

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ПРИЕМНОГО ТРАКТА ГЕОРАДАРА

*Одсурэн Бухцоож, Московский Энергетический Институт (Технический Университет),
bukhtsooj@yahoo.com*

В докладе рассмотрен вопрос о комплексировании радиолокационных систем подповерхностного зондирования путем включения в приемный тракт георадара радиометрический приемник, чтобы улучшить точность измерения, определив с помощью радиометра электрофизические параметры верхних слоев грунта.

Достигнутые успехи в развитии теории и техники позволяют решить радиолокационным системам (РЛС) многогранные задачи, но требования от потребителей с каждым днем растут. Радиолокационная информация – совокупность полезных сведений об объектах, извлекаемая в результате приема и анализа радиоволн. РЛС обрабатывают сигналы, отображающие физическое состояние цели, затем из сигнала извлекается информация о цели.

Чем больше полученные или извлекаемые информации, тем точнее определяются физические состояния цели (скорость объекта, местоположение, отражающие свойства и т.д.) [1].

При подповерхностном радиолокационном зондировании априорная неизвестность электрофизических параметров среды (грунт), в которой находятся исследуемые цели, не позволяет получить точные данные или наилучшим образом его оптимизировать, также точно определить местоположение объекта в грунте [2, 3]. Целью подповерхностного радиолокационного зондирования может быть диагностика подземных коммуникаций, грунтов под строительные площадки, дорожных покрытий, локальных неоднородностей в грунте, мин, уровня грунтовых вод, а также проведение геофизических, археологических и других исследований. Грунт – многокомпонентная среда, электрофизические параметры которой не только зависят от его составов, но и имеют эти параметры частотную зависимость. Отсутствие данных по электрофизическим параметрам грунта (диэлектрическая проницаемость и проводимость) и то, что эти параметры варьируют, зависимо от даже температуры среды, осложняет задачу подповерхностного зондирования. Диэлектрическая проницаемость согласно Дебаю [3]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{\infty}}{1 + j \cdot \omega \tau}, \quad (1)$$

где ε_{cm} - статическое значение при $\omega \ll \omega_0$, ε_{∞} - высокочастотное при $\omega \gg \omega_0$, параметр τ изменяет по закону $\tau = a \cdot \exp(-b \cdot T)$, где T - абсолютная температура, a и b определяются видом молекул вещества.

Известно [2], что теоретические основы и технические базы современных РЛС подповерхностного зондирования достигли определенного уровня развития и даже выпускаются серийные георадары. Главные тенденции РЛС подповерхностного зондирования – качественное повышение информативности и достоверности интерпретации радиоизображений подповерхностных сред и объектов, сокращение времени мониторинга, исследование и внедрение новых технологий, касающихся как алгоритмов реконструкций и совершенствования программного комплекса, так и модулей георадаров. Современные георадары не обеспечивают получения точной информации о положении труб, находящихся в многослойных структурах почвогрунта. Они не могут дать точной информации о фактуре зондируемого льда и т.д. Причиной отмеченных недостатков современных георадаров является

то, что при их разработке внимание не уделялось вопросам информационного плана и не нашли должного развития [4].

Увеличение информативности при обработке первичной информации можно производить оптимальным выбором длин волн, поляризации, углов наклона, предварительным сбором, и накоплением информации и комплексированием [1].

При подповерхностном зондировании длина волны и поляризация выбираются исходя из условий зондирования, и можно выбрать оптимальное значение в зависимости от решаемых задач.

Поскольку неизвестность диэлектрической проницаемости и проводимости приведет к погрешности при определении место нахождения объектов в грунте и при измерении глубины залегания, в подповерхностном зондировании, лучше всего, заранее определить значение параметров грунта, поэтому комплексирование и накопление информации о состоянии (составе) грунта может решить эту задачу.

В данной работе рассмотрена возможность включения в приемный тракт георадара радиометрического приемника, с целью получить заранее неизвестные данные об электрофизических параметрах для сбора о физическом состоянии грунта. Пассивное зондирование может быть использовано для определения состояния и параметров земных покровов (влажности почвы, температуры поверхности Земли и др.) при различных метеорологических условиях [5].

