной функции направленного ответвителя цифровым фильтром [23].

Использованный способ исключения систематической погрешности измерения, связанной с различием форм тестовых сигналов (см. разд. 4), подразумевает регистрацию фактически полученных тестовых сигналов. Для этого на выходе формирователя тестовых сигналов включается датчик напряжения \mathcal{Z} (рис. 1). В датчике к проходящему коаксиальному волноводу подключен вывод резистора сопротивлением 470 Ом, а другой вывод резистора подключен к коаксиальному волноводу, отводящему сигнал на вход осциллографа.

К регистрирующему устройству предъявляется требование большого динамического диапазона, поскольку малый нелинейный отклик регистрируется на фоне значительно превышающего его общего отклика от объекта. Поэтому мы отдаем предпочтение стробоскопическим осциллографам, в которых относительно

низкочастотный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) имеет большую разрядность и вследствие этого большой динамический диапазон. Мы использовали осциллограф Tektronix DSA 8300 (6 на рис. 1) со стробоскопическим преобразователем 80E04. Разрядность АЦП данного стробоскопа составляет 16 бит.

7. ТЕСТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ЛИНЕЙНОЙ МЕРЫ. КОРРЕКЦИЯ СОБСТВЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Основным требованием к регистрирующему устройству является требование малой собственной нелинейности.

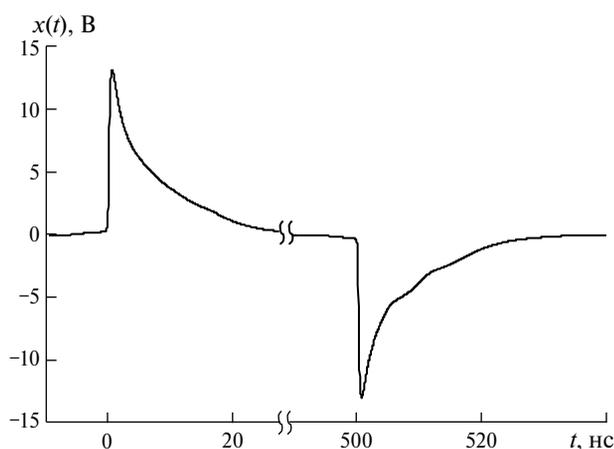


Рис. 3. Напряжение на выходе двухтактного обострителя импульсов (тестовые сигналы).

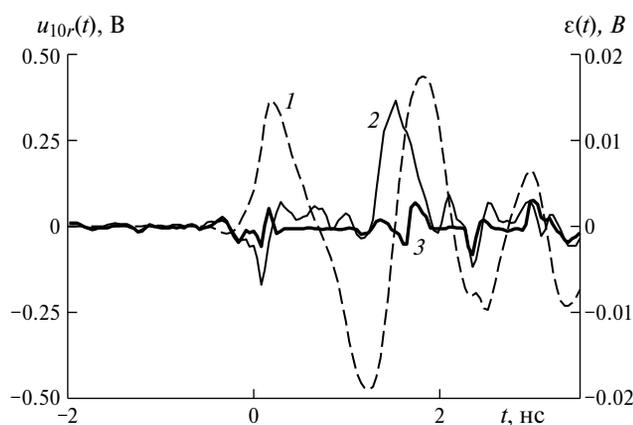


Рис. 4. Отклики от камеры с линейной мерой. Общий отклик $u_{10r}(t)$ (1) и нелинейный отклик $\epsilon(t)$ без компенсации (2) и с компенсацией (3) временного сдвига фрагментов сигналов.

Длительность переходной характеристики используемого стробоскопического преобразователя составляет 17.5 пс, а длительность фронтов регистрируемого сигнала – от 230 пс и более. Поэтому динамической нелинейностью в стробоскопическом преобразователе можно пренебречь.

Экспериментально нами установлено, что нелинейность амплитудной характеристики (статическая нелинейность) использованного осциллографа не превышает 0.4%. Амплитудная характеристика представляет собой монотонно возрастающую функцию. От этой функции существует однозначно определяемая обратная функция. С ее помощью систематическую погрешность, связанную со статической нелинейностью стробоскопического преобразователя, можно исключить.

