УДК 004.42:621.396.96

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ГЕОРАДАРОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ ЗОНДИРУЮЩИМ СИГНАЛОМ

ЛОПАТЧЕНКО А. С., МАЛЕВИЧ И. Ю.

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

E-mail: a.lopatchenko@gmail.com

Аннотация. Представлены аппаратно-программные методы, обеспечивающие повышение эффективности обнаружения приповерхностных и малозаглубленных до 1,5…2 λ в грунт объектов для ЛЧМ георадаров с непрерывным зондирующим сигналом.

Abstract. The hardware and software methods that increase the efficiency of detecting near-surface and shallow objects up to 1.5 ... 2 λ in the ground for FMCW GPR are presented.

Введение

В последние годы активное развитие получила техника георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом (ЗС). Разработанные системы позволяют выполнять дистанционное обнаружение, определение координат и визуализацию поверхностной проекции заглубленных в грунт объектов естественного и искусственного происхождения.

Теоретическим и техническим аспектам разработки и функционирования таких систем посвящены работы А.П. Аннана, Б.А. Атаянца, А.Ю. Гринева, В.М. Давыдочкина, Д.Дж. Дениэлса, Г.М. Йола, В.В. Езерского, М.Г. Ерошенкова, И.В. Комарова, В.С. Паршина, С.М. Смольского, М.И. Финкельштейна, М. Янкирамана и др.

Вместе с этим ряд теоретических и практических вопросов, связанных с повышением эффективности обнаружения приповерхностных и малозаглубленных до 1,5…2 λ в грунт объектов, требуют углубленного и предметного рассмотрения с учетом специфики функционирования систем с непрерывными сигналами в ближней зоне, наличием ярко выраженной многолучевости, большого рассеяния и затухания сигнала, который маскируется мощными поверхностными отражениями.

Принципы работы георадара непрерывного действия

Работа георадара (ГР) с ЛЧМ ЗС основана на частотном методе измерения дальности (рис.1), который заключается в определении частотного сдвига, получаемого путем перемножения в смесителе (СМ) ЗС и принятого сигнала (ПС), отраженного от заглубленного объекта (с учетом времени его распространения над зондируемой поверхностью (r_z) и в среде укрывающей объект (r_m), характеризуемой диэлектрической проницаемостью ε). Выделенная фильтром нижних частот (ФНЧ) компонента биений соответствует глубине расположения подповерхностного объекта:

$$f_{бi} = \gamma \frac{2\left(r_z + r_m\sqrt{\varepsilon}\right)}{c}, \qquad (1)$$

где $\gamma = \Delta f / T_P$ – скорость перестройки частоты ЗС формируемого ГУН; $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ – диапазон перестройки генератора, управляемого напряжением (ГУН), по частоте; T_P – время развертки по частоте (для $T_P = T_m$ для несимметричного пилообразного закона модуляции); c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Одной из главных характеристик ГР является разрешающая способность по глубине, которая, исходя из традиционных подходов, определяется шириной спектра ЗС:

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

В [1] показано, что использование ЗС с частотами выше 2 ГГц нецелесообразно в виду резкого увеличения потерь в энергии сигнала в грунте. В тоже время использование ЗС с частотами менее 700…900 МГц затруднительно ввиду относительно больших линейных размеров антенн и неудовлетворительной разрешающей способности ГР по площади. Т.е. условия функционирования накладывают физические ограничения на потенциально достижимую разрешающую способность ГР в надсистеме «радар-среда».