В настоящее время используются импульсные георадары (наносекундные) и георадары с ЛЧМ сигналом [2, 6]. Наиболее распространение получили импульсные георадары, но в последнее время активно исследуются ЛЧМ георадары, которые, в отличие от импульсных георадаров, не требуют большой мощности от передатчика и при обработке сигналов за счет сжатия сигнала могут иметь разрешающую способность, что и имеет импульсные георадары.

В [7, 8, 9] были рассмотрены вопросы по анализу энергетических потенциалов георадара, характеристикам антенной системы, и возможный вариант построения приемо-передающего тракта георадара с ЛЧМ сигналом.

Измерение глубины осуществляется определением частоты биения отраженных от границ слоя сигналов

$$F_6 = \frac{2 \cdot \Delta F \cdot \Delta f_c}{c} \cdot h \cdot \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}, \quad (2)$$

где ΔF - частота модуляции, Δf_c - ширина спектра ЛЧМ сигнала, c - скорость света, h - глубина слоя.

Для индикации подповерхностных объектов или толщины слоя построится радиолокационный профиль в виде зависимости отраженного времени t_3 от x в прямоугольной системе координат [3].

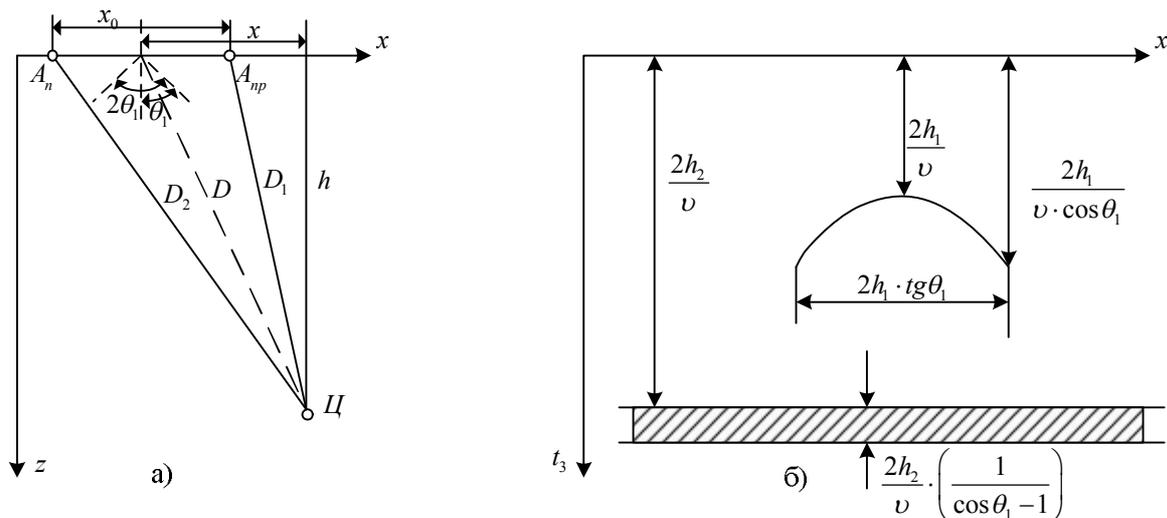


Рис. 1. а) Геометрия расположения антенны над поверхностью и б) формирование радиолокационного профиля

Если вместо точечной цели имеется плоская граница в глубине h_2 , то в результате наложения множества элементарных гипербол образуется линия определенной толщины (Рис.1. б)). А разность времен прихода сигнала от цели и прямого сигнала равна

$$\Delta t = t_3 - \frac{x_0}{c} = \frac{D_1 + D_2}{v_\phi} - \frac{x_0}{c} = \frac{1}{v_\phi} \cdot \left[\sqrt{\left(x - \frac{x_0}{2}\right)^2 + h^2} + \sqrt{\left(x + \frac{x_0}{2}\right)^2 + h^2} \right] - \frac{x_0}{c} \quad (3)$$

С увеличением ширины спектра сигнала разрешающая способность улучшается, что очень важно, поскольку объекты, находящиеся в грунте, могут иметь малые размеры.

