

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 621.373

ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО РАДАРА
ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЗА СТЕНОЙ

© 2019 г. Е. В. Балзовский¹, Ю. И. Буянов¹, В. И. Кошелев¹, *, Э. С. Некрасов¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН,
Российская Федерация, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3

*E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

После доработки 12.10.2018 г.

Принята к публикации 15.10.2018 г.

Разработана приемопередающая система, состоящая из сканирующих приемной и передающей антенных решеток, для исследования обнаружения объектов и измерения поляризационной структуры сверхширокополосных электромагнитных импульсов. Показана возможность определения углового местоположения металлических объектов и человека за стеной из легких строительных материалов. Исследовано изменение поляризационной структуры отраженных от объектов импульсов при разных углах положения объекта, что является дополнительным информационным признаком.

DOI: 10.1134/S0033849419070015

ВВЕДЕНИЕ

Поиск подвижных и неподвижных объектов за оптически непрозрачными препятствиями является одной из важных задач радиолокации малого радиуса действия. Для обнаружения скрытых объектов, в том числе и людей, в последнее время активно используют короткие сверхширокополосные (СШП) импульсы, которые позволяют получить высокое пространственное разрешение для объектов, находящихся за препятствиями из строительных материалов [1].

Такие исследования проводят в целях антитеррористической борьбы [2–5], а также для обнаружения людей под завалами после стихийных или техногенных катастроф [6–8]. Наличие живого человека за препятствием можно оценить по сердцебиению, дыханию, перемещению зондируемого объекта относительно преграды, используя методы радиоволновой томографии, позволяющие получать двумерные изображения объектов [9].

Для определения местоположения объектов необходимо перемещать приемопередающую систему относительно препятствия, что затрудняет процесс поиска. Сканирование диаграммами направленности (ДН) позволяет расширить возможности радаров. Режим сканирования подразумевает использование антенных решеток (АР), что позволяет также сузить ДН и увеличить точность определения углового положения объекта.

В СШП АР для сканирования ДН используют управляемые линии задержки (УЛЗ), вносящие контролируемый временной сдвиг импульсов в канале каждого антенного элемента. В качестве переключателей в УЛЗ могут быть применены электромеханические коммутаторы, а также твердотельные коммутаторы на основе полевых транзисторов. Они переключают отрезки коаксиального кабеля. Такие устройства обеспечивают время задержки с пикосекундной точностью и имеют широкую полосу пропускания, достаточную для неискажающей передачи и регистрации СШП-импульсов.

Поляризационная структура (ПС) отраженных импульсов является информационным признаком при распознавании зондируемых объектов. При облучении объекта линейно поляризованным излучением в отраженном поле может появиться кроссполяризованная компонента [10], которая приводит к изменению ее поляризации с линейной на эллиптическую. При исследовании ПС отраженных от объектов импульсов необходимо регистрировать одновременно две ортогональные компоненты вектора напряженности электрического поля с малыми искажениями их временной формы [11]. В работе [12] представлены результаты экспериментов, оценивающих отношения ширины металлического объекта к длине волны на центральной частоте спектра зондирующего импульса, при которых наблюдали кросспо-

ляризованную компоненту и, соответственно, изменение ПС отраженного поля.

Для создания малогабаритных АР используют компактные антенны. В Институте сильноточной электроники СО РАН сравнительно давно начали разрабатывать антенны, которые позволяют излучать и регистрировать импульсные поля с малыми искажениями их временной формы. Комбинированные антенны с расширенной полосой частот [13, 14] широко используют в мощных источниках СШП-излучения на основе возбуждения одиночных антенн и многоэлементных АР высоковольтными (~ 200 кВ) биполярными импульсами напряжения [15]. Размеры антенн соответствуют половине пространственной протяженности возбуждающего биполярного импульса напряжения, и антенны имеют широкую ДН. Поэтому они были использованы в режиме широкоугольного сканирования волновым пучком в H - и E -плоскостях [16]. Приемные антенные решетки предпочтительно строить на основе активных скрещенных дипольных антенн с расширенной полосой пропускания. Они имеют выраженный фазовый центр, совпадающий с геометрическим центром диполя, что является важным условием при исследовании ПС рассеянного объектами импульсного электромагнитного поля.

В предыдущей работе [17] мы разработали приемопередающую систему для исследования ПС импульсов, отраженных от объектов. Данная система включала в себя сканирующую приемную АР из активных скрещенных дипольных антенн и два излучателя. В качестве источника с линейной вертикальной поляризацией без сканирования использовали решетку 2×2 из КА, оптимизированных для возбуждения биполярным импульсом напряжения длительностью 0.5 нс [18]. Для излучения импульсов с эллиптической поляризацией применяли одиночную цилиндрическую спиральную антенну, возбуждаемую также низковольтным биполярным импульсом длительностью 0.5 нс.

Цель данной работы – исследование и разработка приемопередающего модуля многополяризационного СШП-радара со сканированием в горизонтальной плоскости в режиме излучения и приема коротких импульсов. Использование сканирующих передающих и приемной АР позволит решать задачи по обнаружению объектов за радиопрозрачными препятствиями в широком угловом диапазоне без механического перемещения приемопередатчика. Заложенная в модуль возможность измерения ПС отраженных импульсов расширяет возможность распознавания радаром зондируемых объектов.

