

Оценка разрешения по глубине при подповерхностном радиозондировании

В. Г. Сугак

ИРЭ НАН Украины,
Харьков, 310085, ул. Ак. Проскуры, 12

Статья поступила в редакцию 14 апреля 1998 г., после переработки 28 декабря 1998 г.

Показана возможность увеличения разрешающей способности зондирующего ЛЧМ сигнала при сохранении глубины зондирования. Оценка выполнена с учетом искажений, обусловленных дисперсионностью электрических характеристик грунтов, которая компенсировалась специальной весовой обработкой принимаемых сигналов.

Показано можливість підвищення роздільної здатності зондуючого ЛЧМ сигналу при збереженні глибини зондування. Оцінку отримано з урахуванням викривлень, що зумовлені дисперсійністю характеристик середовища, яка компенсувалася за допомогою спеціальної вагової обробки сигналів.

1. Введение

В задачах радиолокационного подповерхностного зондирования верхних слоев Земли (до 10 м) во влажных грунтах, таких как суглинки, супесь, песок, желательно иметь разрешающую способность измерительной аппаратуры по глубине порядка нескольких десятков сантиметров. Это обуславливает необходимость использования широкой полосы частот зондирующих сигналов (более 200 МГц). При этом обычно несущая частота выбирается порядка нескольких сотен МГц, что связано со стремлением уменьшить размер апертуры антенны. Чем шире полоса частот зондирующего сигнала, тем больше оказывает влияние на результат зондирования зависимость от частоты электрических характеристик реальных грунтов (дисперсионность), которая вызывает фазовые искажения спектральных компонент отраженных сигналов и, как результат, приводит к уменьшению разрешающей способности по глубине. С другой стороны, в диспергирующих средах с увеличением частоты растет затухание радиоволн, что приводит к отсечке высокочастотных составляющих спектра отраженных сигналов. Указанные эффекты существенно уменьшают точность измерения границ залегания подповерхностных неоднородностей в реальных средах. Особенно эти эффекты проявляются во влажных грунтах.

В диапазоне частот до 150-200 МГц, где затухание радиоволн в реальных грунтах еще не столь велико, ограничения, обусловленные сравнительно малой шириной спектра зондирующего сигнала и классическими методами обработки отраженных сигналов, не позволяют достигнуть разрешения по глубине менее 0,5 м.

2. Постановка задачи

Учитывая указанные выше факторы, рассмотрим применение сигналов с модуляцией частоты по линейному закону (ЛЧМ) в диапазоне от нескольких десятков до 200 МГц.

Подобные сигналы, как будет показано ниже, являются удобными для разработки алгоритмов, обеспечивающих увеличение разрешающей способности, точности определения глубины залегания подповерхностных неоднородностей и компенсации искажений, обусловленных дисперсионными свойствами реальных грунтов. При этом облегчается также практическая реализация аппаратного измерительного комплекса и алгоритмов обработки отраженных сигналов при проведении экспериментальных исследований.

Для теоретической оценки возможностей подповерхностного зондирования применительно к типичной задаче мониторинга верхних слоев Земли до уровня грунтовых вод (так называемая зона аэрации) выберем для анализа следующую ее типовую модель [1]: верхний, экранирующий слой толщиной 1-8 м, средний, обнаруживаемый слой толщиной до 2-3 м и хорошо проводящее полупространство, насыщенное грунтовыми водами.

Ниже рассматривается задача расчета поля излучающего диполя, расположенного вблизи поверхности земли (далее термин "вблизи поверхности земли" будет обозначать высоту над уровнем

земли $h < \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\epsilon_{ef}}$, где ϵ_{ef} – эффективная относи-

тельная диэлектрическая проницаемость грунта, обычно значительно превышающая единицу, λ – длина радиоволны [2]), что дает возможность достаточно просто рассчитать основные характеристики кросс-поляризованных составляющих поля

над поверхностью земли. Это является достаточным для предварительной оценки потенциальных возможностей алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих увеличение точности измерения границ подповерхностных неоднородностей.

Рассмотрены результаты двух видов экспериментальных исследований. Первые проводились в лабораторных условиях с целью исследования влияния искажений сигналов, обусловленных реальными частотными характеристиками трактов приемника и передатчика, на результаты зондирования при практической реализации алгоритмов, направленных на увеличение разрешающей способности измерительного комплекса по глубине. Вторые – на участке с оборудованным специально подповерхностным слоем суглинка, насыщенным нефтепродуктом, для подтверждения возможностей метода при зондировании в реальных грунтах.

