

## СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2021 г. Е. И. Тренкаль<sup>а</sup>, В. С. Поздняков<sup>а</sup>, А. Г. Лошилов<sup>а</sup>, Н. Д. Малютин<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40*

*\*e-mail: ndm@main.tusur.ru*

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

Описан стенд для исследования обратного рассеяния радиочастотных импульсов длительностью 1.75–3.1 нс с изменяемой от 5.3 до 8.8 ГГц частотой заполнения. Импульсы формируются измерительным устройством и излучаются передающей широкополосной антенной с линейной поляризацией. Сигнал обратного рассеяния принимается приемной антенной системой, состоящей из собственной антенны, поляризационного разделителя сигналов и высокочастотного переключателя. Далее сигнал усиливается, обрабатывается в приемном канале измерительного устройства и регистрируется п.э.в.м. Стенд позволяет исследовать свойства диэлектрических и других материалов, метаматериалов, защитных покрытий антенн и конструкций, а также различных негабаритных объектов в лабораторных условиях. Кроме того, стенд может быть использован при постановке экспериментальных работ, для реализации которых требуется излучение и прием электромагнитных волн, возбуждаемых радиочастотными импульсами наносекундной длительности.

DOI: 10.31857/S0032816221060069

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [1, 2], что при воздействии радиочастотных сигналов на сверхвысокочастотные (с.в.ч.) устройства в виде четырехполюсников смена направления передачи энергии с выхода на вход может приводить к неравенству коэффициентов передачи в этих опытах, т.е. к невязности исследуемого объекта. Мету невязности в данном случае обычно определяют из сравнения коэффициентов  $S_{12}$  и  $S_{21}$  [3] матрицы рассеяния:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Поскольку коэффициенты матрицы  $S$  комплексные, невязность устройств может быть следующих типов: амплитудная, фазовая, частотная (преобразование частоты, включая доплеровский сдвиг), поляризационная.

В отличие от четырехполюсных устройств, при исследовании отражений от различных объектов при их облучении электромагнитной волной определить свойство невязности нельзя, поскольку в этом случае есть вход, но нет выхода. При обратном рассеянии радиочастотной волны от объекта можно провести аналогию с двухполюсником, в котором часть энергии отражается от входа, а другая часть попадает внутрь. При

этом возбуждающая этот двухполюсник электромагнитная волна порождает в нем систему нормальных волн внутри волноведущей структуры и может через единственный “вход” переотразиться в сторону источника облучения. Отсюда понятно, что в случае изучения обратного рассеяния радиолокационными методами при измерении коэффициентов  $S_{12}$  и  $S_{21}$  получаем некоторое противоречие с классическим определением невязности. Поэтому при исследовании невязности обратного рассеяния определяют коэффициенты матрицы обратного рассеяния, схожие по смыслу с коэффициентами матрицы  $S$ , но определяемые по-иному [4–6]. Основой для этого являются параметры, с помощью которых описывается электромагнитная волна, отражаемая от объекта.

Одно из определений невязности матрицы рассеяния строится на сравнении амплитуд излученного и отраженного сигналов, получаемых при излучении и отражении волны с разной поляризацией. Обозначим вертикальную поляризацию через  $V$ , горизонтальную – через  $H$ . В работах [7, 8] матрицу обратного рассеяния определяют при смене поляризации излучаемой волны с  $H$  на  $V$ . При этом принимаемый сигнал в виде отраженной волны разделяют с помощью устройства поляризационной селекции (ортоплесера) на

компоненты  $H$  и  $V$ . В результате строится матрица обратного рассеяния:

$$S_p = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где неравенство коэффициентов  $S_{VH}$  и  $S_{HV}$  является мерой невязимности по признаку поляризации.

Следует отметить, что полной аналогии между матрицами  $S$  и  $S_p$  нет, поскольку физический смысл коэффициентов разный. Невязимность при исследовании обратного рассеяния может быть определена как неравенство модулей коэффициентов матрицы обратного рассеяния  $|S_{VH}| \neq |S_{HV}|$  и/или их аргументов  $\arg(S_{VH}) \neq \arg(S_{HV})$ . Если же мы выберем в качестве основного параметра амплитуду отраженного сигнала, то необходимо нормировать коэффициенты матрицы  $S_p$  по уровню сигнала от некоторого “идеального” отражателя. В качестве последнего может быть выбрана бесконечная металлическая стенка. При других видах поляризации излучаемого сигнала можно использовать более сложные поверхности отражающих объектов [9].