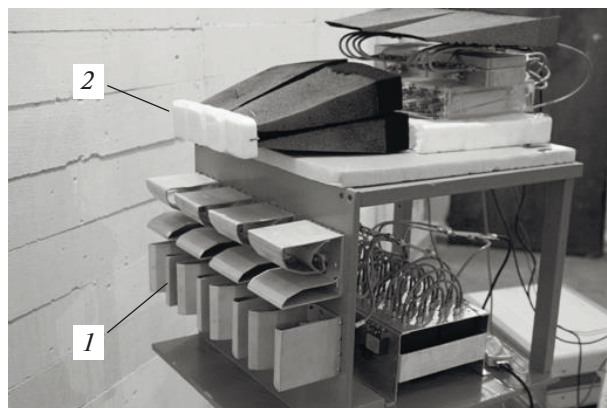


Рис. 1. Конструкция приемопередатчика: 1 – передающая антенная решетка, 2 – приемная антенная решетка.

1. СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК

Конструкция разработанного приемопередающего модуля представлена на рис. 1. Передающая АР 1 собрана из КА, расположенных в два ряда по четыре элемента. Верхний ряд предназначен для излучения СШП-импульсов вертикальной линейной поляризации, нижний – горизонтальной. Расстояние между центрами соседних элементов составляет 100 мм. Реализовано дискретное сканирование в горизонтальной плоскости в направлениях $\theta_c = \pm 6^\circ, \pm 19^\circ, \pm 33^\circ$. Для регистрации рассеянного объектами импульсного электромагнитного поля использовали двухполяризационную приемную АР 2, состоящую из скрещенных активных дипольных антенн. Такая решетка способна регистрировать одновременно две ортогональные компоненты вектора напряженности электромагнитного поля с малыми искажениями их временной формы с семи фиксированных направлений $\theta_0 = 0^\circ, \pm 13^\circ, \pm 26^\circ, \pm 40^\circ$ в горизонтальной плоскости. Режим сканирования обеспечивали УЛЗ, вносящие контролируемый временной сдвиг импульсов, принимаемых каждым антенным элементом. Характеристики линейной сканирующей приемной АР подробно описаны в [17].

Схема передающей АР представлена на рис. 2. Решетка возбуждается генератором биполярных импульсов напряжения 1 длительностью 0.5 нс. С генератора импульс напряжения поступает на делитель 1:4 и трансформатор сопротивлений на неоднородной полосковой линии 2. После делителя импульсы поступают на четырехканальное устройство УЛЗ. Для обеспечения углового сканирования в горизонтальной плоскости использовали УЛЗ на основе шестипозиционных электромеханических коммутаторов Dynatech Micro-

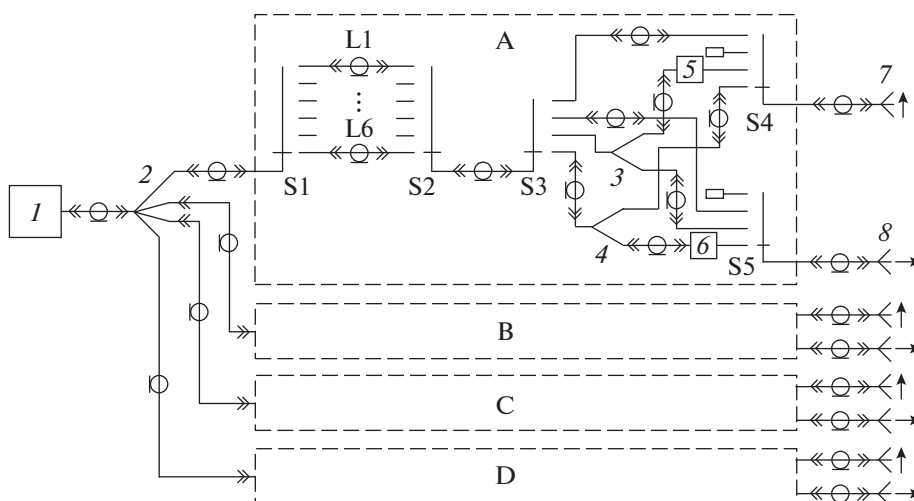


Рис. 2. Схема передающей антенной решетки: 1 – генератор биполярных импульсов напряжения, 2 – 1:4 делитель, 3, 4 – 1:2 делитель, 5, 6 – линии задержки, 7 – антенна с вертикальной поляризацией излучения, 8 – антенна с горизонтальной поляризацией излучения.

wave Technology S1 и S2 с полосой пропускания 18 ГГц. Коммутаторы переключали отрезки коаксиального кабеля L1...L6.

Для формирования шести направлений максимума ДН передающей АР рассчитали времена задержки в канале каждого антенного элемента А, В, С, D. Исходя из времен задержки, изготовили коаксиальные кабели необходимой длины. В таблице 1 приведены рассчитанные времена задержки и длины кабелей для двух каналов УЛЗ. Оставшиеся два канала имеют такие же времена задержки и длины кабелей, но инвертированы относительно первых. После УЛЗ сигнал приходит на четырехпозиционный электромеханический коммутатор S3, предназначенный для выбора вида поляризации излучения. Получены следующие виды поляризации излучения: линейная вертикальная, линейная горизонтальная, эллиптическая с правым и эллиптическая с левым вращением.