Однако тестирование собственной нелинейности измерительной установки линейной мерой показывает весьма существенный уровень нелинейного отклика (кривая 2 на рис. 4). Его величина составляет 3.1% от отклика камеры с размещенной в ней линейной мерой (кривая 1). Природа этой нелинейности становится понятной, если рассмотреть сигналы $u_{10}(t)$ и $-u_{20}(t)$ (рис. 5), разница которых дает характеристику нелинейности $\epsilon(t)$. Видно, что разница этих сигналов наблюдается лишь в некоторых областях времени, эта разница может рассматриваться как смещение одного из сигналов относительно другого. Физическим фактором, вызывающим данный эффект, представляется погрешность установки смещения стробирующего импульса в стробоскопическом осциллографе Tektronix DSA 8300. По нашим оценкам взаимное смещение участков сигналов может достигать 10 пс, что при длительности фронта регистрируемых импульсов 230 пс дает относительное значение нелинейности до 4.3%. Отметим, что данный эффект представляется особенностью стробоскопического принципа регистрации сигналов, а не недостатком конкретного осциллографа.

Для отмеченного смещения характерно то, что оно не изменяется в течение одной измерительной сессии, если горизонтальная развертка и триггер осциллографа не перестраиваются. Поэтому предложение по исключению систематической погрешности данного типа основывается на определении областей времени и величин взаимных задержек сигналов при

регистрации откликов от линейной меры, для которой нелинейный отклик должен быть равен нулю. Затем форма одного из сигналов (u_{10} или u_{20}) принимается за опорную. В оставшемся сигнале к его частям в определенных областях применяются найденные временные смещения с обратным знаком.

Изображенные на рис. 5 сигналы получены для меры в виде дюралюминиевой пластины толщиной 1 мм и размерами $50 \times 70 \text{ мм}^2$ с внутренним отверстием размером $30 \times 50 \text{ мм}^2$. Это максимальные размеры объекта, который можно установить в использованную камеру без неприемлемых искажений электромагнитного поля. Выполнение описанной в предыдущем абзаце операции над сигналами u_{10} и u_{20} дает нелинейный отклик, представленный на рис. 4 кривой 3. Сравнивая его с сигналом без указанной компенсации, мы видим, что относительная величина нелинейного отклика уменьшилась с 4.3% до 0.6%. Такая величина уже сопоставима с собственными шумами измерительной установки.

8. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ УСТАНОВКИ И ЕЕ ПРОВЕРКА НА ТЕСТОВЫХ ПРИМЕРАХ

Чувствительность установки к отклику объекта в целом определяется шумами осциллографа и дрейфовой погрешностью регистрации им сигналов. Последняя при вычислениях

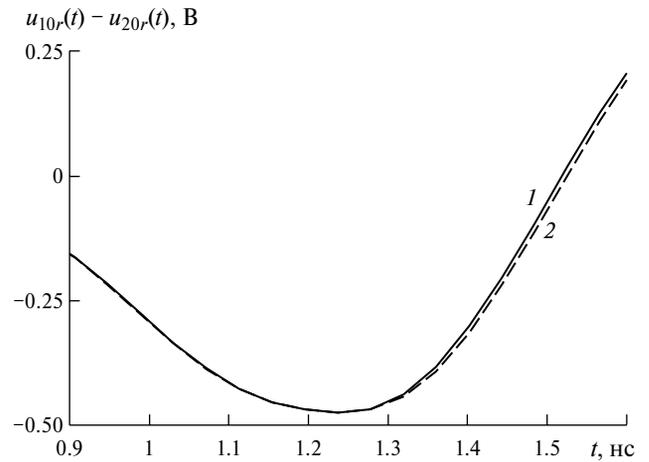


Рис. 5. Отклики $u_{10r}(t)$ и $u_{20r}(t)$ от камеры с линейной мерой на положительный (1) и отрицательный (2) тестовые сигналы. Отклик на отрицательный тестовый сигнал проинвертирован.

по формуле (6) дает некоторую невязку, которая и определяет порог обнаружения отклика объекта (чувствительность). Такая невязка – сигнал u_{10} , полученный для двух последовательных измерений откликов от пустой камеры, – приведена на рис. 6 и 7 (кривые 1). Амплитуда этого сигнала составляет 4.0 мВ, что в соответствии с формулой (9) дает чувствительность по потенциалу рассеянного объектом поля 4.4 мВ.