Разрешающая способность по глубине георадара

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f_c \cdot \text{Re}\sqrt{\varepsilon}} \quad (4)$$

Из (2) и (4) видно, насколько важна в подповерхностной радиолокации информация об электрофизических параметрах грунта. В докладе рассмотрен принцип построения георадара с ЛЧМ сигналом, работающего в диапазоне частот от 400-800 МГц, для зондирования подземных коммуникаций, локальных неоднородностей в грунте, находящихся в глубине 2-3м и т.д. Частота зондирования выбрана, исходя из энергетических характеристик георадара [7]. Конечно, увеличение ширины спектра дает возможность совместить радиометрический приемник с приемным трактом, как в радиометрии, так и в любом радиолокаторе, на входе применяются широкополосные маломощные усилители для повышения отношения сигнал/шум. На рис.2. показана структурная схема супергетеродинного радиометрического приемника.

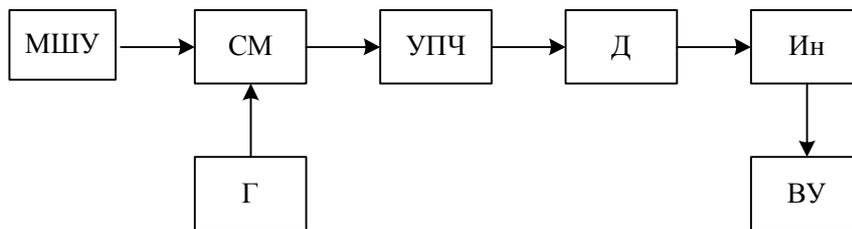


Рис. 2. Структурная схема супергетеродинного радиометрического приемника; МШУ - маломощный усилитель, СМ – смеситель, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, Д – детектор, Ин – интегратор, Г – гетеродин, ВУ – выходное устройство

Радиояркость температура, которая для собственного излучения источника, имеющего термодинамическую температуру T , определяется соотношением [5]

$$T_\gamma = H_f \cdot T, \quad (5)$$

где H_f - коэффициент, характеризующий степень черноты.

Интенсивность излучения земных покровов характеризуется радиояркостью температурой (5). Степень черноты покрова зависит от диэлектрической проницаемости материала покрова, степени увлажнения, вида шероховатостей и других факторов. В направлении нормали излучательная способность определяется диэлектрической проницаемостью

$$H_f = \left(1 - \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2 \right) \quad (6)$$

Поэтому, определив радиояркость температуру T_γ , мы можем не только узнать диэлектрическую проницаемость грунта, но и другие свойства грунта.

Поскольку схема приемного тракта георадара и радиометрического приемника можно их объединить (см. рис.3)

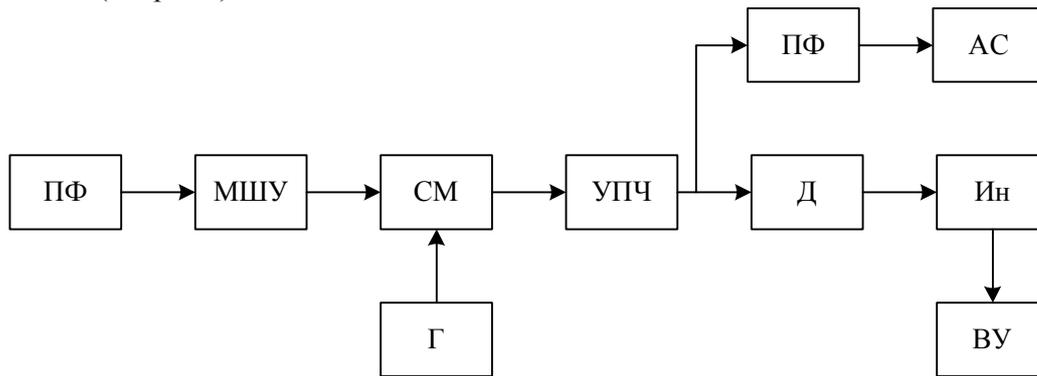


Рис. 3. Предполагаемая структурная схема приемного тракта георадара с включением радиометрического приемника; МШУ - малошумящий усилитель, СМ – смеситель, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, Д – детектор, Ин – интегратор, Г – гетеродин, ВУ – выходное устройство; ПФ - полосовой фильтр; АС – анализатор спектра

Есть и другие способы и методы определения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) грунта, как определение диэлектрической проницаемости по измеренным коэффициентам отражения при наклонном зондировании плоскими волнами вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ диапазоне или определение КДП с помощью куметра и т.д. Использование радиометрических устройств и их возможности широко известны. Если совместим радиометрический приемник с приемным трактом георадара с ЛЧМ сигналом, то не только увеличивается информативность, но и возрастают функциональные возможности в отличие от других методов. Так как, например, формула, используемая в данном методе, (определение диэлектрической проницаемости по измеренным коэффициентам отражения при наклонном зондировании плоскими волнами вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ диапазоне) пригодна лишь для гладких поверхностей, то дециметровые волны позволят получать сведения о состоянии почвы [10].

