

УДК [621.396.96+53.082.74]

doi: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.007

В.Г. Машков, В.А. Малышев
**МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД
МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ПРИ ПОСАДКЕ
ВОЗДУШНОГО СУДНА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания радиолокационной системы посадки воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную площадку с возможностью зондирования подстилающей поверхности (места посадки), определения параметров и характеристик плоскостойких сред и выдачи информации летному составу о возможности производства посадки либо отсутствия таковой. Вариант использования метода средней точки относящегося к бистатическому методу диагностики, базируется на измерениях временной задержки между прямой волной и отраженной от основания подповерхностного слоя, которая является функцией его толщины. Полученные данные, при определенных условиях, позволяют восстановить геометрические и электрофизические параметры слоистой структуры. Однако существует ряд факторов при диагностике плоскостойких сред бистатическими методами, которые вносят весомый вклад в суммарную погрешность, особенно за счет незначительной продольной неоднородности, либо слабой дисперсии даже одного из слоев структуры, которые не могут быть учтены при моделировании. Тогда при диагностике реальных плоскостойких структур на основе бистатических данных погрешность определения толщины слоев и электрофизических параметров увеличивается. Вариант использования метода поверхностного отражения, относящегося к моностатическому способу обзора слоистых сред менее чувствителен к горизонтальным изменениям электрофизических и геометрических параметров, и является самым экономичным с точки зрения приема, накопления и обработки данных радарными подповерхностного зондирования.

Ключевые слова: плоскостойкая среда; подповерхностное зондирования; посадка вертолета; место посадки; неподготовленная площадка.

Введение. Рассмотренный в [1, 2] метод средней точки (МСТ) относящийся к бистатическому методу диагностики, базирующийся на измерениях временной задержки между прямой волной и отраженной от основания подповерхностного слоя, которая является функцией его толщины, причем передающая и приемные антенны разделены в пространстве, а прием и накопление данных, осуществляется при изменении расстояния между ними относительно средней точки, имеет ряд указанных недостатков.

Показано, что при использовании бистатических методов диагностики плоскостойких сред значительный вклад в результирующую

погрешность вносят в особенности незначительные продольные неоднородности или слабая дисперсия даже одного из слоев структуры, которые не могут быть учтены при моделировании. Поэтому погрешность определения толщины слоев плоскостойких структур в реальной обстановке при диагностике на основе бистатических данных, может достигать 15...20 %, а электрофизических параметров в 20...30 % [1, 2, 3].

Метод поверхностного отражения. Моностатический способ обзора слоистых сред в отличие от бистатического менее чувствителен к горизонтальным изменениям электрофизических и геометрических параметров. Кроме этого, при таком способе отсутствует помеха от прямого сигнала, являющегося главным источником мощных помех. Обеспечивается минимальное расстояние при распространении сигналов, за счет чего можно увеличить динамический диапазон и глубину зондирования. С точки зрения приема, накопления и обработки данных, радар подповерхностного зондирования с моностатическим способом обзора слоистых сред является самым экономичным, что важно для оборудования, размещенного на борту воздушного судна вертолетного типа (ВСВТ) к которому предъявляются жесткие массогабаритные и энергетические требования. Подобный радар способен непрерывно накапливать данные и определять профили диэлектрической проницаемости объектов с горизонтальной скоростью 30 км/ч [1].

Изменение такого параметра как диэлектрическая проницаемость плоскостойкой среды от ее поверхности в глубину на расстояние равное минимальной длине волны радара подповерхностного зондирования, является гладкой функцией и для определения поверхностной диэлектрической постоянной зондируемого слоя используется модель полупространства, иначе – неоднородности нижнего полупространства – необходима более сложная модель.

В настоящее время, используется метод моностатической регистрации амплитуды отраженного от поверхности среды электромагнитного поля Surface Reflection Method – SRM [4] лишенный указанного ограничения, поскольку при оценке диэлектрической постоянной и регистрации данных поверхностной волны, как функции расстояния между приемной и зондирующей антеннами, параметры среды постоянны по интервалу расстояний приемник-передатчик.

Моностатический способ получения данных для оценки диэлектрической постоянной предполагает, что с помощью операции калибровки может быть получен коэффициент отражения от поверхности среды вычислением отношения амплитуд регистрируемых полей,

отраженных от поверхности среды и «бесконечного» металлического экрана находящегося на поверхности среды. Адекватной моделью экрана может служить металлический лист, ограниченных размеров, если обладает высокой проводимостью, размерами больше чем размеры «пятна» электромагнитного поля на границе поверхности на любой частоте диапазона, а отражения от краев экрана при использовании радаров подповерхностного зондирования могут быть наиболее просто стробированы во временной области. Антенна должна быть размещена на минимальной высоте над поверхностью среды, но достаточной, чтобы операция калибровки устраняла влияние эффектов распространения и передаточной характеристики приемопередающей антенны, модель которой эквивалентна элементарному источнику (Т-рупорная антенна с малым углом раскрытия при оценке поля излучения в дальней зоне).