Чувствительность установки к нелинейному отклику объекта ограничивается, как следует из разд. 7, в основном, собственной нелинейностью осциллографа. Собственная нелинейность

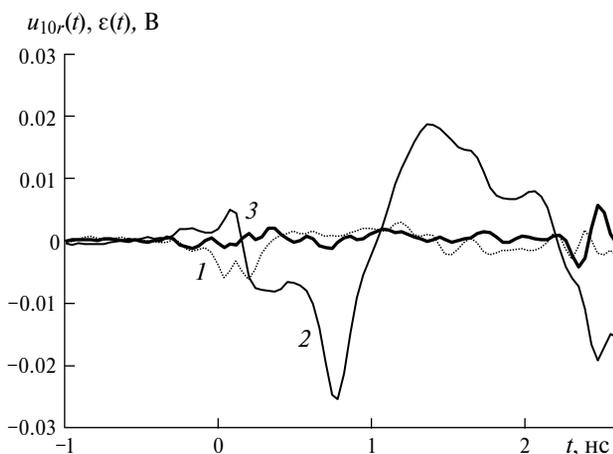


Рис. 6. Отклик $u_{10}(t)$ от пустой камеры (1) и от линейной меры (2) (короткозамкнутое кольцо диаметром 20 мм из медного провода поперечным сечением 4 мм^2), а также нелинейный отклик $\varepsilon(t)$ от линейной меры (3).

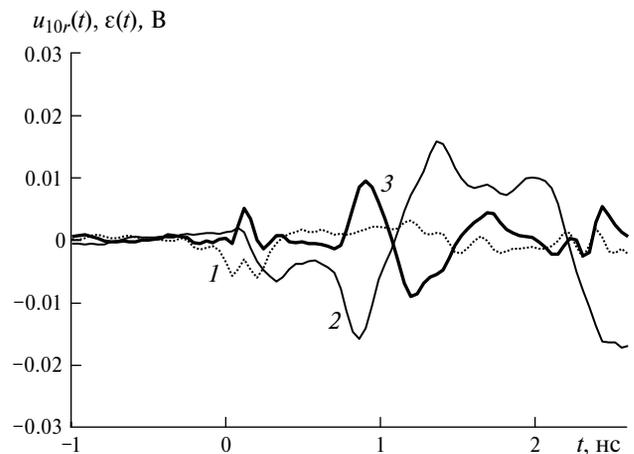


Рис. 7. Отклик $u_{10}(t)$ от пустой камеры (1) и от нелинейной меры (2) (кольцо диаметром 20 мм из медного провода поперечным сечением 4 мм^2 с включенным в его разрыв диодом HSMS-8101), а также нелинейный отклик $\varepsilon(t)$ от нелинейной меры (3).

установки при тестировании ее линейной мерой отражена кривой 3 на рис. 4 (уже с учетом компенсации сдвига осциллографом фрагментов сигнала). При амплитуде регистрируемого отклика 470 мВ (что соответствует потенциалу отклика объекта 520 мВ) амплитуда характеристики нелинейности составляет 3.2 мВ, что дает чувствительность по потенциалу нелинейно рассеянного объектом поля 3.5 мВ.

Отметим, что указанное значение чувствительности по нелинейному отклику получено при определенной мощности сигнала на входе камеры, т.е. 3.5 мВ по потенциалу при мощности 2.3 Вт (что соответствует напряжению

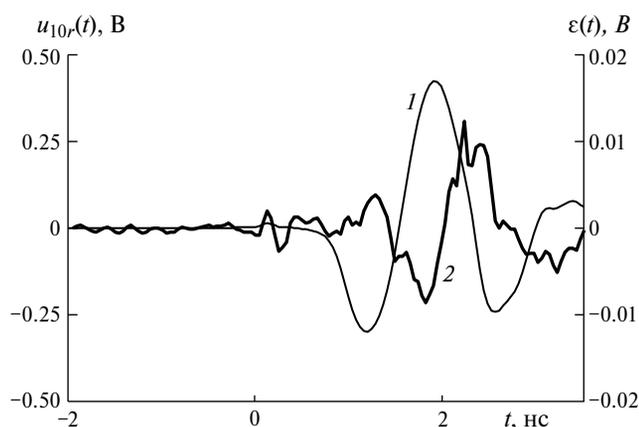


Рис. 8. Общий отклик $u_{10}(t)$ (1) и нелинейный отклик $\varepsilon(t)$ (2) от FM-приемника Precision PS-298.