3. Теоретическая оценка возможностей подповерхностного зондирования

Так как формулы, описывающие уравнения полей электрического и магнитного диполей (как вертикального, так и горизонтального), при такой постановке задачи отличаются в основном только выражениями для поверхностных импедансов [3], то будем рассматривать в дальнейшем в качестве излучающего только вертикальный электрический диполь. В теоретических расчетах далее используется цилиндрическая система координат, начало которой совмещено с излучающим диполем, а ось z направлена вертикально вверх. Для компонент поля в дальней зоне ($kr \gg 1$) вблизи поверхности земли имеем [3]:

$$\begin{aligned} E_{1z} &= \frac{p\mu}{2\pi} \omega^2 \frac{e^{ik_1 r}}{r} Y(s_1 r); \\ E_{1r} &= Z_s^1 H_{1\phi}; \\ H_{1\phi} &= \frac{E_{1r}}{Z_{01}}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Z_s^1 &= \frac{Z_s^2 - iZ_1 \operatorname{tg}(k_1 \cos \theta_1 d_1)}{Z_1 - iZ_s^2 \operatorname{tg}(k_1 \cos \theta_1 d_1)} Z_1 \frac{\sqrt{v_1^2 - 1}}{v_1}; \\ Z_s^{n-1} &= \frac{Z_s^n - iZ_{n-1} \operatorname{tg}(k_{n-1} \cos \theta_{n-1} d_{n-1})}{Z_{n-1} - iZ_s^n \operatorname{tg}(k_{n-1} \cos \theta_{n-1} d_{n-1})} Z_{n-1} \frac{\sqrt{v_n^2 - 1}}{v_n}. \end{aligned} \quad (2)$$

где p – электрический момент диполя; μ – магнитная проницаемость свободного пространства; ω – круговая частота; k_n – волновой коэффициент в n -ом слое; E_{1z} – напряженность электрического поля вдоль оси z на поверхности земли; $H_{1\phi}$ – напряженность магнитного поля вдоль орта ϕ на поверхности земли; $s_1 r$ – численное расстояние [1], выражаемое через импеданс слоистой среды Z_s по формуле [3]:

$$s_1 r = \frac{ik_1}{2} \left(\frac{Z_s^1}{Z_{01}} \right)^2 r,$$

Z_{01} – импеданс на поверхности земли, θ_{n-1} – угол падения, под которым происходит распространение волны в $n-1$ слое, Z_s^n – поверхностный импеданс n -го слоя, d_n – толщина n -го слоя, v_n – коэффициент преломления n -го слоя, $Y(\cdot)$ – функция ослабления, определяемая следующей формулой [2]:

$$Y(s_1 r) = 1 - 2\sqrt{s_1 r} e^{-s_1 r} \int_0^{\sqrt{s_1 r}} e^{u^2} du. \quad (3)$$

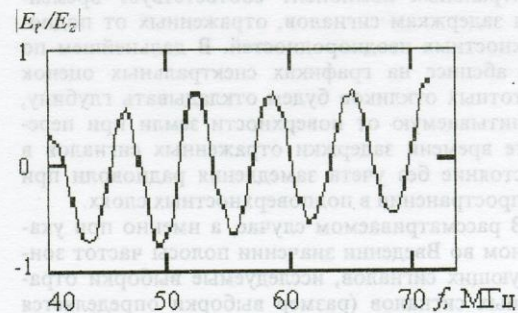


Рис. 1. Зависимость модуля отношения вертикальной и горизонтальной электрических составляющих полей над слоистой подповерхностной структурой от частоты

На рис. 1 представлена рассчитанная по формулам (1), (2) с использованием численного метода интегрирования выражения (3) зависимость модуля отношения кросс-поляризованных компонент (частотный отклик) поля в точке на расстоянии 100 м от передающего диполя вблизи поверхности земли от частоты. Граница между первым и вторым слоями располагалась на глубине 5 м, а между вторым слоем и полупространством

вом – на глубине 6 м. Параметры слоев выбраны согласно [1] для рассматриваемой модели зоны аэрации, электрические характеристики слоев которой соответствуют задаче обнаружения слоя, содержащего нефтепродукт ($\epsilon_1 = 15$, $\sigma_1 = 10^{-2}$ См/м, $d_1 = 5$ м, $\epsilon_2 = 25$, $\sigma_2 = 3 \cdot 10^{-3}$ См/м, $d_2 = 1$ м, $\epsilon_3 = 70$, $\sigma_3 = 5 \cdot 10^{-1}$ См/м, $d_3 = \infty$ [2], где ϵ_i – диэлектрическая проницаемость, σ_i – удельная проводимость, а номер подстрочного индекса соответствует номеру подповерхностного слоя, отсчитываемому от поверхности земли).