Еще одним преимуществом использования радиометрии в подповерхностной радиолокации является то, что в дециметровом и сантиметровом диапазоне волн яркостная температура может быть наблюдаена не только от верхних слоев, но и от слоев материала, лежащих ниже поверхности [11].

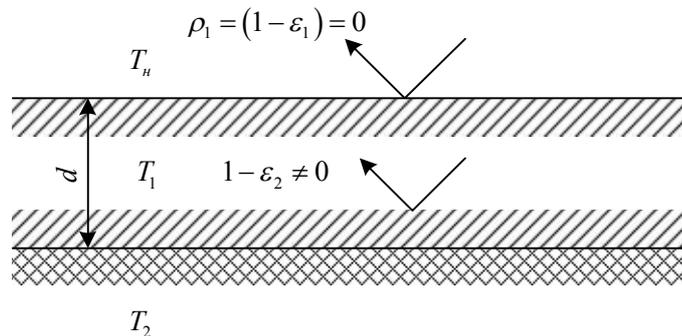


Рис. 4. Простая модель слоистой поверхности

ϵ_1 - диэлектрическая проницаемость воздуха; ϵ_2 - диэлектрическая проницаемость слоя; T_n , T_1 , и T_2 - температура атмосферного, первого и второго слоя, соответственно;

А результирующая яркостная температура в этом случае определяется соотношением

$$T_i = T_1 \left(1 - \frac{1}{L_1} \right) \cdot \left(1 + \frac{1 - \varepsilon_2}{L_1} \right) + \frac{T_2 (1 - \varepsilon_2)}{L_1} + T_n \frac{1 - \varepsilon_2}{L_1^2} \quad (6)$$

Потери в поверхностном слое можно выразить через глубину, на которую проникает излучение, или глубину скин-слоя δ .

$$L_1 = e^{2d/\delta} \quad (7)$$

В результате расчетов показаны энергетические характеристики георадара при различных подповерхностных целях, моделирована широкополосная антенна «галстук-бабочка» с помощью САПР HFSS и функциональная схема приема-передающего тракта, и рассмотрены вопросы по возможной совместимости радиометрического приемника в состав приемного тракта георадара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информативность радиолокационных объектов, сигналов и систем. Нарышкин А. К. М.: МЭИ, 1993
2. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография/ Под ред. А. Ю. Гринёва, - М.: Радиотехника, 2005.
3. Подповерхностная радиолокация/ М. И. Финкельштейн, В. И. Карпучин, В. А. Кутев, В. Н. Метелкин. Под ред. М. И. Финкельштейна. – М.: Радио и связь, 1994
4. Характеристика современного уровня развития геолокации. XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. VI: С.49, 2002
5. Устройства пассивного зондирования в СВЧ и ИК диапазонах. Башаринов А. Е. – М.: МЭИ, 1985.
6. Андреев Г.А., Заянцев Л. В., Яковлев В.В. Радиоволновые системы подповерхностного зондирования. // Зарубежная радиоэлектроника, 1991, №2. стр.3-22
7. Баскаков А. И., Одсурэн Б. Анализ энергетических характеристик георадара// Радиотехнические тетради. № 37, 2008
8. Одсурэн Б. Анализ характеристик антенной системы георадара// Вестник МЭИ, №1, 2009
9. Баскаков А. И., Одсурэн Б. Приемно-передающий тракт георадара с ЛЧМ сигналом. № 38, 2009
10. Радиоизлучение Земли как планеты. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. – М.: Наука, 1974.
11. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника, Нью-Йорк, 1970. Пер с англ. Под общей редакцией К. Н. Трофимова, Том. 4, Радиолокационные станции и системы. М. Сов. радио 1978.