Свойство невязимности, в дополнение к рассмотренному признаку поляризации при изучении обратного рассеяния, может быть определено так же, как для четырехполюсников – по параметру частоты измеряемого отраженного сигнала вследствие преобразования частоты нелинейным объектом, а также доплеровского сдвига.

В ряде работ, посвященных исследованию процесса обратного рассеяния электромагнитных волн, теоретически и экспериментально показано существование объектов с невязимными свойствами обратного рассеяния [7, 8]. Введено понятие частично невязимного объекта и представлен алгоритм декомпозиции матрицы обратного рассеяния  $S_p$  такого объекта на симметричную и антисимметричную части. При этом антисимметричная часть инвариантна к параметрам поляризационного базиса описания  $S_p$  и во всех возможных базисах имеет вид антисимметричной матрицы. На основе результатов этих и других работ предложены устройства [8, 10–13], позволившие экспериментально подтвердить в лабораторных условиях и на полигоне радиолокационное наблюдение частично-невязимных объектов.

Измерения параметров, характеризующих невязимность отраженных от различных объектов волн, рассматривались во многих публикациях, например [14–17]. В работе [18] представлен обзор с.в.ч.-антенн, устройств, материалов и сред с невязимными свойствами, которые имеют уникальные характеристики и перспективны для

применения на практике. При исследовании с.в.ч.-параметров обратного рассеяния используют достаточно сложные измерения в безэховых камерах с применением векторных анализаторов цепей и другой аппаратуры [9, 13]. Нами была поставлена задача создания стенда для исследования частично невязимного обратного рассеяния при воздействии коротких радиочастотных импульсов в условиях лаборатории.

В данной работе представлены описания структурной схемы такого стенда и принципа его работы, а также результаты измерения физической модели среды, представляющей собой ферритовый брусок, помещенный между двумя диэлектрическими подложками.

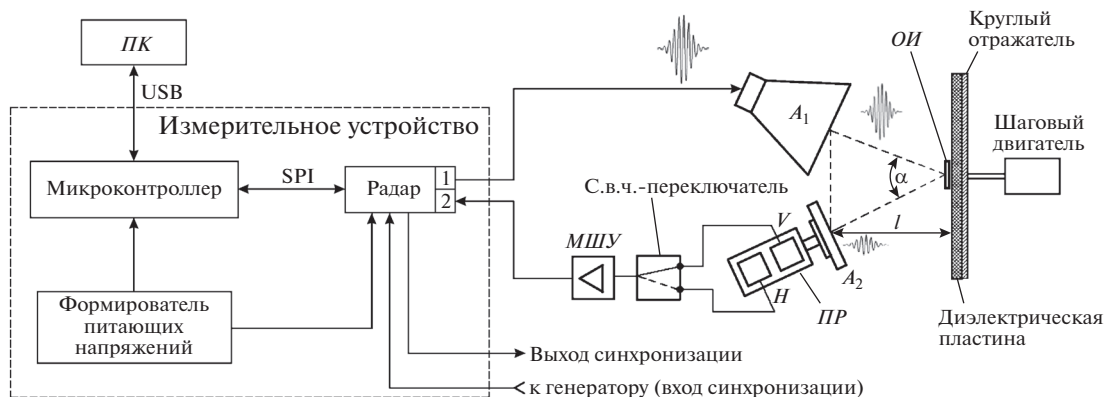
## ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Структурная схема стенда (рис. 1) содержит измерительное устройство; передающую антенну  $A_1$ , соединенную с выходом 1 радара, генерирующего радиочастотный импульс; приемную антенну  $A_2$ , размещенную на входе поляризационного разделителя  $PP$ , выходы которого соединены через с.в.ч.-переключатель и малошумящий усилитель  $MШУ$  с входом 2 радара измерительного устройства; персональный компьютер  $ПК$ . Измерительное устройство включает в себя микроконтроллер и формирователь питающих напряжений.