Для излучения импульса с эллиптической поляризацией поля возбуждали верхний и нижний ряд передающих КА. Для этого разработали делители мощности 3, 4, каждый из которых имеет один вход и два выхода. Делители изготовили на диэлектрике марки ФЛАН с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$. Измеренный коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) не превышает 1.6 в полосе частот 0.4...4.4 ГГц. Коэффициент передачи с входа на любой выход составляет не менее -3.5 дБ в указанной полосе частот. Исследования характеристик делителя выполнили на измерителе комплексных коэффициентов передачи Agilent N5227A с полосой частот 67 ГГц. Изготовили восемь делителей, выходы которых подключали к парам антенн 7, 8 с разной поляризацией при помощи коаксиальных линий. Длины линий 5, 6 рассчитали для получения максимального значения коэффициента эллиптичности, который получили при внесении

Таблица 1. Рассчитанные времена задержки и длина кабелей

θ_c , град	Канал А		Канал В	
	временной сдвиг, пс	длина кабеля, мм	временной сдвиг, пс	длина кабеля, мм
-33	581.53	124.08	400	85.34
-19	618.04	131.87	509.5	108.71
-6	654.88	139.73	620.04	132.29
0	672.3	—	672.3	—
6	689.72	147.16	724.56	154.6
19	726.56	155.02	835.1	178.18
33	763.07	162.81	944.6	201.55

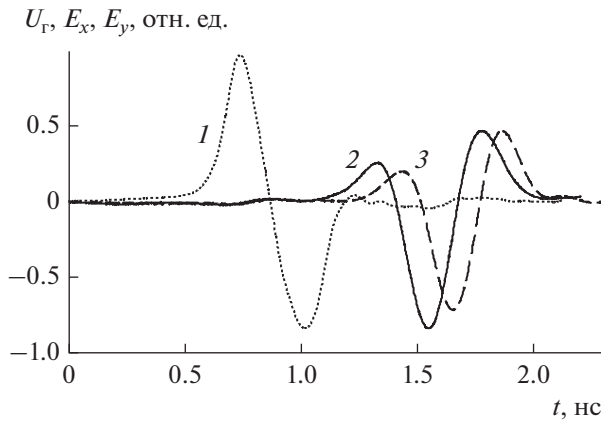


Рис. 3. Осциллограммы импульсов генератора $U_g(t)$ (кривая 1) и излучения вертикальной E_y (кривая 2) и горизонтальной E_x (кривая 3) поляризации.

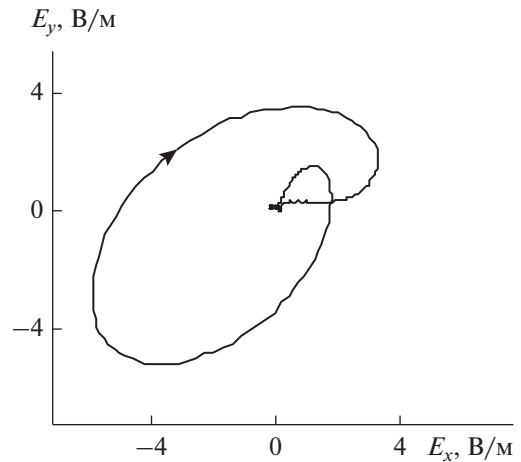


Рис. 4. Годограф излученного поля при угле сканирования $\theta_c = -6^\circ$.

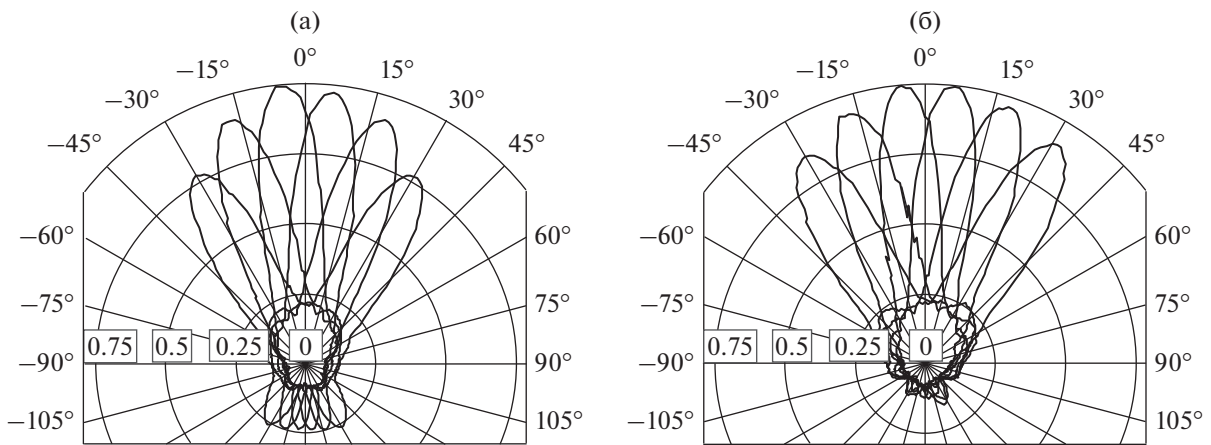


Рис. 5. Диаграммы направленности передающей антенной решетки по пиковой напряженности поля E_{Π} для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризаций излучения.

временной задержки, равной четверти периода импульса излучения, в канал одной из антенн.

На рис. 3 представлены импульс напряжения генератора $U_g(t)$ (кривая 1), излученные решеткой импульсы вертикальной E_y (кривая 2) и горизонтальной E_x (кривая 3) поляризации. Импульс горизонтальной поляризации сдвинут по времени относительно импульса вертикальной поляризации. В результате временного сдвига получено эллиптически поляризованное излучение, годограф которого представлен на рис. 4 для угла сканирования $\theta_c = -6^\circ$. Годографы излученного поля имеют схожую структуру во всем диапазоне сканирования $-33^\circ \dots +33^\circ$. Коэффициент эллиптичности p меняется в пределах $0.49 \dots 0.56$. Годограф вписывается в эллипс, и величина p оценивается как отношение меньшей к большей оси описанного эллипса.