Частотные отклики, подобные представленному на рис. 1, можно интерпретировать как результат интерференции радиоволн, отраженных от границ подповерхностных слоев, возникающей при изменении несущей частоты зондирующего сигнала по линейному закону.

В радиолокаторах подповерхностного зондирования, использующих ЛЧМ сигнал, для оценки глубины залегания неоднородностей применяется спектральный анализ результата преобразования подобных частотных откликов во временной сигнал, получаемый путем перемножения принятого антенной отраженного сигнала на опорный (часть излучаемого сигнала), усиления и фильтрации на низких частотах. Спектральный анализ проводится обычно методом Фурье-преобразования автокорреляционной функции сигнала на выходе приемника. При этом частота спектральных компонент соответствует временным задержкам сигналов, отраженных от подповерхностных неоднородностей. В дальнейшем по оси абсцисс на графиках спектральных оценок частотных откликов будем откладывать глубину, отсчитываемую от поверхности земли при пересчете времени задержки отраженных сигналов в расстояние без учета замедления радиоволн при распространении в подповерхностных слоях.

В рассматриваемом случае, а именно при указанном во Введении значении полосы частот зондирующих сигналов, исследуемые выборки отраженных сигналов (размер выборки определяется полосой “качания” несущей частоты сигнала) содержат малое число периодов гармонических составляющих (как, например, на рис. 1). При этом получающееся в результате применения Фурье-преобразования спектральное разрешение (в данном случае обратно пропорциональное длительности исследуемой выборки) является недостаточным для выделения сигналов, отраженных от границ слоев (например, от верхней и нижней границ второго слоя в рассматриваемой модели). Спектральная оценка представленного на рис. 1 частотного отклика, полученная указанным методом, не позволяет выделить сигналы, отраженные от границ обнаруживаемого слоя, что видно из рис. 2 (кривая 1).

Существует обширный класс спектральных методов оценивания [4], специально разработанных

для устранения вышеуказанных ограничений. Эти методы позволяют получить существенный выигрыш в спектральном разрешении при оценивании коротких выборок сигналов по сравнению с Фурье-преобразованием. Так как частотный отклик, приведенный на рис. 1, соответствует узкополосному процессу, близкому к параметрической модели в виде совокупности нескольких квазигармонических составляющих и шума, который всегда присутствует в принимаемом сигнале, то можно воспользоваться одним из таких методов спектрального оценивания. В данной работе применяется модифицированный метод “MUSIC” (multiple signal classification) [4]. Метод соответствует спектральному оцениванию в подпространстве шума выборочных ковариационных матриц исследуемого сигнала, которые строятся по формуле:

$$\tilde{R} = \tilde{T}^H \tilde{T}, \quad \tilde{T} = \begin{bmatrix} x(p+1) & \dots & x(1) \\ \dots & \dots & \dots \\ x(N) & \dots & x(N-p) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

где $x(n)$ – n -ый отсчет оцифрованной выборки исследуемого сигнала; H – операция транспонирования и комплексного сопряжения; p – порядок ковариационной матрицы; N – число отсчетов в исследуемой выборке.

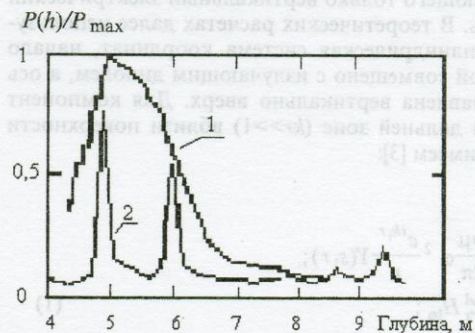


Рис. 2. Результаты спектрального анализа представленного на рис. 1 частотного отклика, полученные с помощью преобразования Фурье (1) и спектральным методом оценивания “MUSIC” (2)