Передающая  $A_1$  и приемная  $A_2$  антенны ориентированы относительно отражающего круглого металлического экрана так, чтобы их оптические оси пересекались под небольшим углом  $\alpha$  на объекте исследований  $ОИ$ . В качестве экрана использовался диск диаметром 240 мм из нержавеющей стали, закрытый диэлектрической пластиной из полиэтилена толщиной 5 мм, на которой закрепляют исследуемые объекты – модели среды. Металлический отражатель приводит в во вращательное движение шаговым двигателем с управлением от персонального компьютера и контролем угла поворота с минимальным шагом  $3^\circ$ .

Микроконтроллер измерительного устройства предназначен для управления режимом измерения радара, временного хранения измеряемых данных и их передачи через порт USB в персональный компьютер. Переключение выходов поляризационного разделителя осуществляется персональным компьютером. Управление измерительным устройством и стендом в целом осуществляется с помощью разработанного специализированного программного обеспечения.

Микросхема радара содержит генератор тестового сигнала, приемник, вход и выход синхронизации. Тактирование может быть выполнено от внутреннего генератора или от внешнего источ-



**Рис. 1.** Структурная схема стенда для исследования частично невязанного обратного рассеяния. 1 – выход радиочастотного сигнала; 2 – вход принимаемого отраженного от объекта сигнала;  $A_1$ ,  $A_2$  – соответственно передающая и приемная антенны; ПР – поляризационный разделитель с выходом горизонтальной  $H$  и вертикальной  $V$  поляризации принимаемого электромагнитного сигнала; МШУ – малошумящий с.в.ч.-усилитель; ОИ – объект исследований; ПК – персональный компьютер.

ника через вход синхронизации. Радар имеет следующие технические характеристики:

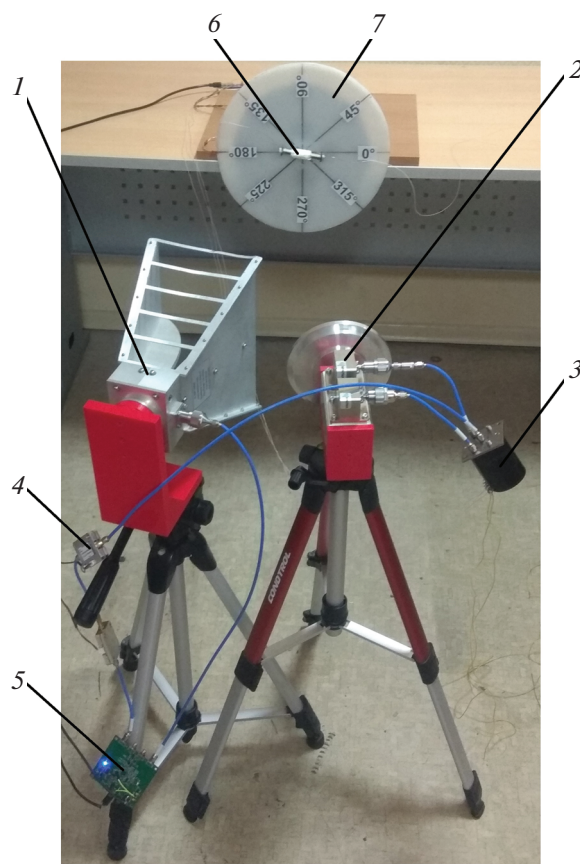
– длительность сигнала, нс	1.75–3.1
– центральная частота, ГГц	5.3–8.8
– частота дискретизации, ГГц	38
– чувствительность, мВ	0.1
– динамический диапазон, дБ	60
– максимальная дальность измерения, м	21.7

Радар формирует радиоимпульс с амплитудой 0.6 В, параметры которого определяются настройками генератора.

Внешний вид стенда показан на рис. 2.

Тип поляризации излучаемой волны, вертикальная или горизонтальная, задается ориентацией передающей антенны  $A_1$ , в качестве которой взята антенна A-INFOMW LB-8180-NF (0.8–18 ГГц). Установка исследуемого объекта на вращающемся диске обеспечивает поворот плоскости поляризации излучаемой электромагнитной волны относительно исследуемого объекта в пределах  $0^\circ$ – $360^\circ$ . При этом изменение плоскости поляризации за счет вращения антенны  $A_1$  имеет вспомогательный характер и, как показала практика, вносит существенные погрешности в измерения.