Передающие КА излучают кроссполяризованную компоненту поля. При излучении импульсов

с линейной вертикальной поляризацией наличие кроссполяризованной составляющей приводит к изменению поляризации с линейной на эллиптическую. При этом изменяются угол наклона годографа β и коэффициент эллиптичности p излученного поля. Угол наклона годографа β оцениваем как отклонение главной оси годографа от вертикальной оси. Угол β меняется в пределах $1.5^\circ \dots 5^\circ$. При этом $p = 0.05 \dots 0.12$ во всем диапазоне сканирования передающей АР. При излучении импульсов с горизонтальной линейной поляризацией величина p не превышает 0.05 , а β не более 1.5° .

Диаграммы направленности передающей АР при излучении импульсов с линейной вертикальной поляризацией для разных углов сканирования θ_c показаны на рис. 5а. Диаграммы направленности измеряли по пиковой напряженности поля E_{Π} и нормировали на значение в максимуме при $\theta_c = -6^\circ$. В качестве сенсора электромагнит-

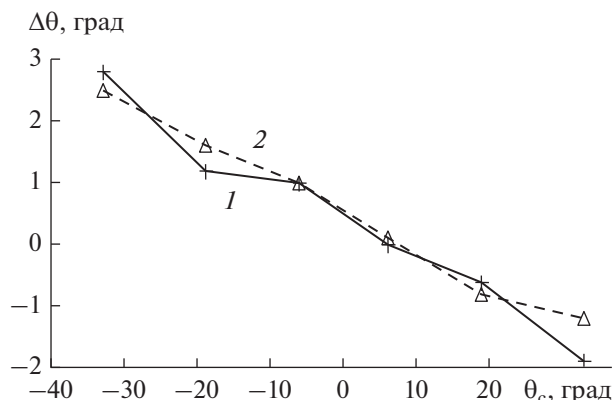


Рис. 6. Зависимость разности измеренных и заданных углов максимумов диаграмм направленности от угла сканирования для вертикальной (кривая 1) и горизонтальной (кривая 2) поляризаций излучения.

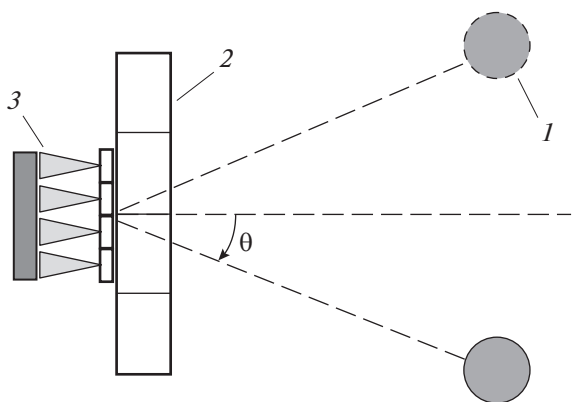


Рис. 7. Схема эксперимента: 1 — объект, 2 — стена, 3 — приемопередатчик.

ного поля при измерении ДН использовали аналогичную одиночную КА. На рис. 5б приведены ДН решетки при излучении горизонтально поляризованного поля. При сканировании значение E_n в максимуме ДН изменяется в соответствии с ДН одиночной антенны. Разность измеренных и заданных углов максимума ДН показана на рис. 6 для вертикальной (кривая 1) и горизонтальной (кривая 2) поляризаций излучения. При ширине ДН $18^\circ \dots 20^\circ$ отклонение от заданных углов не превышает 3° .

2. ЗОНДИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЗА СТЕНОЙ

Проведено тестовое зондирование объектов импульсами с различной поляризацией излучения при наличии диэлектрической преграды между приемопередатчиком и объектом. На рис. 7 показана схема эксперимента (вид сверху). Объектами 1 эксперимента были металлический цилиндр

диаметром 290 и высотой 700 мм и человек. Объекты находились на расстоянии 1.8 м от приемопередатчика в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Объекты перемещались в угловом диапазоне $-33^\circ \dots +33^\circ$ относительно нормали к приемопередатчику в горизонтальной плоскости. В качестве препятствия была использована стена 2 из пенобетона толщиной 250 мм.

Перед проведением эксперимента измерили диэлектрическую проницаемость преграды. По изменению времени задержки распространения импульса от передающей до приемной антенны при отсутствии и наличии стены оценили ее относительную диэлектрическую проницаемость, $\epsilon = 2$. Приемопередатчик 3 придвинули вплотную к стене. Импульсы на выходе приемной АР получили в режиме сканирования диаграмм направленности передающей и приемной решеток при помощи цифрового стробоскопического осциллографа с частотной полосой 12 ГГц. Для уменьшения влияния шумов применяли автоматическое усреднение по 40 измерениям.

Осциллограмма отраженного от металлического объекта импульса приведена на рис. 8. Прямое излучение из передающей АР в приемную не позволяет регистрировать только рассеянный объектом импульс. Поэтому сигнал (кривая 3) получали как разность сигналов без объекта (кривая 2) и с объектом (кривая 1) за стеной. Дальнейшая работа будет направлена на устранение данного недостатка за счет отключения приемной АР в момент излучения импульса передающей АР. Временная зависимость отраженного от металлического цилиндра поля близка к производной от излученного импульса. Импульс, рассеянный человеком, представлен на рис. 9. Временная зависимость отраженного поля существенно отличается от падающего на человека импульса. Это обусловлено более сложной формой объекта, поскольку человек содержит несколько отражающих поверхностей, которые вносят свой вклад в результирующий отраженный сигнал.