Оценки этого класса основаны на свойстве ортогональности собственных векторов ковариационных матриц данных, соответствующих подпространству шума, собственным векторам подпространства сигнала. Оценки частот квазигармонических компонент в данном методе производятся по частотам расположения узких пиков в спектре, вычисляемом на основе выражения:

$$P(f) = \left[\vec{e}^H(f) \left(\sum_{k=M+1}^p \frac{1}{\lambda_k} \vec{V}_k \vec{V}_k^H \right) \vec{e}(f) \right]^{-1}; \quad (5)$$

$$\vec{e}(f) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j2f\delta t) \\ \exp(j2\pi f/\delta t) \end{bmatrix};$$

где $\vec{e}(f)$ – вектор отсчетов гармонической составляющей с частотой f ; δt – интервал дискретизации исследуемой выборки; λ_k – k -е собственное значение ковариационной матрицы R , соответствующее ее собственному вектору V_k ; M – число собственных векторов сигнального подпространства матрицы.

При этом получается выигрыш в спектральном разрешении в 10 раз и более в зависимости от соотношения сигнал/шум по сравнению с применением Фурье-преобразования автокорреляционной функции коротких выборок отраженных сигналов. Оценки проводились с использованием приведенной выше подповерхностной модели зоны аэрации при разных значениях d_1 и d_2 и при разных соотношениях сигнал/шум.

На рис. 2 (кривая 2) показана спектральная оценка частотного отклика, представленного на рис. 1, полученная данным методом. Для сравнения, здесь же приведена оценка на основе Фурье-преобразования. Видно, что составляющие сигнала, соответствующие отражениям от верхней и нижней границ обнаруживаемого слоя (в данном примере 5 м и 6 м), при использовании этого преобразования не выделяются, в то время как в спектре с высоким разрешением хорошо различимы пики спектральной плотности, соответствующие отражениям от верхней и нижней границы обнаруживаемого слоя.

Однако, как указывалось выше, при прохождении через тракты приемника, передатчика, антенны и реальных сред, сигналы испытывают искажения, обусловленные влиянием фазо-частотных характеристик этих трактов и дисперсионностью свойств грунтов. Поэтому желательнее оценить реально достижимый выигрыш в разрешающей способности по глубине действующих радиолока-торов.

Распространение радиоволн в диспергирующих средах должно приводить, в частности, к существенному отличию формы сигналов на выходе приемного смесителя от формы, соответствующей модели в виде смеси гармонических составляющих, о чем упоминалось выше. В этой ситуации выделение сигналов, соответствующих отражениям от границ слоев, будет затруднено вследствие “расплывания” соответствующих спектральных пиков за счет фазовых искажений высокочастотных спектральных компонент.

Используем подповерхностную модель Земли, описанную выше. Для учета дисперсионности электрических характеристик слоев применим линейную аппроксимацию частотных характеристик диэлектрической проницаемости и удельной проводимости в указанном выше диапазоне частот (что является близким к реальной ситуации) [1] по следующим формулам:

$$\epsilon_i = a_i + b_i f, \quad \sigma_i = c_i + g_i f, \quad i=1,2. \quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned} a_1 &= 15, & b_1 &= -8 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}^{-1}; \\ c_1 &= 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}, & g_1 &= 0,15 \cdot 10^{-10} \text{ См/МГц}; \\ a_2 &= 25, & b_2 &= -10 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}^{-1}; \\ c_2 &= 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}, & g_2 &= 0,05 \cdot 10^{-10} \text{ См/МГц}; \\ a_3 &= 70, & b_3 &= -10 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}^{-1}; \\ c_3 &= 5 \cdot 10^{-1} \text{ См/м}, & g_3 &= 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ См/МГц}. \end{aligned}$$

Регрессионные зависимости (6) получены методом наименьших квадратов по результатам измерений электрических характеристик грунтов в зависимости от влажности и степени их насыщения нефтепродуктом, выполненных в лабораторных условиях и в лизиметре (искусственно созданной действующей модели зоны аэрации) [1]. Значения влажности и электрических характеристик грунта выбраны в соответствии со средними значениями, характерными для естественных условий в типовой зоне аэрации [1] применительно к суглинку.

