

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 621.396.969.25

В. Г. Сугак, А. В. Букин, Е. М. Васильева, О. А. Овчинкин, Ю. А. Педенко,
Ю. С. Силаев, Е. В. Тарнавский, В. Н. Бормотов, А. В. Сугак

РАДИОЛОКАТОР СО СТУПЕНЧАТЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: sugak@ire.kharkov.ua

Описан радиолокатор подповерхностного зондирования со ступенчатым изменением несущей частоты, предназначенный для обнаружения и идентификации небольших подповерхностных объектов. Для этого использована гомодинная архитектура с широкополосным демодулятором для измерения квадратурных составляющих сигналов. Отличительной особенностью радиолокатора является использование щелевой магнитной антенны, в которой реализована возможность электронно переключать поляризацию излучения и приема для измерения кросс-поляризованных компонент отраженных сигналов без изменения фазового центра антенны. Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: радиолокатор подповерхностного зондирования, ступенчатое изменение частоты, поляризация.

В современных технологиях применения подповерхностной радиолокации наблюдаются тенденции расширения спектра возможностей георадаров, направленные прежде всего на улучшение качества интерпретации результатов зондирования. Это касается, в первую очередь, возможности идентификации сравнительно небольших объектов как искусственного, так и естественного происхождения, находящихся под поверхностью. Для этого необходимо увеличивать количество информационных признаков объектов, извлекаемых из радиолокационных сигналов.

Более широкими возможностями в этом плане по сравнению с импульсными георадарами обладают георадары непрерывного излучения со ступенчато-изменяемой частотой – *SFCW GPR* (*Stepped Frequency Continued Wave Ground Penetrating Radar*) [1]. С их помощью, в частности, можно исследовать фазовую структуру сигналов, отраженных объектами. Особенности этой структуры, как показано нами ранее [2], позволяют судить о физических свойствах подповерхностных объектов.

Фазовую структуру можно получить путем измерения квадратурных компонент принятых радиолокационных сигналов. Сравнительно медленное изменение несущей частоты зондирующего сигнала позволяет оценивать частотные зависимости фазовой скорости распространения радиоволн в подповерхностном пространстве и их погонного затухания. Это является основой синтеза алгоритмов реконструкции электрических характеристик слоев грунта и отдельных объектов [3].

Важным информационным признаком для распознавания объектов могут служить поляризационные отличия радиолокационных отражений

на двух взаимно ортогональных поляризациях излучения и приема сигналов. В данном случае основной проблемой является разработка антенной системы, способной эффективно излучать и принимать отраженные подповерхностными объектами сигналы на двух ортогональных поляризациях с неизменным фазовым центром антенн.

Согласно принятой в мировой литературе классификации [1, 4] существуют три структурные схемы построения *SFCW GPR*: гомодинная, гетеродинная и супергетеродинная. Например, в гетеродинной схеме применяется дополнительный следящий синтезатор частот, с помощью которого принимаемый сигнал переносится на фиксированную промежуточную частоту с последующей демодуляцией сигнала уже на этой частоте.

В нашем случае была выбрана гомодинная схема, в которой квадратурные составляющие принимаемого сигнала получаются путем прямой демодуляции при использовании части излучаемого сигнала в качестве опорного. Эта схема позволила значительно упростить архитектуру георадара, исключив возникновение дополнительных комбинационных составляющих, присущих гетеродинной и супергетеродинной схемам и искажающих результаты зондирования.

Проблема более интенсивных по сравнению с гетеродинной схемой помех, обусловленных низкочастотными фликкер-шумами, решалась нами путем выбора соответствующего времени накопления принимаемых сигналов.

Преодоление другого недостатка гомодинной схемы, связанного с повышенными требованиями к чистоте спектра зондирующего сигнала, решалось за счет использования специальных схемных решений, о чем будет сказано далее.

1. Структурная схема SFCW GPR. Разработанный нами SFCW GPR предназначен для обнаружения и распознавания малогабаритных

объектов в диапазоне частот 500...900 МГц на глубинах до нескольких метров. Его схема представлена на рис. 1.