По набору отраженных от объекта сигналов построили зависимость амплитуды отраженного импульса от углового положения максимума ДН приемной АР (рис. 10). Для примера приведен случай, когда металлический цилиндр располагали вертикально за стеной в положении 26° относительно нормали к приемопередатчику при излучении и регистрации компонент полей вертикальной (кривая 1) и горизонтальной (кривая 2) поляризаций. Измеренные данные (точки на графике) аппроксимировали сплайном (кривые на графике) для более точного определения местоположения объекта. В случае эллиптической поляризации излучения регистрировали одновременно две ортогональные компоненты вектора

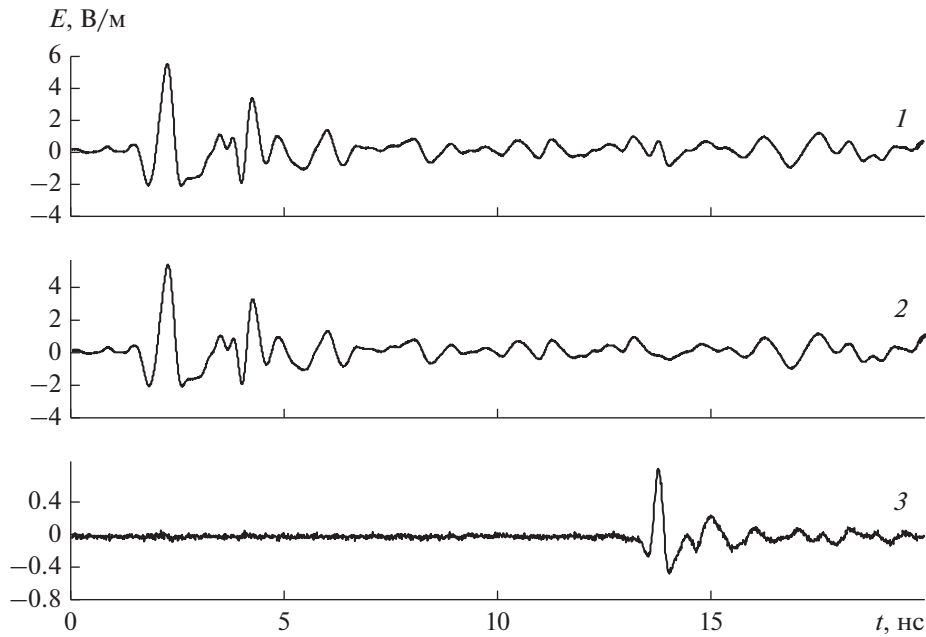


Рис. 8. Осциллограммы зарегистрированных импульсов с объектом (кривая 1), без объекта за стеной (кривая 2) и разностный импульс (кривая 3).

напряженности рассеянного электрического поля. Здесь и далее в экспериментах использовали излучение с эллиптической поляризацией правого вращения. Амплитуду рассеянного импульса E_{π} находили из максимального отклонения годографа.

По измеренным данным получили зависимости ошибки оценки угла прихода отраженного импульса от заданного углового положения $\Delta\theta$ металлического цилиндра (рис. 11). Как видно из анализа зависимостей, ошибка не превышает 5° для вертикальной (кривая 1), горизонтальной (кривая 2) и эллиптической (кривая 3) поляризаций излучения в диапазоне углов сканирования $-33^\circ \dots +33^\circ$ при ширине ДН приемной АР $32^\circ \dots 46^\circ$. Для человека, стоящего за стеной, ошибка оценки угла прихода $\Delta\theta$ не превышает 23° (рис. 12). Че-

ловека, так же как и металлический объект, облучали импульсами с вертикальной (кривая 1), горизонтальной (кривая 2) и эллиптической (кривая 3) поляризациями. Увеличение ошибки обусловлено более сложной структурой рассеянного человеком поля.

При исследовании ПС рассеянного поля в качестве объекта использовали другой металлический цилиндр диаметром 115 и высотой 600 мм. Его располагали за стеной на расстоянии 1.8 м от приемопередатчика в плоскости, перпендикуляр-

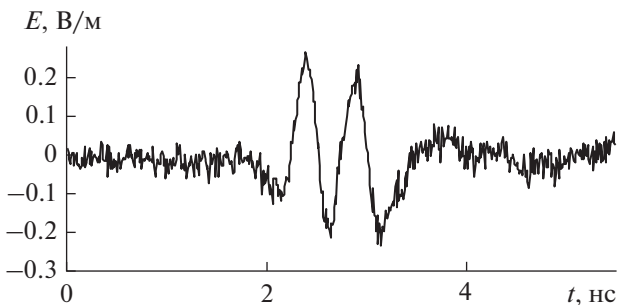


Рис. 9. Осциллограмма отраженного от человека импульса.

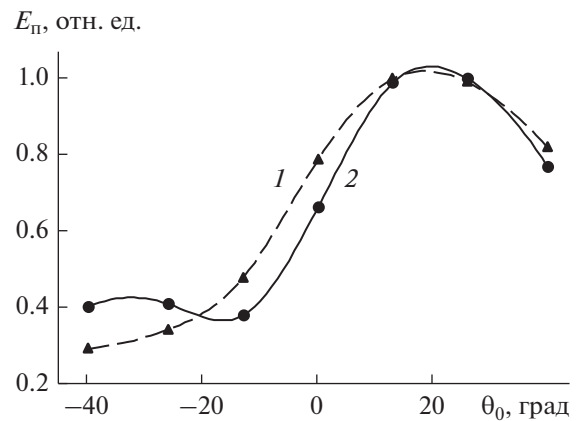


Рис. 10. Зависимость амплитуды отраженного сигнала от углового положения максимума диаграммы направленности приемной антенной решетки при облучении объекта импульсами с вертикальной (кривая 1) и горизонтальной (кривая 2) поляризациями.