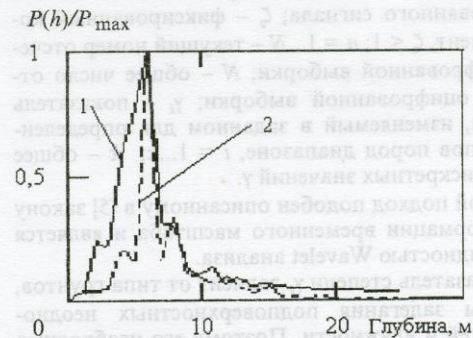


Рис. 3. Результаты спектрального анализа сигналов, отраженных от подповерхностных слоев:

1 – с учетом дисперсионности электрических характеристик грунтов;
2 – без учета

На рис. 3 представлены основанные на Фурье-преобразовании результаты спектральной оценки сигналов, отраженных от границ слоев рассматриваемой модели подповерхностной структуры зоны аэрации (верхняя граница обнаруживаемого

второго слоя расположена на глубине 6 м, а нижняя – на глубине 7 м). При этом кривая 2 рассчитана без учета дисперсионности электрических свойств грунтов, то есть, при отбрасывании в выражениях (6) членов, зависящих от частоты, а кривая 1 – с учетом последней. Видно существенное расширение ширины спектра сигнала, отраженного от границ второго слоя.

Так как искажения, обусловленные дисперсионностью электрических характеристик грунтов, подобны искажениям, вызванным паразитной частотной модуляцией зондирующего сигнала по закону, который определяется конкретными зависимостями диэлектрической проницаемости и удельной проводимости от частоты для каждого типа грунта и влажности, то для их компенсации можно применить трансформацию временного масштаба принимаемого сигнала, подбирая ее закон так, чтобы скомпенсировать указанные искажения. Трансформацию временного масштаба можно осуществить, например, считывая дискретные отсчеты оцифрованной выборки исследуемого сигнала с выхода низкочастотного усилителя с периодом дискретизации, зависящим от номера отсчета по следующему закону:

$$\Delta t_d(t) = \Delta t_0 \left\{ 1 + \zeta \left(\frac{n}{N} \right)^{\gamma_i} \right\}, \quad (7)$$

где $\Delta t_d(t)$ – период дискретизации считывающих импульсов; Δt_0 – период дискретизации исходного оцифрованного сигнала; ζ – фиксированный коэффициент, $\zeta < 1$; $n = 1 \dots N$ – текущий номер отсчета оцифрованной выборки; N – общее число отсчетов оцифрованной выборки; γ_i – показатель степени, изменяемый в заданном для определенных типов пород диапазоне, $i = 1 \dots k$; k – общее число дискретных значений γ .

Такой подход подобен описанному в [5] закону трансформации временного масштаба и является разновидностью Wavelet анализа.

Показатель степени γ_i зависит от типа грунтов, глубины залегания подповерхностных неоднородностей и влажности. Поэтому его необходимо варьировать в некотором диапазоне, выбирая то значение, которое соответствует минимальной ширине функции неопределенности сигнала, отраженного слоистой подповерхностной структурой. Так как наиболее существенную долю искажений определяет верхний, экранирующий слой вследствие его наибольшей толщины и влажности, а больший интерес представляет отражение от границы второго от поверхности слоя (например, в задачах обнаружения подповерхностных скопленений свободных нефтепродуктов [1]), то указанный подход может существенно улучшить разрешение по глубине.

Результаты, полученные путем моделирования на ЭВМ приведенного алгоритма компенсации искажений сигналов в случае использования вышеописанной модели подповерхностной структуры зоны аэрации показали, что применение спектрального метода с высоким разрешением по частоте к исследуемым отраженным сигналам после трансформации временного масштаба позволяет отчетливо выделять частотные пики, приблизительно соответствующие границам расположения обнаруживаемого слоя.

Выбор необходимого значения показателя степени γ при моделировании осуществлялся путем вычисления функции неопределенности, соответствующей отраженным сигналам. Выбиралось значение γ , соответствующее функции неопределенности с минимальной шириной по уровню 0,5.

4. Результаты экспериментальных исследований

Эксперимент выполнялся с помощью макета радиолокатора подповерхностного зондирования, использующего ЛЧМ сигнал. Блок-схема установки приведена на рис. 4. В качестве задающего генератора использовался стандартный прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик Х1-42. Излучение и прием сигнала осуществлялись широкополосной плоской логопериодической антенной с круговой симметрией, которая была выбрана исходя из требования минимального изменения высоты фазового центра при девиации частоты. Для развязки передающего и приемного сигналов применялся гибридный направленный ответвитель, работающий в полосе частот до 200 МГц с развязкой каналов не менее 20 дБ.

