

МОБИЛЬНЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ И
МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И. Ю. МАЛЕВИЧ, А. С. ЛОПАТЧЕНКО, Т. В. ШУКЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: malevich@bsuir.by

Аннотация. Радиолокационные средства подповерхностного зондирования активно используются при исследовании верхнего слоя земной поверхности при проведении неразрушающего контроля строительных покрытий, выполнении мероприятий по разминированию и обнаружению подземных коммуникаций. В работе приводятся результаты разработки и испытаний мобильного радиолокационного обнаружителя подповерхностных объектов с широкополосным ЛЧМ сигналом зондирования.

Abstract. GPR are actively used in the study of the upper layer of the earth's surface when conducting non-destructive testing of building coatings, carrying out mine clearance activities and detecting underground communications. The paper presents the results of the development and testing of a mobile radar detector of subsurface objects with a broadband FMCW chirp probing signal.

Введение

Радиолокационные обнаружители подповерхностных объектов (РОПО) высоко востребованы для локализации неоднородностей и скрытых дефектов при мониторинге состояния дорожных покрытий, исследовании верхнего слоя земной поверхности при гуманитарном разминировании и выявлении схронов.

Одно из перспективных направлений разработки РОПО с повышенной эффективностью обнаружения приповерхностных и малозаглубленных объектов связано с использованием широкополосных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) зондирующих сигналов (ЗС) [1-4].

Принципы построения ЛЧМ РОПО

Работа таких радаров основана на частотном методе измерения дальности, который заключается в определении частотного сдвига, получаемого путем перемножения в смесителе эхо-сигнала (ЭС), отраженного от заглубленного объекта, с ЛЧМ ЗС (рис.1).

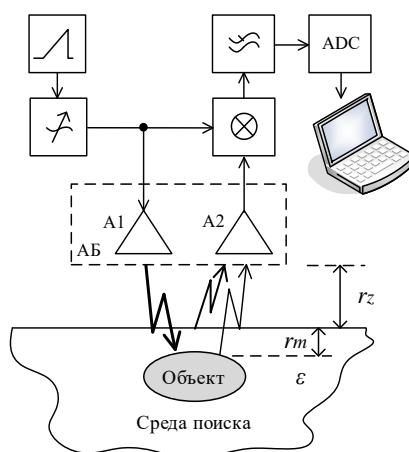


Рис.1 Функциональная схема ЛЧМ РОПО

В результате выделяются частотные компоненты биений (f_{bi}), которые пропорциональны расстоянию до объектов. Фильтр нижних частот на выходе смесителя исключает наложение высокочастотных составляющих на низкочастотную компоненту биений при аналого-цифровом преобразовании.

Очевидно, что классический подход, использующий обработку непрерывных ЭС, при подповерхностном зондировании не позволяет сформировать точный глубинный портрет объекта по причине недостаточной разрешающей способности метода:

$$\Delta L = \frac{c}{2 \cdot \Delta f \sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ – диапазон перестройки генератора, управляемого напряжением (ГУН), по частоте; c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; ε – диэлектрическая проницаемость исследуемой среды.

Одним из перспективных путей решения этой проблемы является излучение и обработка одиночного импульса (чирпа) ЗС [5].

Для практической реализации этой идеи необходимо синхронизировать работу приемо-передающего тракта и анализатора спектра, обеспечив возможность анализа одного чирпа ЭС, как оцифрованной реализации, строго привязанной во временной области к ЗС.

Структура РОПО, позволяющая формировать одиночные ЛЧМ радиоимпульсы и обрабатывать их как квазинепрерывное колебание, представлена на рис. 2 [5].