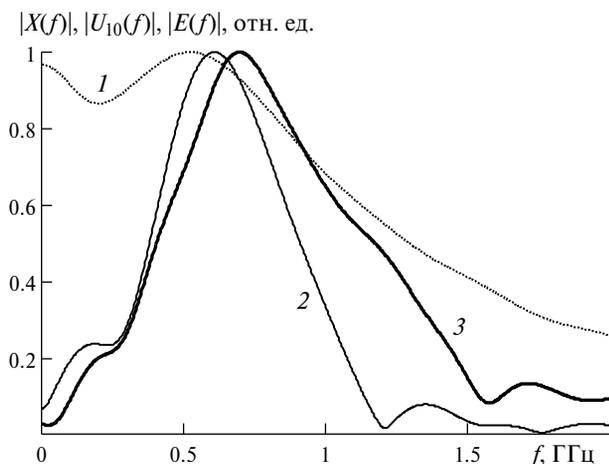


Рис. 9. Амплитудные спектры, нормированные на собственный максимум, производной тестового сигнала (1); общего отклика (2); нелинейного отклика (3) от FM-приемника Precision PS-298.

импульса 10.7 В). Этот порог чувствительности определяется, в основном, конечной эффективностью коррекции сдвигов фрагментов регистрируемых сигналов (которые происходят из-за принципа действия стробоскопического осциллографа). Если в этом случае напряжение тестового сигнала будет увеличено вдвое, то вдвое увеличится и общий отклик от объекта. Следовательно, сигнал, оставшийся после коррекции сдвигов в осциллографе, также увеличится вдвое. Поэтому чувствительность установки можно указать и в виде 3.5 мВ/10.7 В. Это отношение является безразмерным, т.е. чувствительность установки по потенциалу нелинейного отклика объекта получается выраженной в долях амплитуды тестового импульса. В нашем случае она равна 0.033%.

Проверим работу установки на нескольких тестовых объектах. В качестве таковых использованы кольца диаметром 20 мм из медного провода поперечным сечением 4 мм². Одно из колец короткозамкнуто (линейная мера), а в разрыв второго включен диод Шотки HSMS-8101 (нелинейная мера). По нашим оценкам такой диаметр кольца дает длину проводника, примерно соответствующую длине электропроводящего контура вокруг нелинейных элементов в реальных электронных устройствах. На рис. 6 кривые 2 и 3 соответствуют общему и нелинейному откликам от короткозамкнутого кольца. Общий отклик от объекта составляет 28 мВ (потенциал поля), а амплитуда нелинейного отклика не превышает порога обнаружения. Общий отклик от кольца с диодом (рис. 7) составляет 17 мВ, а нелинейный отклик имеет амплитуду 10 мВ (потенциал).

В заключение приведем пример регистрации откликов от малоразмерного электронного устройства. В качестве такового использован FM-приемник Precision PS-298. Общий и нелинейный отклики соответствуют кривым 1 и 2 на рис. 8. Общий отклик составляет 470 мВ (потенциал). Нелинейный отклик обнаруживается, и его амплитуда по потенциалу рассеянного поля (без учета глитчей случайного характера) составляет 11 мВ.

В иллюстративных целях на рис. 9 приведены амплитудные спектры: производной тестового сигнала $X(f)$ (кривая 1), общего $U_{10}(f)$ (кривая 2) и нелинейного $E(f)$ (кривая 3) откликов FM-приемника Precision PS-298. Тестовый

сигнал перед спектральным преобразованием про дифференцирован, потому что электромагнитное воздействие на внутренние нелинейные цепи объекта зондирования определяется изменением поля. Можно видеть, что спектр тестового сигнала занимает полосу частот от нуля до примерно 1 ГГц. Спектр нелинейного отклика объекта ожидаемо расширен в область верхних частот относительно спектра общего отклика, однако, по большей части спектры общего и нелинейного откликов объекта перекрываются. Это указывает на то, что классические методы селекции нелинейного отклика по частотному признаку не подходят в случае видеоимпульсных тестовых воздействий.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование ТЕМ-камеры небольшого поперечного сечения в сочетании с применением обострителя импульсов с выходной мощностью 3.4 Вт позволило реализовать зондирование исследуемых объектов ступенчатым электромагнитным полем интенсивностью до 135 Вт/м².

Двухтактный режим работы обострителя с генерацией пар импульсов противоположной полярности обеспечивает возможность измерения нелинейности рассеяния объектом ступенчатой (видеоимпульсной) электромагнитной волны.