С помощью приемной гофрированной рупорной антенны  $A_2$  принимается отраженный от исследуемого объекта сигнал с неизвестным соотношением между вертикальной и горизонтальной составляющими поляризации. Поляризационный разделитель [19–24] позволяет декомпозировать эти составляющие и передать одну из них с помощью с.в.ч.-переключателя NARDA 143DT через волноводно-коаксиальные разъемы и усилитель на приемный канал 2 приемопередатчика. Переключением выхода поляризационного раз-



**Рис. 2.** Фотография стенда. 1 – передающая антенна  $A_1$ ; 2 – сборка приемной антенны  $A_2$  и поляризационного разделителя; 3 – с.в.ч.-переключатель сигналов с выходов  $H$ ,  $V$  поляризационного разделителя на вход малошумящего усилителя 4; 5 – приемный канал измерительного устройства; 6 – исследуемый объект, установленный на диске 7, видимая поверхность которого выполнена из диэлектрика, закрепленного на металлическом диске-отражателе (тыльная сторона).

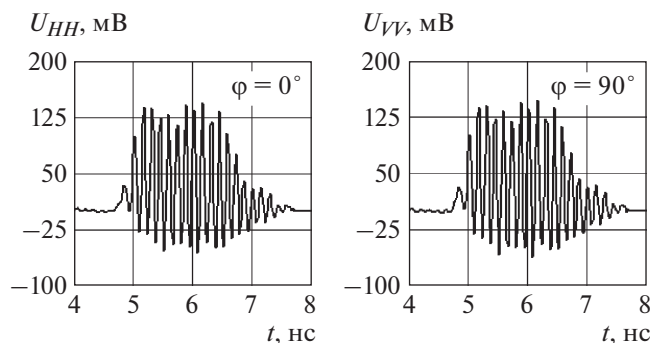


Рис. 3. Осциллограммы напряжений  $U_{HH}$  и  $U_{VV}$  на выходе измерительного устройства при измерении  $S_p$  при углах поворота  $\varphi = 0^\circ$  и  $90^\circ$  металлического диска.

делителя измеряется другая составляющая поляризации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### Калибровка

Перед началом измерений различных объектов проводилась калибровка стенда путем измерения отраженного сигнала от круглого отражателя при его вращении от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  в отсутствие на нем испытуемого объекта. Также проводились измерения с использованием антенны  $A_1$ , зафиксированной в специально разработанной системе крепления, изготовленной с помощью 3D-печати. Выполнялся поворот передающей антенны  $A_1$  от исходного положения на углы  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Указанные положения антенны  $A_1$  соответствовали поляризации излучаемой электромагнитной волны: горизонтальной ( $H$ ), под углом  $45^\circ$  и вертикальной ( $V$ ). В приемном канале использовались выходы  $H$  и  $V$  поляризационного разделителя, обеспечивающие сочетания поляризации передача–прием в следующих вариантах:  $HH$ ,  $HV$ ,  $VV$ ,  $VH$ ,  $45^\circ H$ ,  $45^\circ V$ .

Однако поворот антенны  $A_1$  при проведении экспериментов приводил к изменениям угла  $\alpha$  и расстояния  $l$ , а следовательно, к неприемлемым погрешностям измерения. Такой способ изменения поляризации требует дополнительных калибровочных измерений в каждом положении антенны  $A_1$ . Поэтому в процессе измерений использовалось вращение диска и соответственно объекта исследований (см. рис. 1, 2) с помощью шагового двигателя относительно фиксированной плоскости поляризации электромагнитного поля, излучаемой антенной  $A_1$ .

Целью калибровки являлось определение погрешности при измерении матрицы обратного рассеяния  $S_p$ , которая для вращающегося диска должна максимально близко удовлетворять усло-

виям  $S_{HH} = S_{VV}$ ,  $S_{HV} = S_{VH} = 0$ . Измерения коэффициентов  $S_p$  проводились при вращении диска от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . На рис. 3 показаны осциллограммы напряжений  $U_{HH}$  и  $U_{VV}$  на выходе измерительного устройства при углах поворота  $\varphi = 0^\circ$  и  $90^\circ$ .