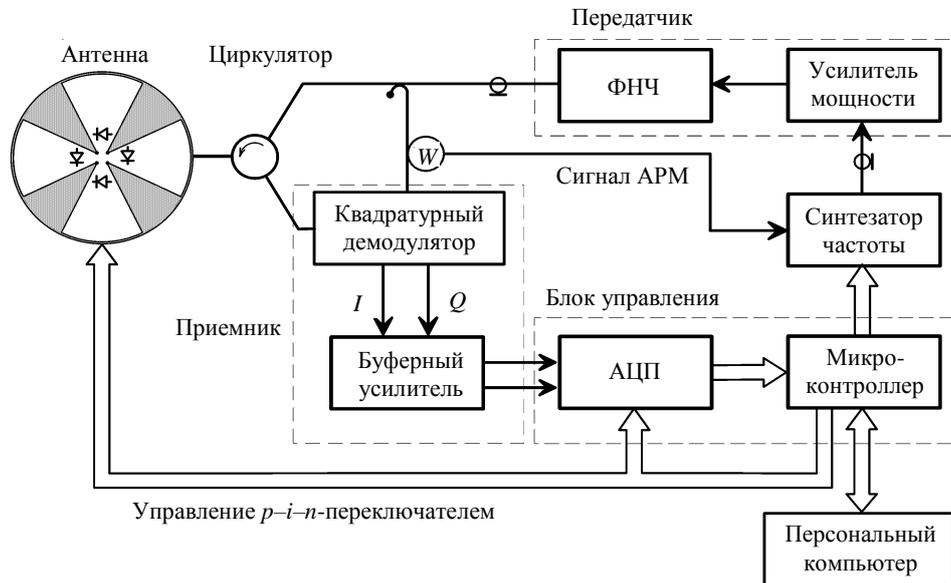


Рис. 1. Блок-схема георадара со ступенчатым изменением частоты

Георадар содержит два канала: передающий и приемный, разделенные между собой широкополосным циркулятором.

В состав георадара входят следующие элементы: антенна, содержащая переключатель поляризации; циркулятор; ответвитель опорного сигнала; усилитель мощности, к выходу которого подключен фильтр низких частот (ФНЧ); синтезатор частоты, выполняющий также функцию автоматической регулировки мощности (АРМ); приемник и блок управления, содержащий аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Выделение синусной и косинусной составляющих принимаемого сигнала (соответственно I и Q) осуществляется на несущей частоте с помощью квадратурного демодулятора. В качестве опорного используется часть излучаемого сигнала, что позволяет выполнять сравнение принимаемого сигнала с сигналом, фазовые характеристики которого аналогичны характеристикам излучаемого сигнала.

Сигнал передатчика заданной частоты формируется с помощью синтезатора на основе кольца фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Зависимость частоты излучаемого сигнала от времени на протяжении одного периода измерений показана на рис. 2. Каждый период зондирующего сигнала состоит из двух частей: в первой частота ступенчато возрастает, а во второй – снижается до начального значения. Такое решение позволяет уменьшить ошибки измерения, возникающие при работе с малыми периодами,

при которых время перехода с текущей частоты на следующую, обусловленное характеристиками системы ФАПЧ, соизмеримо или несколько меньше длительности ступеньки. Так как ошибки установки частоты на восходящей и нисходящей ветви имеют противоположные знаки, усреднение результатов измерений по двум ветвям в основном решает данную проблему.

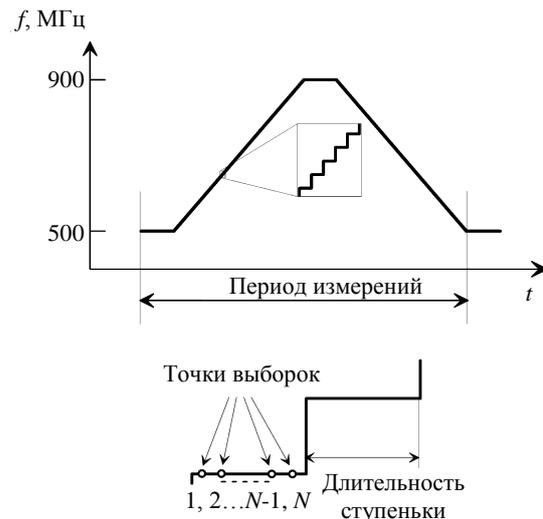


Рис. 2. Зависимость частоты излучаемого сигнала от времени

На каждой частотной ступеньке выбирается серия, состоящая из N синхронных независимых отсчетов I и Q , и их преобразование в