Основную сложность при обработке измеренных сигналов представляет борьба со смещением отдельных фрагментов сигнала во времени, которое возникает вследствие применения стробоскопического осциллографа. Этот эффект фактически представляет собой одну из форм нелинейности регистрирующего устройства, он приводит к формированию нелинейного отклика от линейных объектов измерения. Предлагаемый способ компенсации собственной нелинейности приемной системы, основанный на измерении относительного сдвига откликов на положительный и отрицательный тестовые сигналы, регистрируемых для линейной меры, показал свою эффективность.

Работоспособность установки проверена на нескольких тестовых примерах. Показано, что достигнутый уровень чувствительности позволяет измерять нелинейный отклик на ступенчатую электромагнитную волну от реальных электронных приборов.

Рассмотренная установка позволяет получить основанную на измерениях поведенческую модель объекта зондирования в виде трансверсального или рекурсивного [19] нелинейного фильтра. Такие модели, как показано в работе [19], адекватны не только при видеоимпульсных воздействиях, но и на широком классе сигналов различной формы, в том числе на радиоимпульсах. Это позволит, в частности, при помощи компьютерного моделирования оптимизировать работу перспективных нелинейных локаторов, применяющих тестовые сигналы различной формы и спектра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *EDD-24T, Handheld Non Linear Junction Detector*. Datasheet. JIN Electronics Ltd. Bishops Stortford, United Kingdom.
<https://www.jindigital.com/assets/files/Products/datasheets/EDD-24T%20Datasheet.pdf>
2. *Milanesio D., Saccani M., Maggiora R., Laurino D., Porporato M.* // Ecology and Evolution. 2016. V. 6. № 7. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2011>
3. *Hienonen S., Golikov V., Vainikainen P., Räsänen A.V.* // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2004. V. 46. P. 661.
<https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.837958>
4. *Mazzaro G.J., Martone A.F., Ranney K.I., Narayanan R.M.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2017. V. 65. P. 1716.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2640953>
5. *Semyonov E.V.* // Proc. of XV Int. Conf. "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering". Novosibirsk, Russia, 19–21 November 2021. P. 295.
<https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647538>
6. *Semyonov E.V., Fateev A.V., Nazarov M.A., Berezin A.A.* // Proc. of Conf. "Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves". Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2023.
<https://doi.org/10.1109/RSEMWS8451.2023.10201997>
7. *Семенов Э.В.* // Матер. 32 Междун. науч.-тех. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Россия, 11–17 сентября 2022. С. 311.
8. *Шипилов С.Э., Якубов В.П.* // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63. № 2. С. 5.
<https://doi.org/10.17223/00213411/63/2/5>

9. Семенов Э.В., Семенов А.В. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 4. С.480.
<https://doi.org/10.1134/S1064226907040109>
10. Авдеев В.Б., Бердышев А.В., Панычев С.Н. // Телекоммуникации. 2006. № 8. С. 23.
11. Bryant P.H. US Patent 7230970, IPC H04B 1/69.
12. Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3.
<http://jre.cplire.ru/jre/mar00/1/text.html>
13. Герасименко В.Г., Мухин Н.П., Тупота В.И., Тупота А.В. Патент РФ 2219669 С1, МПК H04K 3/00.
14. Лоцилов А.Г. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 4. С. 31.
15. Щербаков Г.Н. // Специальная техника. 1999. № 1. С. 34.
16. Семенов Э.В. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 2. С. 29.
<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-2-29-39>
17. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Матвеев О.А. // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 4. С. 46.
18. Singleton H.E. Theory of nonlinear transducers. Technical Report No. 160. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1950.
<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4896/RLE-TR-160-04722817.pdf>
19. Semyonov E.V. // IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021. V. 68. № 6. P. 2192.
<https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.3048819>
20. Семенов Э.В., Поздняков В.С., Полторыхин К.М., Березин А.А. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2023. Т. 26. № 3. С 7.
21. Теоретические основы радиолокации / Под. ред. В.Е. Дудлевича. М.: Сов. радио, 1964.
22. Михеев Ф.А., Гошин Г.Г., Фатеев А.В., Ройтман М.С. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. № 2. Ч. 1. С. 219.
23. Назаров М.А., Семенов Э.В. // Матер. 32 Междун. науч.-тех. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Россия, 11–17 сентября 2022. С. 219.