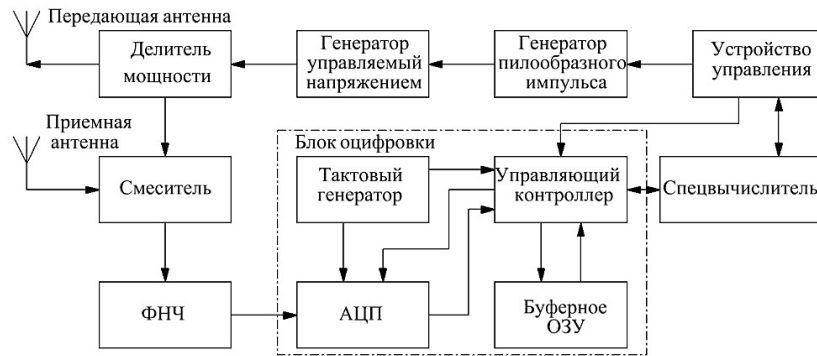


Рис. 2. Структура РОПО с формированием и обработкой сверхширокополосных квазинепрерывных ЛЧМ сигналов

Отличительной особенностью структуры РОПО является наличие генератора пилообразного импульса (ГПИ), синхронизированного с блоком оцифровки.

Здесь, как и в классических системах с непрерывным ЗС, на выходе смесителя образуются частоты биений ($f_{\delta i}$), содержащие информацию о глубине расположения объекта зондирования:

$$f_{\delta i} = \gamma \frac{2(r_z + r_m \sqrt{\varepsilon})}{c}, \quad (1)$$

где $\gamma = \Delta f / T_p$ – скорость перестройки частоты сигнала, формируемого ГУН; T_p – время развертки по частоте; r_z – расстояние между антенным блоком (АБ) и поверхностью среды; r_m – расстояние между поверхностью среды и заглубленным объектом.

Устройство управления задает режим работы РОПО путем формирования импульсов запуска ГПИ и блока оцифровки с требуемым периодом и позволяет задать временное положение окна анализа относительно момента начала генерации ЗС. После прихода синхроимпульса ГПИ формирует один период линейно изменяющегося напряжения, являющегося модулирующим импульсом для ГУН, и в ОЗУ записывается заданное количество отсчетов реализации выходного сигнала смесителя. Тактирование АЦП осуществляется высокостабильным генератором, обеспечивающим фиксированную длительность окна анализа. После заполнения буфера памяти блок оцифровки передает полученную реализацию сигнала на спецвычислитель, где происходит её цифровая обработка с целью формирования глубинного портрета исследуемой среды.

Радиолокационный портрет подповерхностного объекта \mathbf{P} вычисляется классическим коррелограммным методом спектрального оценивания:

$$\mathbf{P}_n = \left| \mathbf{S}_0 \langle n \rangle^T \mathbf{R} \mathbf{S}_0 \langle n \rangle \right|, \quad n = \overline{0, N_a - 1}, \quad (3)$$

где \mathbf{R} – корреляционная матрица, полученная для реализации сигнала разностной частоты; N_a – число элементов сформированного глубинного портрета; \mathbf{S}_0 – матрица опорных частот.

В результате, за счет синхронизации блока оцифровки с передающим трактом, полученные реализации разностных колебаний жестко привязаны к развертке частоты, что позволяет анализировать один чирп ЭС, содержащий полную информацию о глубинном портрете объекта.

С учетом рассмотренных подходов разработаны структура ЛЧМ РОПО (рис. 3).