Аналогичные осциллограммы получены при  $\varphi = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$  для  $U_{VV}, U_{VH}, U_{HV}$ . Зависимость  $U_{HH}$  от угла  $\varphi$  измерялась при неизменной ориентации передающей антенны, соответствующей поляризации  $H$ , при этом сигнал снимался с выхода  $H$  поляризационного разделителя. Напряжение  $U_{HV}$  снималось с выхода  $V$  поляризационного разделителя при различных углах  $\varphi$  и неизменном положении антенны  $A_1$ . Определено среднее значение напряжения  $U_{HHm}$ , равное 145.0 мВ, и максимальное отклонение от среднего  $\Delta U_{HH} = 2.9$  мВ, что составило 2% от  $U_{HHm}$ . При измерении  $U_{HV}$  получено среднее значение  $U_{HVm} = 3.8$  мВ в диапазоне  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и максимальное абсолютное отклонение от среднего  $\Delta U_{HV} = 4.9$  мВ при  $\varphi = 180^\circ$ . На основании анализа погрешностей измерения коэффициентов  $S_{HV}, S_{VH}$  был сделан вывод о целесообразности перехода от горизонтальной поляризации к вертикальной при в интервале углов  $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$ .

При указанных ограничениях на угол  $\varphi$  динамический диапазон при измерениях  $S_{HH}, S_{HV}, S_{VH}$  составит:

$$D_{HH} = 20 \log(\max(\Delta U_{HH})/U_{HHm}) = -34.0 \text{ дБ}, \quad (3)$$

$$D_{VH, HV} = 20 \log(\max(\Delta U_{HV})/U_{HHm}) = -33.7 \text{ дБ}. \quad (4)$$

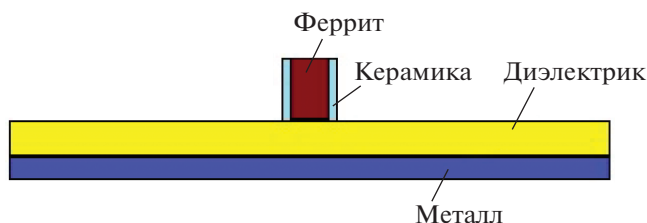
В результате измерений получена нормированная по  $U_{HHm}$  матрица рассеяния  $S_{pn}$  диска в диапазоне  $\varphi = 45^\circ - 135^\circ$ :

$$S_{pn} = \frac{2}{(S_{HH} + S_{VV})} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.992 & 0.021 \\ 0.018 & 1.008 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

### Объект исследования, результаты измерений

В качестве объекта исследований взят ферритовый брусок (материал 1СЧ12) размером  $8 \times 4 \times 70$  мм, помещенный между двумя диэлектрическими подложками с относительной проницаемостью  $\epsilon_r = 9.8$  размером  $8 \times 1 \times 64$  мм. Брусок размещали плоскостью  $4 \times 70$  мм на диэлектрической пластине вдоль линии  $0^\circ$  (см. рис. 2, поз. 6), высота бруска над поверхностью диска составляла 8 мм (рис. 4). Подмагничивание феррита осуществлялось неодимовым магнитом размером  $6 \times 4 \times 6$  мм в поперечном направлении по центру бруска.

На рис. 5 приведены сигналы в виде временных зависимостей напряжений на выходе микроконтроллера при разных углах наклона ферритового



**Рис. 4.** Испытуемый объект, содержащий ферромагнитное включение и размещенный на отражателе с диэлектрической пластиной.

бруска, задаваемых поворотом диска-отражателя, и при переключении выходов поляризационного разделителя  $U_{HH}$ ,  $U_{HV}$ ,  $U_{VH}$ .

Измерения позволили получить матрицу обратного рассеяния в абсолютных значениях напряжений и в нормированном виде (нормирование проводилось по коэффициенту  $0.5(U_{HH} + U_{VV})$ ):

$$S_{pn} = \frac{2}{(U_{HH} + U_{VV})} \begin{bmatrix} U_{HH} & U_{HV} \\ U_{VH} & U_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.002 & 0.139 \\ 0.041 & 0.998 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Оценка коэффициентов  $S_{pn}$  в (6), исходя из превышения порога чувствительности  $D_{VH, HV}$  (4), дает следующие величины:  $D_{HV} = -17.14$  дБ,  $D_{VH} = -27.744$  дБ. Рассчитанный коэффициент невязности [7, 8] составил  $\xi = 0.089$ , что позволяет сделать вывод о частичной невязности матрицы обратного рассеяния исследуемой физической модели.