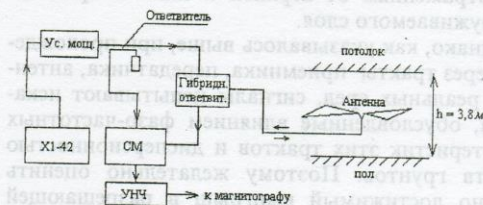


Рис. 4. Блок-схема установки и схема проведения эксперимента

Коэффициент стоячей волны антенны не превышал 1,8 во всем рабочем диапазоне. С выхода широкополосного смесителя (на который в качестве опорного сигнала подавался задержанный сигнал задающего генератора с выхода усилителя мощности) разностный низкочастотный сигнал поступал на низкочастотный усилитель. После усиления

полезный сигнал вводился в ЭВМ, где производилась окончательная его обработка. Линейное изменение несущей частоты можно было осуществлять в диапазоне 60÷200 МГц с периодом 50 Гц.

Проводилось два вида экспериментальных проверок возможностей метода.

В первом исследовалось влияние реальных амплитудно и фазо-частотных характеристик трактов приемника и передатчика на возможность увеличения разрешающей способности радиолокатора с ЛЧМ сигналом по пространственным характеристикам. Схема эксперимента приведена на том же рис. 4. Антенна локатора подвешивалась на специальных блоках между плоскостями

потолка и пола в пустом помещении на разных высотах. Отраженные указанными плоскостями сигналы записывались на магнитограф и после преобразования в цифровой форме вводились в ЭВМ, обрабатывались и выводились в виде графиков для каждого значения высоты расположения антенны над плоскостью пола. Предварительно временные выборки, соответствующие периоду ЛЧМ сигнала, усреднялись по всему ансамблю реализаций для повышения соотношения сигнал/шум. Затем выполнялась спектральная оценка полученных усредненных выборок с помощью Фурье-преобразования и модифицированного метода "MUSIC".

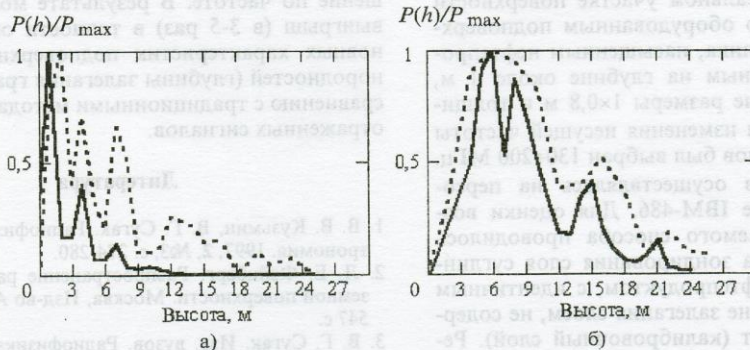


Рис. 5. Результаты спектрального анализа сигналов, отраженных от плоскостей пола и потолка, в зависимости от высоты расположения антенны над плоскостью пола:

----- Фурье-анализ; ——— оценка с высоким разрешением
 а) $h_1=0,8$ м, $h_2=3$ м; б) $h_1=1,5$ м, $h_2=2,3$ м

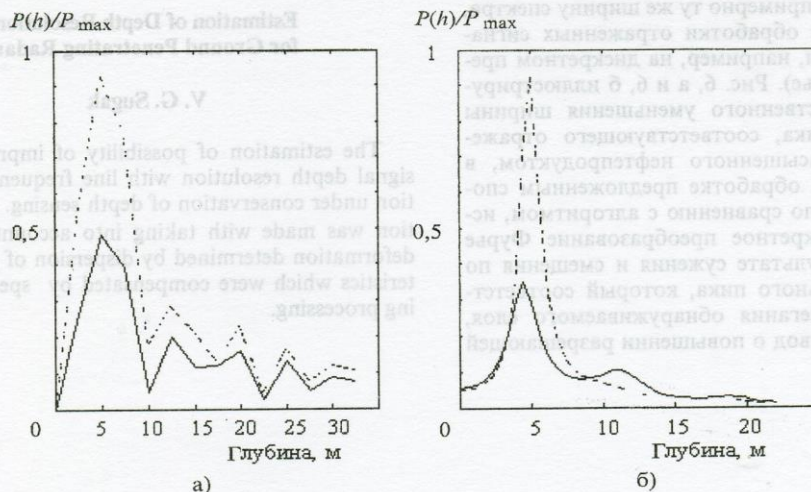


Рис. 6. Результаты спектрального анализа отраженных сигналов в эксперименте с подповерхностным зондированием:
 а) оценка методом Фурье-преобразования,
 б) результат спектрального оценивания модифицированным методом "MUSIC".