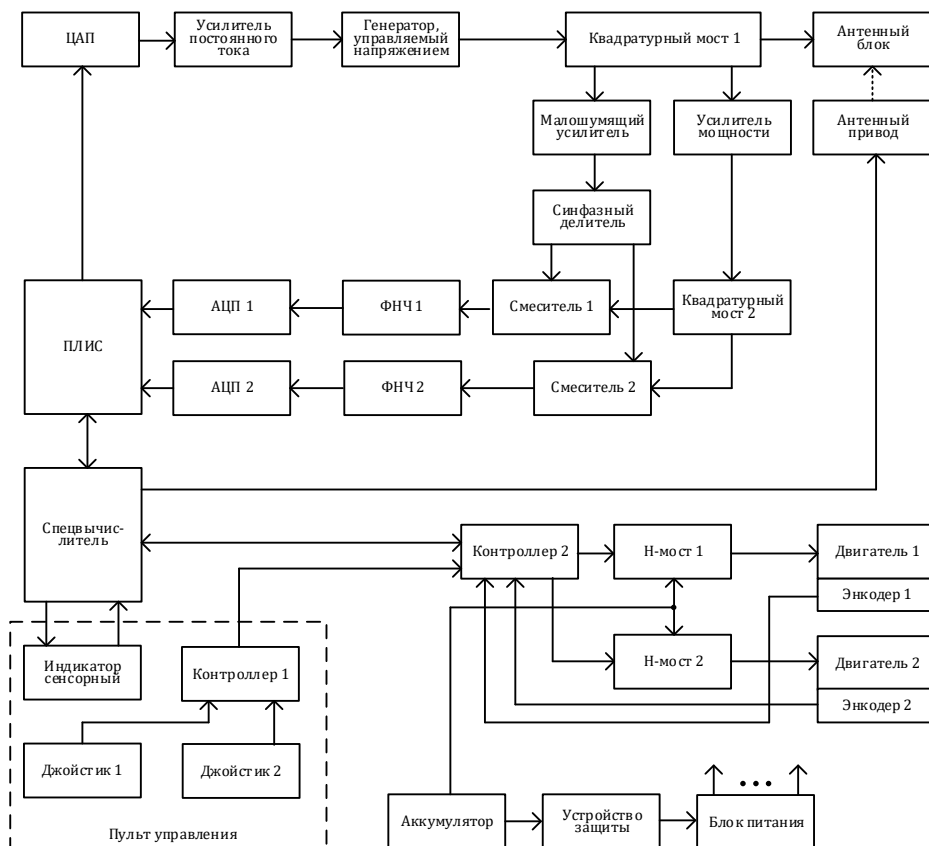


Рис. 3. Структура ЛЧМ РОПО

РОПО формирует в L диапазоне сверхширокополосный ЗС с базой 3000...8000 ед. (рис.4) и обеспечивает гомодинную квадратурную обработку ЭС, которые оцифровываются 14-ти разрядными АЦП с тактовой частотой 125 МГц. Блок оцифровки записывает реализации квадратурных компонент откликов ($I(t)$, $Q(t)$) и передает их в спецвычислитель, выполняющий спектральное оценивание. На основании найденного спектрального портрета спецвычислитель в режиме реального времени выполняет алгоритмы обнаружения и распознавания заглубленного объекта (используя в качестве критерия значения толщины и протяженности) и передает данные на сенсорный индикатор пульта управления прибором.

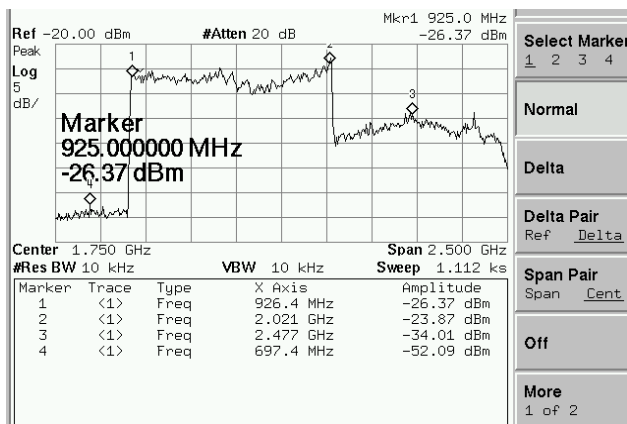


Рис. 4. Зондирующий сигнал ЛЧМ РОПО



Рис. 5. Концепт-макет ЛЧМ РОПО

РОПО выполнен на четырехколесной самоходной платформе с регулируемой по высоте (3, 10 либо 15 см) консолью, на которой перемещается АБ (рис. 5). При поступательном движении платформы

выполняется последовательный радиолокационный обзор верхнего слоя грунта, результаты которого в виде поверхностной проекции нормированной мощности глубинных портретов выводятся на экран сенсорного индикатора пульта управления прибором.