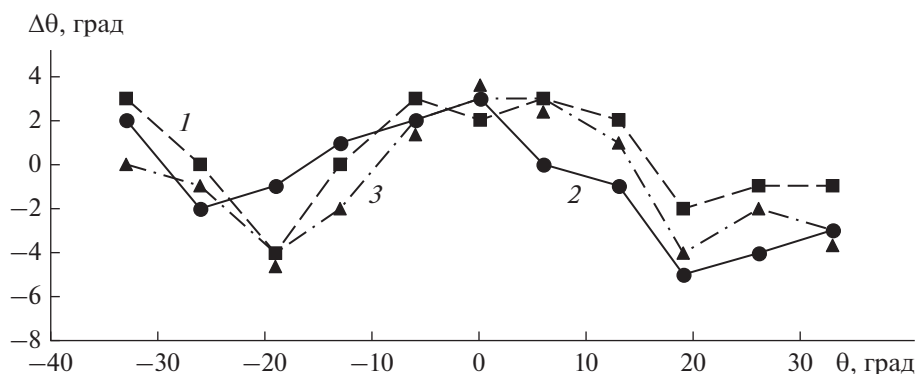


Рис. 11. Ошибка оценки угла прихода отраженного импульса от металлического цилиндра диаметром 290 мм по отношению к заданному угловому положению объекта для вертикальной (кривая 1), горизонтальной (кривая 2) и эллиптической (кривая 3) поляризаций излучения.

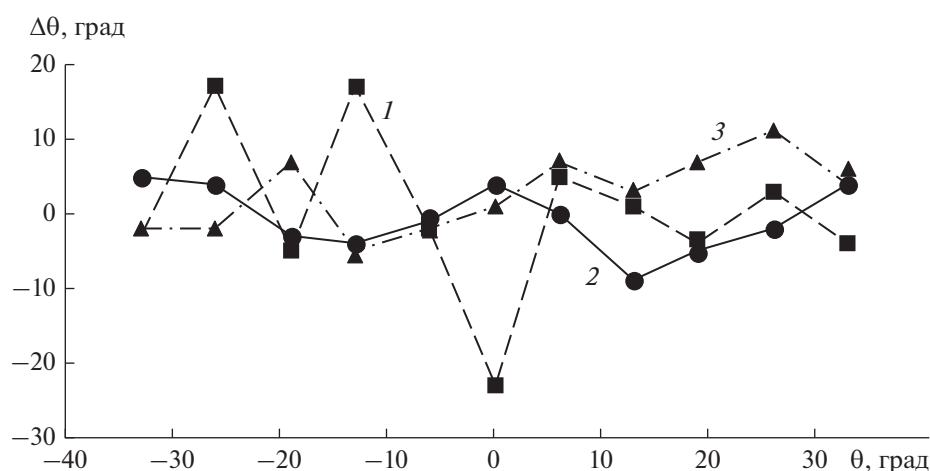


Рис. 12. Ошибка оценки угла прихода отраженного от человека импульса по отношению к заданному угловому положению объекта для вертикальной (кривая 1), горизонтальной (кривая 2) и эллиптической (кривая 3) поляризаций излучения.

ной направлению распространения волны, и устанавливали (наклоняли) в этой плоскости на углы $\alpha = 0$ и $\alpha = 30^\circ$. Вертикальное положение объекта соответствует $\alpha = 0$.

В качестве примера на рис. 13 представлены годографы отраженного от объекта поля при положении объекта за стеной $\theta = -19^\circ$ и углах $\alpha = 0$ (а) и 30° (б). Использовали импульсы излучения с вертикальной линейной поляризацией. Регистрировали одновременно две составляющие вектора напряженности электрического поля. При облучении объекта импульсами с вертикальной поляризацией отраженный сигнал меняет полярность, что означает изменение направления вращения годографа. При $\alpha = 0$ отклонение годографа от линейного было незначительным, поскольку в отраженном поле кроссполяризованная компонента поля мала. При $\theta_c = -19^\circ$ угол β годографа излученного поля составляет -2.5° ,

при этом $p = 0.09$. При отражении от объекта угол $\beta = 4^\circ$, величина $p = 0.13$. При наклоне объекта на угол $\alpha = 30^\circ$ наблюдали изменение угла наклона годографа, связанное с увеличением кроссполяризованной компоненты в рассеянном поле. В рассеянном поле угол $\beta = 18^\circ$, величина $p = 0.23$. При отклонении объекта в сторону отрицательных углов α кроссполяризованная компонента поля меняет полярность, что приводит к отклонению годографа в сторону отрицательных углов β . Отметим, что при использовании объектов с поперечными размерами, превышающими пространственную протяженность зондирующего импульса, определяемую как произведение длительности импульса на скорость света, их поворот на угол α не приводит к изменению угла β годографа.