цифровую форму. В результате выполнения цикла, состоящего из M периодов измерений, для каждой ступеньки получаем $K = 2MN$ пар выборок. M и N могут принимать практически любые значения от 1 и выше. При дальнейшей обработке осуществляется усреднение выборок сигнала, что эквивалентно сужению полосы приема и повышению отношения сигнал-шум приемника. Увеличивая M и N , можно получить требуемое значение этого отношения.

Рассмотрим блоки, входящие в состав георадара, подробнее.

2. Синтезатор частоты. Синтезатор частоты выполнен по стандартной схеме с использованием кольца ФАПЧ. В его состав входит микросхема MC145193, с помощью которой вырабатывается сигнал управления, определяющий частоту генерации внешнего гетеродина в диапазоне 500...900 МГц.

Синтезатор имеет две особенности. Первая из них обусловлена требованием широкодиапазонности перестройки по частоте. Эта задача решена путем использования управляемого генератора, выполненного по схеме Колпица. При этом индуктивная ветвь колебательного контура составлена из последовательно соединенных индуктивностей и двух встречно включенных варакторов. Полное включение варакторов в колебательный контур увеличивает фазовые шумы, однако обеспечивает коэффициент перестройки по частоте, почти равный двум.

Второй особенностью синтезатора является то, что с целью подавления гармоник генерируемого сигнала, что особенно важно на нижнем участке диапазона работы георадара, в его состав включен электронно перестраиваемый ФНЧ. Для его перестройки используется тот же сигнал, что и для управления частотой гетеродина. Это позволяет изменять верхнюю границу ФНЧ синхронно с частотой гетеродина.

В блоке синтезатора частоты размещен и электронно управляемый аттенуатор, входящий в систему АРМ.

Время перехода со ступеньки на ступеньку, обусловленное длительностью переходных процессов, не превышает 2 мс.

3. Усилитель мощности. Сигнал с выхода синтезатора частоты подается на усилитель мощности, состоящий из предварительного и основного усилителя мощности. Предварительный усилитель реализован с использованием микросхемы AN31, имеющей повышенный динамический диапазон и уровень шумов ниже 1,9 дБ. Его усиление составляет не менее 10 дБ.

Основной усилитель мощности радиочастоты имеет 4 каскада усиления, работающих в классе «А», что обеспечивает удовлетворительную линейность во всем рабочем диапазоне ча-

стот. Усилитель выполнен на кремниевых транзисторах типа КТ939 и КТ948, коэффициент усиления составляет не менее 20 дБ при выходной мощности 1,8 Вт.

Для подавления гармоник выходного сигнала усилителя мощности на его выходе установлен ФНЧ типа Чебышева седьмого порядка с частотой среза 920 МГц. За счет него подавление 3-й гармоники составило не менее 40 дБ.

4. Блок управления. Устройство содержит двухканальный высокоскоростной 16-битный АЦП и узел управления на RISK-микроконтроллере с быстродействием 15 Мб/с.

Основное назначение блока состоит в управлении потоками данных при выполнении работ с помощью георадара. В соответствии с этим блок преобразует данные из аналоговой в цифровую форму, сохраняет выборки данных, передает их на компьютер и принимает команды от этого компьютера на управление радиочастотными узлами.

Прецизионный двухканальный АЦП работает в непосредственном взаимодействии с блоком управления. Прием и одновременное преобразование в цифровую форму синусной и косинусной составляющих принимаемого сигнала осуществляется по синхроимпульсам. Пара дифференциальных входных/выходных буферных усилителей обеспечивает эффективное подавление шумов и уменьшает гармонические искажения.