В разработанной программе для обработки результатов измерений предусмотрено проведение спектрального анализа временных зависимостей, что дает возможность получить матрицы обратного рассеяния в комплексной форме и осуществить их анализ с определением группы из шести инвариантов Хойнена–Эйлера:  $\varphi$ ,  $m$ ,  $\theta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$  – и двух поляризационных инвариантов  $\zeta$ ,  $\eta$ , имеющих угловую размерность [25–27].

Проведены измерения матрицы обратного рассеяния ферритового бруска (см. рис. 4) при его продольном намагничивании посредством соленоида длиной 16 мм. Соленоид был расположен поверх бруска и закрывал его участок  $\pm 9$  мм от центра от падающей электромагнитной волны. При токе подмагничивания 1.5 А получена нормированная матрица рассеяния:

$$S_{pn} = \begin{bmatrix} 1.003 & 0.177 \\ 0.019 & 0.997 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

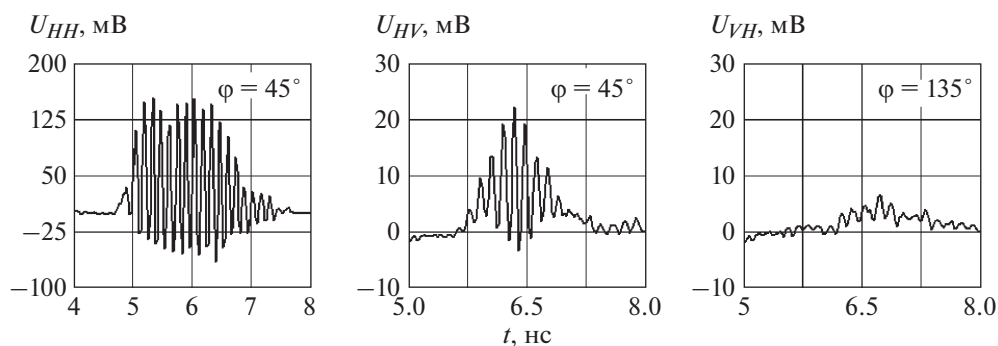
а после применения преобразования Фурье к исходным временным зависимостям напряжений  $U_{HH}$ ,  $U_{VV}$ ,  $U_{VH}$ ,  $U_{HV}$  – комплексная нормированная матрица:

$$\bar{S}_{pn} = \begin{bmatrix} 0.802 + 0.597i & 0.147 + 0.054i \\ 0.019 + 8.72i \cdot 10^{-3} & 0.821 + 0.571i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Используя (8), определен угол невязности  $\zeta = 5.03^\circ$  и разность абсолютных фаз симметричной и антисимметричной частей матрицы рассеяния  $\zeta = 20.6^\circ$  [27].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный стенд позволяет излучать, принимать, оцифровывать и записывать отклики от исследуемого объекта при изучении параметров различных материалов и физических моделей различных сред в режиме отражения электромагнитной волны радиоимпульса длительностью в интервале 1.75–3.1 нс при изменяемой от 5.3 до 8.8 ГГц частоте заполнения. Получаемые данные в виде зависимостей напряжения от времени дают возможность при последующей обработке записываемых сигналов проводить построение и анализ матриц обратного рассеяния в лабораторных условиях. Приведенные примеры измерений демонстрируют возможности стенда, ограниченные, в основном, величиной развязки  $H$  и  $V$  каналов поляризационного разделителя и неидеаль-



**Рис. 5.** Временные зависимости напряжений на выходе микроконтроллера при углах наклона ферритового бруска  $\varphi = 45^\circ$  и  $135^\circ$  и переключении выходов поляризационного разделителя.