Сплошная линия – антенна над обнаруживаемым слоем, содержащим нефтепродукт; пунктирная кривая – антенна над калибровочным слоем

Результаты, иллюстрирующие возможности улучшения характеристик разрешения по пространственным координатам (в данном случае по высоте) для такого способа спектральной оценки приведены на рис. 5, а и рис. 5, б. Видно, что описанный алгоритм обработки позволяет существенно увеличить пространственное разрешение по крайней мере в 3 раза. Результаты обработки показали, что в данном случае (при использовании ЛЧМ сигнала) можно достигнуть увеличения разрешения по частоте в 3-5 раз, что при использовании диапазона частот 50 ± 150 МГц составит 30-40 см по глубине.

Другой вид экспериментальных измерений осуществлялся на реальном участке поверхности земли со специально оборудованным подповерхностным слоем суглинка, насыщенным нефтепродуктом, расположенным на глубине около 1 м, имеющим поперечные размеры $1 \times 0,8$ м и толщиной 30 см. Диапазон изменения несущей частоты зондирующих сигналов был выбран 130 ± 200 МГц. Обработка сигналов осуществлялась на персональном компьютере IBM-486. Для оценки возможностей предлагаемого способа проводилось сравнение результата зондирования слоя суглинка, насыщенного нефтепродуктом, с идентичным по размерам и глубине залегания слоем, не содержащим нефтепродукт (калибровочный слой). Результаты показали возможность точного выявления границы слоя, насыщенного нефтепродуктом, что обеспечивалось увеличением разрешающей способности предложенного способа по глубине по сравнению с наиболее часто встречающимися на практике импульсными зондирующими сигналами, имеющими примерно ту же ширину спектра, или алгоритмами обработки отраженных сигналов (основанными, например, на дискретном преобразовании Фурье). Рис. 6, а и б, иллюстрируют эффект существенного уменьшения ширины спектрального пика, соответствующего отражению от слоя, насыщенного нефтепродуктом, в эксперименте при обработке предложенным способом (рис. 6, б) по сравнению с алгоритмом, использующим дискретное преобразование Фурье (рис. 6, а). В результате сужения и смещения по частоте спектрального пика, который соответствует границе залегания обнаруживаемого слоя, можно сделать вывод о повышении разрешающей

способности при обработке отраженных сигналов предложенным способом и возможности обнаружения подповерхностных слоев, насыщенных нефтепродуктом.

5. Выводы

Таким образом, в результате теоретического моделирования и экспериментальной проверки показано, что при использовании сигналов с линейной частотной модуляцией в полосе частот до 200 МГц удается скомпенсировать дисперсионность электрических свойств грунтов и применить спектральные методы, имеющие высокое разрешение по частоте. В результате можно получить выигрыш (в 3-5 раз) в точности оценивания основных характеристик подповерхностных неоднородностей (глубины залегания границ слоев) по сравнению с традиционными методами обработки отраженных сигналов.

Литература

1. В. В. Кузьмин, В. Г. Сугак. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №3, с. 274-280.
2. Л. Е. Фейнберг. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. Москва, Изд-во АН СССР, 1961, 547 с.
3. В. Г. Сугак. Изв. вузов. Радиофизика. 1997, 40, №8, с. 952-979.
4. С. Л. Марпл-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва, Мир, 1990, 584 с.
5. L. Carin, L. B. Felsen, D. R. Kraly, H. S. Oh, W. C. Lee. IEEE Trans. Antennas Propag. 1997, AP-45, No. 4, p. 592-600.

Estimation of Depth Resolution for Ground Penetrating Radar

V. G. Sugak

The estimation of possibility of improvement of signal depth resolution with line frequency modulation under conservation of depth sensing. The estimation was made with taking into account the signal deformation determined by dispersion of soil characteristics which were compensated by special weighting processing.