Применение оптической развязки уменьшает влияние импульсных помех блока управления на другие узлы локатора. Блок управления разработан на основе RISC-микроконтроллера с архитектурой типа *Harvard*, который обеспечивает широкий диапазон интерфейсов, имеет программируемую память для хранения команд управления и текущих установок, обеспечивающих заданный режим работы георадара. Блок управления содержит также память типа SRAM для накопления данных и интерфейс типа RS-232 для связи с компьютером. Как сказано ранее, блок управления вырабатывает импульсы синхронизации для АЦП, а также накапливает данные, получаемые при работе георадара, и передает их в компьютер по завершении измерения. Коды установок, характеризующие режим работы георадара, и программа управления, хранящиеся в памяти микроконтроллера, могут быть изменены с помощью центрального компьютера.

5. Приемное устройство. Благодаря выбору гомодинной схемы, а также исключению входного усилителя высокой частоты, приемное устройство оказалось относительно простым. В его состав входит широкополосный квадратурный демодулятор, подключенный к антенне через циркулятор, низкочастотный усилитель и ФНЧ.

Чтобы обеспечить большой динамический диапазон входных сигналов, предотвратить перегрузку приемника мощными сигналами от поверхности раздела и обеспечить работу в широкой полосе частот, был использован отвечающий этим требованиям квадратурный демодулятор, выполненный на микросхеме типа *HMC597LP4*. Он предназначен для работы в диапазоне частот 100...4000 МГц, допускает мощность входного сигнала не менее 12 дБм. Коэффициент преобразования сигналов в демодуляторе – не менее –3,5 дБ, развязка между сигналом и гетеродином превышает 65 дБ.

С дифференциальных выходов микросхемы полученные квадратурные составляющие принятого отраженного сигнала поступают на входы малошумящих инструментальных операционных усилителей. Общий коэффициент усиления приемника – не менее пяти. Полоса пропускания приемника – 0...10 кГц.

6. Антенная система. Одной из основных проблем при использовании квазинепрерывного зондирующего сигнала является подавление прямого просачивания излучаемого сигнала в тракт приемника, который может приводить к насыщению приемника. Это ограничивает мощность излучения и, как следствие, уменьшает глубину зондирования. Для решения этой проблемы существует несколько путей:

- применяют отдельные, разнесенные в пространстве антенны для излучения и приема отраженных сигналов;
- используют широкополосный циркулятор, который позволяет разделить сигналы излучения и приема.

В первом случае излучаемый сигнал и сигналы, отраженные подповерхностными объектами, проходят разные пути, и это не позволит получить достаточную поляризационную селекцию объектов в случае применения антенны с переключаемой поляризацией. Циркулятор же позволяет применять одну и ту же антенну на прием и передачу с неизменным положением фазового центра антенны.

Для осуществления поляризационной селекции объектов мы использовали разработанную нами магнитную щелевую антенну, которая позволяет излучать и принимать сигналы на ортогональных поляризациях. При этом фазовые центры антенн совмещены, что исключает появление дополнительных фазовых искажений сигналов за счет разных путей распространения радиоволн. Развязка между этими двумя каналами составляет более 25 дБ.

Конструктивно антенна выполнена в виде металлического резонатора, в плоскости которого, обращенной к поверхности земли, прорезаны две щели, образованные четырьмя лепестками и

поверхностью резонатора. Конфигурация этих щелей схематично показана на рис. 3.

Лепестки антенны 1–4 расположены на нижней поверхности антенны. Попарное соединение лепестков 1-го со 2-м и 3-го с 4-м в местах, помеченных точками, образует излучающую щель 6–8. Аналогично, соединение лепестков 1-го с 4-м и 2-го с 3-м образует перпендикулярную щели 6–8. Резонатор антенны образован верхним экранирующим коробом круговой цилиндрической формы 9.