ностью отражателя, на котором устанавливается объект исследования. Порог чувствительности составил –33.7 дБ. Стенд применим для исследования свойств обратного рассеяния устройств, метаматериалов, защитных покрытий антенн и конструкций, диэлектрических и других материалов, а также при постановке экспериментальных работ, для реализации которых требуется излучение и прием электромагнитных волн, возбуждаемых радиочастотными импульсами с указанными параметрами.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны к.т.н. М.О. Коноваленко и инженеру В.В. Соколову, а также инженерам М.В. Дугину и В.А. Титову за разработку и измерение параметров соответственно блока приемной антенны и поляризационного разделителя, а также малошумящего усилителя, изготовленных в АО “НПФ “Микран”.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2020-0039 от 01.03.2020. Экспериментальные исследования проведены с применением оборудования ЦКП “Импульс”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carlin H.* // IRE Transactions on Circuit Theory. 1956. V. 3. № 2. P. 88. <https://doi.org/10.1109/tct.1956.1086297>
2. *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р.* Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: Связь, 1971.
3. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988.
4. *Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А.* Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966.
5. *Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризации рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
6. *Boerner W.M., Jamaguchi Y.* // Aerospace and Electronic Systems Magazine. 1990. V. 5(6). P. 3. <https://doi.org/10.1109/62.54634>
7. *Хлусов В.А.* // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1441.
8. *Хлусов В.А., Воробьев П.В.* Препринт ИЯФ 95-106. Новосибирск, 1995.
9. *Khristenko A.V., Konovalenko M.O., Rovkin M.E., Khlusov V.A., Marchenko A.V., Sutulin A.A., Maluyutin N.D.* // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. V. 66. № 4. P. 1977. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2800640>
10. *Бутько В.А., Доценко В.В., Гонтер В.Я., Носов Д.М., Осипов М.В., Ровкин М.Е., Сурков А.С., Хлусов В.А.* Патент № 2413185 РФ // Бюл. № 6. Оpubл. 27.02.2011.
11. *Осипов М.В., Хлусов В.А.* Патент RU2398318 // Бюл. № 24. Оpubл. 27.08.2010.
12. *Доценко В.В., Осипов М.В., Хлусов В.А.* Патент RU2398317 // Бюл. № 24. Оpubл. 27.08.2010.
13. *Бутько В.А., Носов Д.М., Сурков А.С., Хлусов В.А.* // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2006. № 6. С. 66.
14. *Taravati S., Chamanara N., Caloz C.* // Phys. Rev. B, Condens. Matter. 2017. V. 96. № 16. P. 165. <https://doi.org/10.1103/Phys-RevB.96.165144>
15. *Sukhanyuk M., Shoshin E.L.* // Proc. of the 9th International Scientific and Practical Conference of Students. Post-graduates Modern Techniques and Technologies (7-11 April 2003) MTT 2003. Tomsk, 2003. P. 71. <https://doi.org/10.1109/SPCMTT.2003.1438135>
16. *Zang W.J., Wang X.T., Alvarez-Melcon A.A., Gomez-Diaz J.S.* <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2947847> [Online]: <https://arxiv.org/abs/1906.06418>
17. *Guo X., Ding Y., Duan Y., Ni X.* // Light: Science and Applications. 2019. V. 8. Article number 123. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0225-z>
18. *Сычев А.Н., Малютин Н.Д.* // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>
19. *Konovalenko M.O., Sokolov V.V., Trenkal E.I., Maluyutin N.D.* // International Scientific Conference CAMSTech-2020: Advances In Material Science And Technology. (Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020) IOP Publishing, 2020. P. 052018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/5/052018>
20. *Крылов Ю.В.* // Научные технологии. 2016. Вып. 8(17). С. 13.
21. *Uwe Rosenberg, Ralf Beyer* // Proc. of the 41st European Microwave Conference. 2011. P. 663. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101784>
22. *Ali Imran Sandhu.* Master of Science Thesis in the program Communication Antenn Group. Department of Signals & Systems Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2010.
23. *Narayanan Gopal* // Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology. Harvard University, March 2002. P. 505.
24. *Sarasa P., Díaz-Martín M., Angevain J.-C., Mangenot C.* // 32nd ESA Antenna Workshop. Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EU-CAP) 2011. P. 1181.
25. *Karnychev V., Khlusov V., Lighthart L.P., Sharygin G.* // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2004. V. 42. № 3. P. 529. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.817807>
26. *Карнышев В.И., Лутхарм Л.П., Хлусов В.А., Шарыгин Г.С.* // Сб. докладов по тематике “Радиолокация и навигация” Международной н.-т. конф. “Радиолокация, навигация, связь”. (RLNC-2002, Воронеж) 2002. С. 85.
27. *Karnychev V., Lighthart L., Khlusov V., Sharygin G.* // Proc. 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON-2002. (IEEE Cat.No.02EX562) P. 572. <https://doi.org/10.1109/mikon.2002.1017912>