Примеры годографов отраженного поля при зондировании импульсами с эллиптической по-

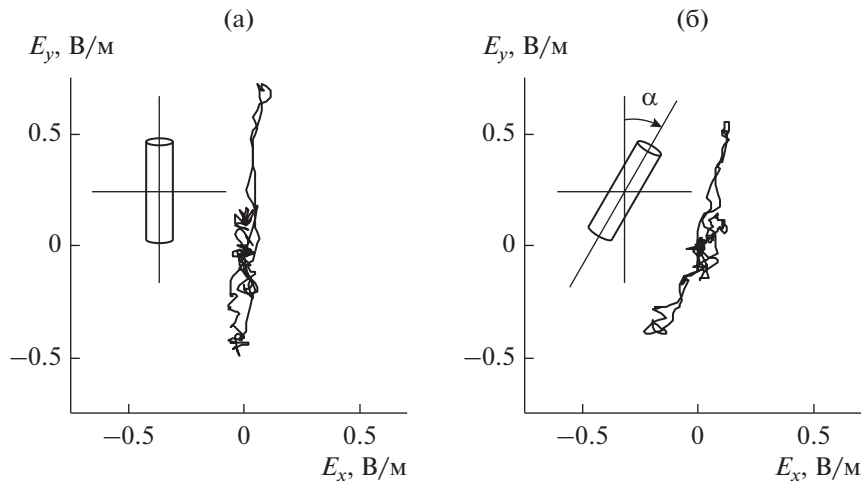


Рис. 13. Годографы отраженного поля от металлического цилиндра диаметром 115 мм при зондировании импульсами с линейной вертикальной поляризацией излучения для углов наклона объекта 0° (а) и 30° (б).

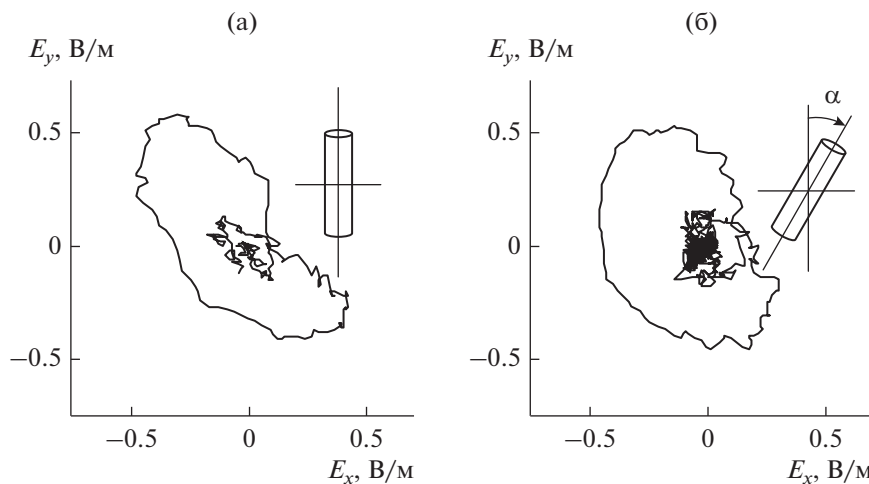


Рис. 14. Годографы отраженного поля от металлического цилиндра диаметром 115 мм при зондировании импульсами с эллиптической поляризацией излучения для углов наклона объекта 0° (а) и 30° (б).

ляризацией показаны на рис. 14. Объект также располагали на $\theta = -19^\circ$ и устанавливали на углы $\alpha = 0$ (а) и 30° (б). Вертикальная составляющая поля меняет полярность при отражении. Наблюдали изменение годографа. При $\theta_c = -19^\circ$ величина p излученного импульса составляет 0.53, при этом угол $\beta = 47^\circ$. В отраженном импульсе при $\alpha = 0^\circ$ угол $\beta = -39^\circ$, величина $p = 0.43$. При наклоне объекта на угол $\alpha = 30^\circ$ значение p увеличивается и составляет 0.65, при этом угол $\beta = -25^\circ$. Возрастание p обусловлено увеличением кроссполяризованной компоненты в отраженном поле.

Поляризационная структура поля, рассеянного человеком, показана на рис. 15. Человек стоит за стеной на расстоянии 2 м от приемопередатчи-

ка. В качестве примера приведены годографы отраженного поля при расположении человека на $\theta = 6^\circ$ и зондировании импульсами с линейной вертикальной (а) и эллиптической (б) поляризациями излучения. При отражении от человека вертикальная компонента поля меняет полярность. В излученном импульсе с вертикальной линейной поляризацией для $\theta_c = 6^\circ$ угол $\beta = -1.5^\circ$ и величина $p = 0.06$. При отражении импульса излучения от человека угол $\beta = -2^\circ$ и величина $p = 0.24$. При зондировании человека импульсами с эллиптической поляризацией для $\theta_c = 6^\circ$ угол $\beta = 53^\circ$ и величина $p = 0.49$. В отраженном поле угол $\beta = -51^\circ$ и величина $p = 0.48$. В отраженном от человека поле амплитуда кроссполяризованной

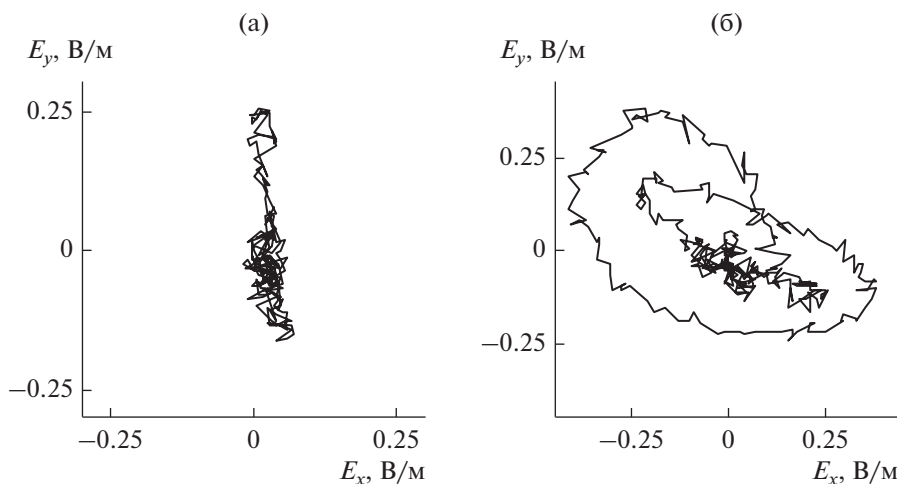


Рис. 15. Годографы отраженного от человека поля при зондировании импульсами с линейной вертикальной (а) и эллиптической (б) поляризациями излучения.