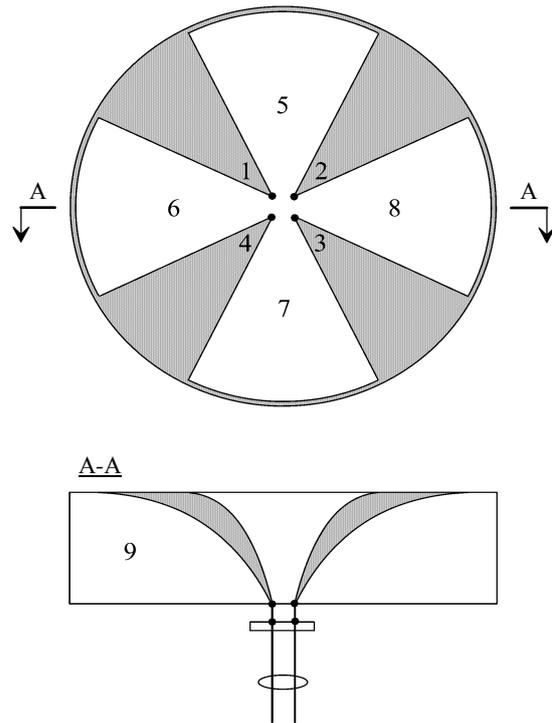


Рис. 3. Щелевая магнитная антенна с электронным переключением поляризации излучения приема

Антенная система работает следующим образом. Внешнее переключающее устройство, реализованное на *p-i-n*-диодах, поочередно замыкает лепестки в сочетаниях, описанных выше. Управление переключающим устройством осуществляется сигналами, поступающими из блока управления.

Выходной фидер радиолокатора постоянно подсоединен к лепесткам 2 и 4. Отраженный от лоцируемого объекта сигнал поступает в приемное устройство и далее в блок цифровой обработки. Таким образом осуществляется измерение кросс-поляризационных составляющих отраженного сигнала без механического поворота антенны и без изменения пространственного положения ее фазового центра.

На рис. 4 представлена фотография антенны в рабочем положении в составе измерительного стенда.

Разработанная антенна с электронным переключением поляризации обеспечивает эффективное излучение и прием, а также, как следует из рис. 5, имеет небольшой коэффициент стоячей волны (КСВ) во всем рабочем диапазоне частот. Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в подповерхностном пространстве составляет около 40° .



Рис. 4. Фотография антенны в рабочем положении при испытаниях на лабораторном стенде

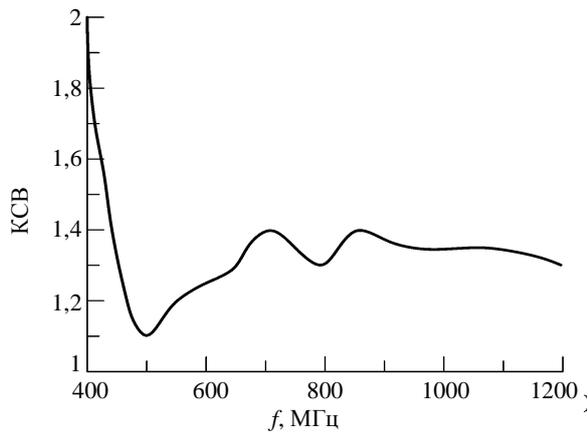


Рис. 5. КСВ антенны

7. Тестирование георадара. Для оценки динамического диапазона георадара выход широкополосного линейного усилителя через аттенюатор соединялся с входом приемника через линию задержки, выполненную в виде отрезка коаксиального кабеля. После обработки принятых сигналов была получена автокорреляционная функция, ее максимум приходится на частоту, соответствующую задержке сигнала в кабеле (рис. 6). Кроме основного лепестка, можно наблюдать, в частности, боковой лепесток, обусловленный нелинейными искажениями (главным образом в усилителе мощности) и соответствующий 3-й гармонике зондирующего сигнала. Из рисунка видно, что уровень этого бокового лепестка подавлен не менее чем на 50 дБ, а уровень шумов и помех друго-

го происхождения составляет -80 дБ относительно уровня полезного сигнала.