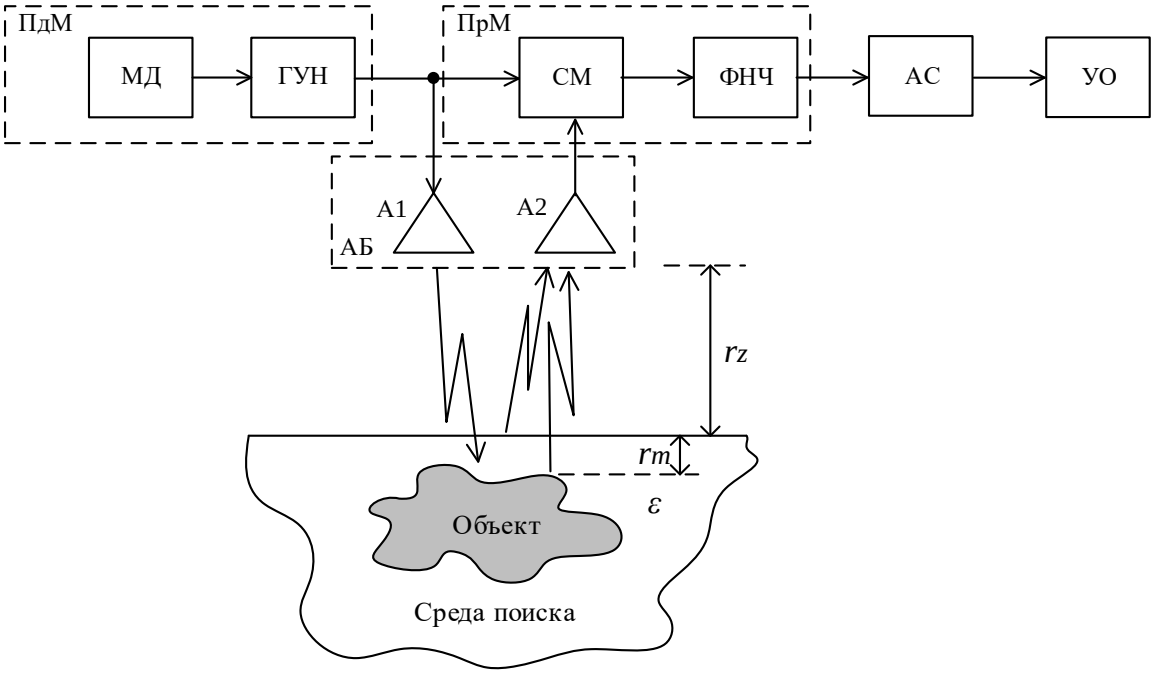

Рис. 1. Принцип работы георадара с непрерывным ЛЧМ зондированием

Поскольку в ГР (согласно частотному методу измерения дальности) необходимо производить спектральную оценку сигнала с выхода СМ, на разрешающую способность влияет и метод спектрального оценивания. Классическим подходом к спектральному оцениванию является коррелограммный метод, в котором радиолокационный портрет **P** определяется как:

$$\mathbf{P_n} = \left| \mathbf{So}^{<n>T} \, \mathbf{R} \, \overline{\mathbf{So}^{<n>}} \right|, \; n = \overline{0, N_a - 1}\,, \qquad (3)$$

где **R** – корреляционная матрица, полученная для разносных частот при Фурье-преобразовании; N_a – число элементов сформированного глубинного портрета; **So** – матрица опорных частот.

В [2] показано, что для несимметричной пилообразной модуляции разрешение метода спектрального оценивания совпадает с разрешением, обеспечиваемым параметрами ЗС, а при симметричной – точнее его в два раза.

Таким образом, разрешение ГР по глубине, определяемое эффективной полосой спектра ЗС в 500…1000 МГц, например, для сред с ε = 4…5 единиц (песчаный грунт) может составлять от 15 до 3,5 см.

Требования эффективного и надежного обнаружения приповерхностных объектов обуславливают необходимость улучшения разрешения ГР и разработки новых подходов к построению аппаратно-программной платформы.

Методы и средства повышения эффективности обнаружения приповерхностных объектов

В [3] показана возможность повышения эффективности обработки сигнала за счет применения методов сверхразрешения, в частности, метода максимального правдоподобия:

$$\mathbf{MP_n} = \left| \mathbf{S}\mathbf{o}^{<n>T}\ \mathbf{Q}\ \overline{\mathbf{S}\mathbf{o}^{<n>}} \right|^{-1},\ n = \overline{0, N_a - 1}, \tag{4}$$

где $\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1}$ – обратная корреляционная матрица анализируемого сигнала. Данный класс методов использует для улучшения разрешения избыточное отношение сигнал/шум, формируемое в групповом ПС при регистрации ГР приповерхностных и малозаглубленных в грунт объектов.

Повышение точности определения площадной проекции зондируемого объекта возможно при переходе от бистатической схемы построения ГР к моностатической с единой приемо-передающей антенной.

Важной характеристикой ГР является точность измерения глубин залегания и линейных размеров объектов. Исходя из (1), глубина залегания объекта может быть вычислена по измеренной частоте соответствующих ему биений:

$$r_m = \frac{f_{бi} c}{2\gamma\sqrt{\varepsilon}} - \frac{r_z}{\sqrt{\varepsilon}}. \tag{5}$$

Учитывая возможный диапазон значений диэлектрической проницаемости зондируемой среды (ε = 2..16), из формулы 2 видно, что для правильного определения глубины и толщины объекта необходима информация о среде поиска. Т.к. диэлектрическая проницаемость сильно зависит от влажности, то использование справочных данных даст большую ошибку измерений, для исключения которой необходимо производить калибровку, измеряя актуальные параметры среды поиска.