компоненты мала. Изменение угла β годографа в отраженном поле по сравнению с падающим обусловлено изменением полярности вертикальной компоненты поля излучения. При этом величина ρ существенно не изменяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана приемопередающая система импульсного СШП-радар, предназначенного для обнаружения объектов за радиопрозрачным препятствием и исследования ПС рассеянного импульсного электромагнитного поля. Создана передающая антенная решетка с дискретным сканированием в горизонтальной плоскости в диапазоне углов $\pm 33^\circ$. Отклонение измеренных от заданных углов максимумов ДН не превышает 3° при ширине ДН $18^\circ \dots 20^\circ$. Излучение с эллиптической поляризацией поля получено за счет внесения временного сдвига в канал одной из передающих линейных АР. Коэффициент эллиптичности меняется в пределах $0.49 \dots 0.56$.

Проведено тестовое зондирование объектов импульсами с различной поляризацией излучения при наличии стены между приемопередатчиком и объектами. В случае металлического объекта ошибка оценки угла прихода отраженного импульса по отношению к заданному угловому положению объекта не превышает 5° для всех используемых поляризаций излучения в диапазоне углов сканирования $-33^\circ \dots +33^\circ$. При зондировании человека за стеной ошибка оценки угла прихода возрастает до 23° , что обусловлено сложной структурой рассеянного человеком поля.

Исследована ПС отраженных от металлического цилиндра и человека импульсов. При отражении импульсов от объектов меняется направление

вращения годографа, что связано с изменением полярности вертикальной компоненты рассеянного поля. При наклоне металлического объекта в плоскости, перпендикулярной направлению распространения электромагнитной волны, в отраженном поле наблюдается кроссполяризованная компонента, которая приводит к изменению угла наклона годографа и коэффициента эллиптичности отраженного импульса. Это указывает на возможность получения дополнительной информации об объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Through-the-Wall Radar Imaging / Ed. M.G. Amin. Boca Raton: CRC Press, 2011.
2. Hunt A.R. // Proc. of SPIE. 2004. V. 5403. Pt 2. P. 590. doi 10.1117/12.542718
3. Muqaiabel A., Safaai-Jazi A., Bayram A. et al. // IEE Proc.-Microw. Antennas Propag. 2005. V. 152. № 6. P. 581. doi 10.1049/ip-map:20050092
4. Nezirovi A., Yarovoy A.G., Lighthart L.P. // IEEE Trans. 2010. V. GRS-48. № 4. P. 2005. doi 10.1109/TGRS.2010.2044002
5. Gennarelli G., Vivone G., Braca P. et al. // IEEE Trans. 2015. V. GRS-53. № 12. P. 6482. doi 10.1109/TGRS.2015.2441957
6. Shipilov S.E., Satarov R.N., Fedyanin I.S. et al. // MATEC Web of Conf. 2016. V. 79. P. 1079. doi 10.1051/mateconf/20167901079
7. Lv H., Li W., Li Z. et al. // IEEE Trans. 2014. V. GRS-52. № 11. P. 7195. doi 10.1109/TGRS.2014.2309141
8. Ahmad F., Amin M.G. // IEEE Trans. 2013. V. GRS-51. № 2. P. 881. doi 10.1109/TGRS.2012.2203310
9. Shipilov S.E., Satarov R.N., Yakubov V.P. et al. // Opt. Quant. Electron. 2017. V. 49. № 3. P. 339. doi 10.1007/s11082-017-1172-7

10. *Koshelev V.I., Balzovsky E.V., Vyayanov Yu.I., Konkov P.A.* // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7 / Ed. F. Sabath et al. 2007. P. 707. doi 10.1007/978-0-387-37731-5
11. *Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // РЭ. 2010. Т. 55. № 2. С. 182. doi 10.1134/S1064226910020087
12. *Некрасов Э.С., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // Сб. трудов. X Всеросс. конф. “Радиолокация и радиосвязь”. Москва, 21–23 ноября 2016. С. 214.
13. *Koshelev V.I., Vyayanov Yu.I., Andreev Yu.A. et al.* // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. 2001. V. 2. P. 1661. doi 10.1109/PPPS.2001.1001887
14. *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 5. С. 585.
15. *Koshelev V.I., Vyayanov Yu.I., Belichenko V.P.* Ultrawideband Short-Pulse Radio Systems. Boston; London: Artech House, 2017.
16. *Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 7. С. 796. doi 10.1134/S1064226911070023
17. *Balzovsky E.V., Vyayanov Yu.I., Koshelev V.I., Nekrasov E.S.* // Rev. Sci. Instr. 2016. V. 87. № 3. P. 034703. doi 10.1063/1.4942250
18. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др.* // ПТЭ. 2011. Т. 54. № 1. С. 77. doi 10.1134/S0020441211010052