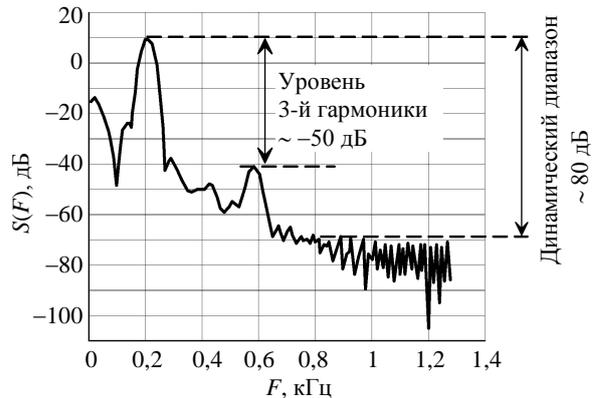


Рис. 6. Автокорреляционная функция зондирующего сигнала

Результаты тестирования показали, что разработанный георадар позволяет обнаруживать подповерхностные объекты в динамическом диапазоне, достигающем 80 дБ. В реальной среде диапазон может быть хуже из-за помеховых отражений, создаваемых неоднородностями грунта.

Ясно также, что 3-я гармоника зондирующего сигнала является источником ложных отражений, искажающих получаемое радиолокационное изображение. Эти искажения будут проявляться в появлении отражений, приходящих с глубин, равных утроенному значению глубин действительных отражателей.

Величина ложных отражений для среды без потерь, как видно из рис. 6, составляет около -50 дБ по отношению к полезному сигналу. Для реальной среды уровень этих отражений может существенно отличаться от указанного под влиянием ряда факторов, в том числе величины погонного затухания сигналов в грунте и ее зависимости от частоты сигнала, а также от глубины залегания лоцируемого объекта.

Испытание георадара проводилось в лабораторных условиях с использованием специально изготовленного стенда. Стенд состоял из короба, наполненного песком, и механической системы для передвижения георадара в двух взаимно перпендикулярных направлениях над поверхностью песка.

В качестве примера на рис. 7 приведены радиолокационные изображения небольшого симметричного объекта (жестяная банка объемом около $0,5 \text{ дм}^3$, помещенная на глубину 40 см), полученные на двух ортогональных поляризациях излучения и приема.

Изображения получены после применения двумерного синтеза апертуры антенны вдоль движения георадара и подавления помеховых отражений от окружающих неоднородностей структуры грунта (песка).

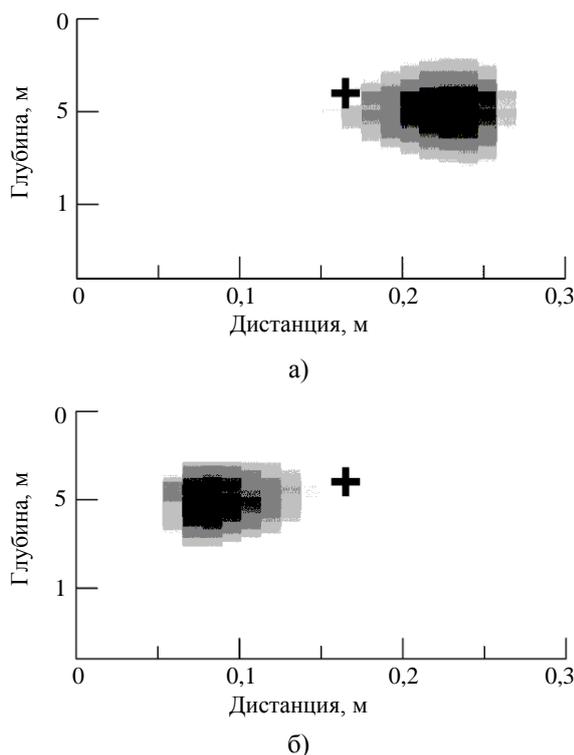


Рис. 7. Радиолокационные изображения небольшого металлического объекта на двух ортогональных поляризациях излучения и приема: а) – вектор поляризации направлен под углом 45° к дистанции; б) – -45° к дистанции; крестиком помечено действительное положение объекта

Видно, что изображения во многом совпадают, что позволяет надеяться на получение приемлемых результатов при поляризационной селекции объектов. Небольшое смещение изображений вдоль дистанции является следствием отклонения диаграмм направленности антенны из-за различия паразитных емкостей поляризационного коммутатора на двух поляризациях антенны и задержек для токов, текущих по дополнительным дорожкам коммутатора. Это налагает повышенные требования к разработке поляризационного коммутатора.