Определим требования к точности измерения диэлектрической проницаемости исходя из заданной ошибки измерения глубины, для чего в формуле (5) опустим составляющую $\frac{r_z}{\sqrt{\varepsilon}}$, отвечающую за высоту подъема антенного блока (АБ) над поверхностью:

$$\Delta r_m = \frac{f_{бi} c}{2\gamma\sqrt{\varepsilon}} - \frac{f_{бi} c}{2\gamma(\sqrt{\varepsilon} + \Delta\sqrt{\varepsilon}_и)}, \tag{6}$$

где $\Delta\sqrt{\varepsilon}_и$ – погрешность измерения диэлектрической проницаемости среды.

Произведем эквивалентные преобразования и выразим искомую величину:

$$\Delta\sqrt{\varepsilon}_и(\Delta r_m) = \frac{2\gamma\Delta r_m \varepsilon}{f_{бi} c - 2\gamma\Delta r_m\sqrt{\varepsilon}}. \tag{7}$$

Тогда, например, для Δr_m = 1см, ε = 9 и $f_{бi}$ = 1 МГц ошибка измерения диэлектрической проницаемости должна быть: $\Delta\sqrt{\varepsilon}_и \leq 0{,}06$.

Существующие методы измерения диэлектрической проницаемости требуют использования специальных измерительных приборов, в которые необходимо загружать образец грунта. Такой подход позволяет получить высокую точность, однако требует высоких аппаратных затрат и неудобен при оперативных исследованиях.

Для упрощения и автоматизации процесса калибровки ГР, возможно использовать фазовый метод измерения дальности, разместив АБ вплотную к среде поиска. Т.к. база АБ и длина соединительных высокочастотных кабелей априорно известна, то фазовый набег сигнала, прошедшего между передающей (А1) и приемной (А2) антеннами, относительно сигнала гетеродина будет зависеть от диэлектрической проницаемости среды, к которой прилегает АБ.

В общем виде фазовый набег сигнала за время распространения между А1 и А2 описывается выражением:

$$\varphi = 2\pi f t, \tag{8}$$

где f – частота излучения; t – время распространения сигнала.

С учетом уменьшения скорости распространения электромагнитной волны в твердой среде, время за которое сигнал пройдет базу B, можно записать как:

$$t = \frac{B\sqrt{\varepsilon}}{c}. \tag{9}$$

Подставив (9) в (8), запишем окончательное выражение для фазового набега:

$$\varphi = 2\pi f \frac{B\sqrt{\varepsilon}}{c}, \tag{10}$$

откуда выразим диэлектрическую проницаемость среды:

$$\sqrt{\varepsilon}(\varphi) = \frac{c\varphi}{2\pi f B}. \tag{11}$$

В соответствии с (11) в ГР требуется обеспечить измерение фазового набега φ, что возможно реализовать в приемо-передающем тракте гомодинного типа с квадратурными каналами [4]. Полученные на нулевой частоте ортогональные сигналы I и Q позволяют вычислить искомый фазовый набег: $\varphi = arctg(I/\mathrm{Q})$. Теперь для измерения диэлектрической проницаемости достаточно реализовывать в ГР алгоритм вида:

$$\sqrt{\varepsilon}(\varphi) = \frac{c \cdot arctg(I/\mathrm{Q})}{2\pi f B}. \tag{12}$$

Заключение

Таким образом, рассмотрены вопросы повышения эффективности обнаружения приповерхностных и малозаглубленных в грунт объектов для ЛЧМ георадаров с непрерывным зондированием, включающие обоснование структуры, методов и средств обработки сигналов. Показано, что создание подобных систем является решением задачи поиска компромисса между требованиями по назначению радиолокатора, техническими решениями и возможностями современных алгоритмов обработки сигналов.

Список использованных источников

1. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. -London: The Institution of Electrical Enginee, 2004. – 764 p.
2. Jankiraman M. FMCW Radar Design. - Norwood: Artech House, 2018. – 425 p.
3. Гринкевич, А. В., Савенко, С. А. Повышение эффективности подповерхностного радиолокатора на осно-ве нетрадиционных методов спектрального анализа// Наука и военная безопасность. 2006. №4. С. 38–41.
4. Малевич И.Ю., Лопатченко А. С., Шукевич Т. В., Меледин К. И. Приемо-передающий тракт гомодинного типа с квадратурными каналами для ЛЧМ радара подповерхностного зондирования// Проблемы инфокоммуникаций. 2019. №2(10). С.12-17.