Платформа приводится в движение мотор-редукторами постоянного тока, управление которыми осуществляется ШИМ-контроллером, связанным с джойстиком на пульте дистанционного управления. Плавность управления и поддержание стабильной скорости передвижения достигается за счет организации обратной связи с энкодеров, установленных на осях двигателей.

Несущий корпус платформы и кронштейны консоли выполнены из пластика, что позволяет минимизировать переотражения зондирующего сигнала. Жесткость конструкции платформы обеспечивается внутренними переборками, которые разделяют корпус на отделения.

Питание РОПОНЗ осуществляется от автомобильной аккумуляторной батареи, которая размещается во внутреннем отсеке.

Натурная апробация ЛЧМ РОПО

С целью оценки эффективности работы ЛЧМ РОПО проведена натурная апробация прибора.

При поступательном движении обнаружителя выполняется последовательный радиолокационный обзор верхнего слоя грунта, результаты которого в виде поверхностной проекции нормированной мощности глубинных портретов выводятся на экран монитора (рис.6).

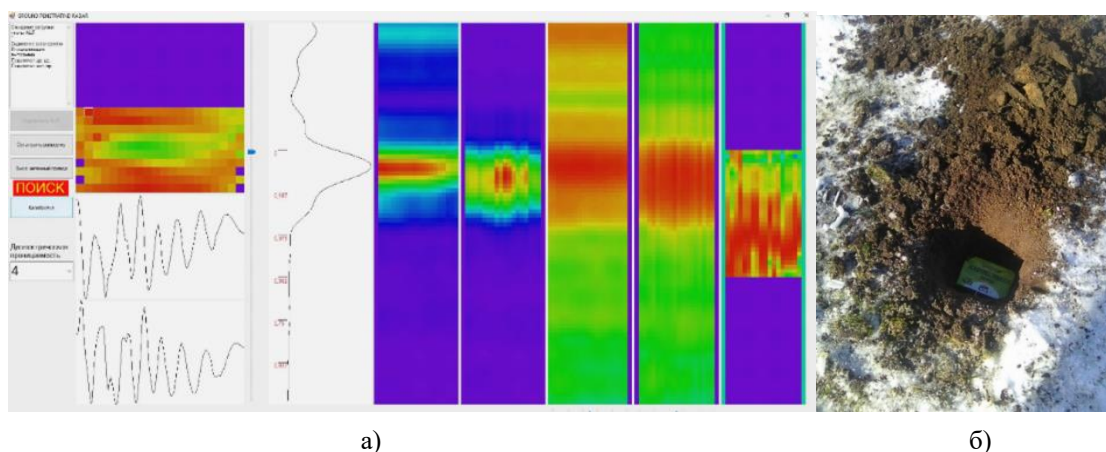


Рис. 6. Общий вид экрана индикатора ЛЧМ РОПО (а)
для диэлектрического объекта (б) объемом 200 см³, заглубленного на 14 см

В целом, проведенные натурные испытания прибора показали хорошую согласованность полученных радиолокационных изображений с физической структурой исследуемой среды и заглубленных объектов, выполненных из диэлектрических и металлических материалов.

Испытания показали высокий потенциал прибора и направления совершенствования отдельных подсистем.

Заключение

Таким образом, разработанный мобильный радиолокационный обнаружитель приповерхностных и малозаглубленных объектов позволяет бесконтактно, поддерживая фиксированную высоту подъема антенного блока над поверхностью, с высокой оперативностью и мобильностью выполнять площадные исследования глубинного портрета грунта при проведении мероприятий по выявлению при- и подповерхностных скрытно установленных объектов.

Список использованных источников

1. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. Под ред. М.И. Филькенштейна. – М.: Недра, 1986.
2. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. Fundamentals of Short-Range FM Radar. Norwood.: Artech House Publishers, 2003.
3. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
4. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С. Портативный ЛЧМ-радар подповерхностного зондирования / Доклады БГУИР. –2019. – №1(119). – С. 75-82.
5. Лопатченко А.С., Малевич И.Ю., Савенко С.А. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью / Доклады БГУИР. – 2015. – №3(89). – С. 43-48.