Выводы. Разработан георадар с пошаговым изменением частоты зондирующего сигнала в диапазоне частот 500...900 МГц для обнаружения и идентификации малогабаритных объектов на глубинах до 2–3 метров. В георадаре реализовано измерение квадратурных компонент принятых сигналов, что позволяет получить фазовую структуру сигналов и использовать ее особенности для распознавания этих объектов.

Принципиально новым в георадаре является применение одной приемно-передающей антенны с электронным переключением поляризации на 90° . Это дает возможность излучать и принимать сигналы на ортогональных поляризациях, что существенно расширяет возможности обнаружения и распознавания небольших объектов на фоне-

сигналов, отраженных от границ раздела сред с разными электрическими характеристиками.

1. Noon D. A. Stepped-frequency radar design and signal processing enhances ground penetrating radar performance: Ph. D. dissertation / D. A. Noon; Univ. of Queensland, Australia. – 1996.
2. Сугак В. Г. Применение фазовой структуры сигналов при подповерхностном зондировании для обнаружения и оценки физических свойств объектов и неоднородностей / В. Г. Сугак, А. В. Сугак // 3-й Междунар. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2008): сб. науч. тр. Т. 1. Междунар. конф. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации». Ч. 2. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2008. – С. 192–195.
3. Сугак В. Г. Восстановление электрических характеристик грунта и глубины залегания объектов по результатам подповерхностного зондирования / В. Г. Сугак // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2002. – 7, № 3. – С. 491–497.
4. Iizuka K. Step-frequency radar / K. Iizuka, A. P. Freundorfer, K. H. Wu, H. Mori, H. Ogura, V.-K. Nguyen // J. Appl. Phys. – 1984. – 56, N 9. – P. 2572–2583.

V. G. Sugak, A. V. Bukin, E. M. Vasilyeva,
O. V. Ovchinkin, Yu. A. Pedenko, Yu. S. Silaev,
E. V. Tarnavskiy, V. N. Bormotov, A. V. Sugak

STEPPED FREQUENCY CONTINUANCE WAVE GROUND PENETRATING RADAR (SFCW GPR) INTENDED FOR DETECTING AND RECOGNIZING SMALL BURIED OBJECTS

Stepped Frequency Continuance Wave Ground Penetrating Radar (SFCW GPR) intended for detecting and recognizing small buried objects is described. The homodyne structure of the SFCW GPR in which a wideband demodulator is applied for measuring quadrature signal components. The advantage of the GPR is application of developed slot magnetic antenna that allows the cross polarized components of reflected signals to be measured by using an electronically commutated slots of the antenna.

Key words: ground penetrating radar, stepped frequency continuance wave, polarization.

В. Г. Сугак, О. В. Букін, Є. М. Васильєва,
О. О. Овчинкін, Ю. О. Педенко, Ю. С. Сілаєв,
Є. В. Тарнавський, В. Н. Бормотов, О. В. Сугак

РАДИОЛОКАТОР ЗІ СТУПЕНЕВОЮ ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ПОВЕРХНЕЮ ЗЕМЛІ

Описано радіолокатор підповерхневого зондування зі ступеневою зміною несучої частоти, який призначено для виявлення та ідентифікації малих підповерхневих об'єктів. Для цього застосовано гомодінну архітектуру з широкосмуговим демодулятором для виміру квадратурних складових сигналів. Відмінною особливістю радіолокатора є використання щілинної магнітної антени, у якій реалізовано можливість електронно перемикає поляризацію випромінювання та прийому для виміру кросс-поляризаційних компонент відбитих сигналів без зміни фазового центра антени.

Ключові слова: радіолокатор підповерхневого зондування, ступенева зміна частоти, поляризація.

Рукопись поступила 26.03.10 г.