Полагая, что простая модель с зондируемой средой содержит один слой с низкой проводимостью ($\sigma_c \approx 0$), коэффициент отражения может быть аппроксимирован коэффициентом отражения плоской волны, падающей по нормали к среде. В случае с несколькими однородными слоями, при толщине верхнего слоя больше, чем разрешение радара подповерхностного зондирования по глубине, с учетом приближения, во временной области оценку относительной диэлектрической проницаемости, ниже границы (верхнего слоя) среды можно представить в виде [1]

$$\varepsilon_r = \left[\frac{E_{PEC}(h,t) + E(h,t)}{E_{PEC}(h,t) - E(h,t)} \right]^2, \quad (1)$$

где $E(h,t)$, $E_{PEC}(h,t)$ – зарегистрированные сигналы, соответствующие электрическим полям, отраженным от поверхности среды и от металлического экрана, соответственно; t – время; h – удвоенная высота (расстояние) между эквивалентным точечным источником (фазовым центром) антенны и поверхностью среды.

Коэффициент отражения наиболее просто вычислить, используя максимальные пиковые амплитуды зарегистрированных сигналов, что сопровождается уменьшением влиянием шума, а уравнение будет (1) справедливо для любого момента времени.

В соответствии с уравнением (1), производится оценивание мгновенного значения сигнала, отраженного от поверхности среды, поэтому оно непригодно для определения диэлектрической проницаемости проводящей среды $\sigma_c \neq 0$.

Расширенная поверхностная модель отражения (Extended Surface Reflection Model – XSRM) в приближении плоской волны, использующая

зависимость коэффициента отражения от частоты, позволяет повысить точность оценки диэлектрической проницаемости и определения проводимости среды. Исходя из этого (1) для расчета относительной диэлектрической проницаемости и проводимости, в частотной области, примет вид

$$\tilde{\varepsilon}_r(\omega) - i \frac{\tilde{\sigma}(\omega)}{\omega \varepsilon_0} = \left[\frac{\tilde{E}_{PEC}(h, \omega) + \tilde{E}(h, \omega)}{\tilde{E}_{PEC}(h, \omega) - \tilde{E}(h, \omega)} \right]^2. \quad (2)$$

Вычисляя средние величины $\tilde{\varepsilon}_r(\omega)$ и $\tilde{\sigma}(\omega)$ получаем среднее значение на основании оценки (2). На основе дисперсионной модели диэлектрика (Коле-Коле или модели Дебая) [5, 6], можно получить более точную оценку, для описания относительной диэлектрической постоянной в котором используется комплексная функция. В развитии метода определения параметров среды, при регистрации отраженного поля, используется моделирование приемопередающей антенны эквивалентным диполем с последующей минимизацией квадрата нормы между моделируемыми и измеренными данными. Определение диэлектрической проницаемости и проводимости согласно (1) и (2) неправомерно в случае содержания в среде нескольких однородных слоев при толщине верхнего слоя меньше, чем разрешение по глубине радара подповерхностного зондирования, необходим иной подход для диагностики многослойных сред.

Рассмотрение и сравнение двух подходов решения обратных задач рассеивания (инверсии) рассмотрены в [7, 8]. В первом подходе, основанном на алгоритме инверсии при последовательном демонтаже каждого слоя (layer-stripping) среды, использующего в качестве исходных данных амплитуду и время задержки принятых радаром подповерхностного зондирования эхо-сигналов, после их обнаружения, регистрации и последующей оценки амплитуд отраженных сигналов. В этом подходе принято приближение плоской волны. Второй подход реализован на основе итерационных алгоритмов заключается в том, что электромагнитная инверсия и оценка параметров среды сводится к поиску минимума среднеквадратического отклонения между измеренными и смоделированными данными.

Полагается, что среда в пределах каждого слоя является однородной, непрерывной и независимой функцией поперечных координат, а границы раздела непрерывны. Очевидно, что точность инверсии параметров среды определяется стабильностью амплитуды сигнала, излучаемого радаром подповерхностного зондирования, особенностями структуры излучаемой волны, учетом характеристик распространения, определяемых

ослаблением в пределах слоев и отражением на их границах. Исходя из этого калибровка системы, компенсация эффектов распространения (например, учет ближней зоны, потери из-за проводимости среды, искажения зондирующего импульса и т.п.), становится крайне важным аспектом при практическом использовании радаров подповерхностного зондирования.

На Рисунке 1 представлена геометрия измерений для моностатического радара подповерхностного зондирования. Регистрируемый набор данных $r(x, t)$, включает амплитуду и время задержки принятых радаром подповерхностного зондирования эхосигналов в моменты $t_j = j\Delta t$ в точках $x_i = i\Delta x$. На основе алгоритмов решения обратной задачи определяется диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(x, z)$ слоистой среды на глубине z в точке с координатой x [1, 7]. Свести решение обратной задачи к одномерной позволяет моделирование слоистой средой продольную (вдоль OX) непрерывность среды.

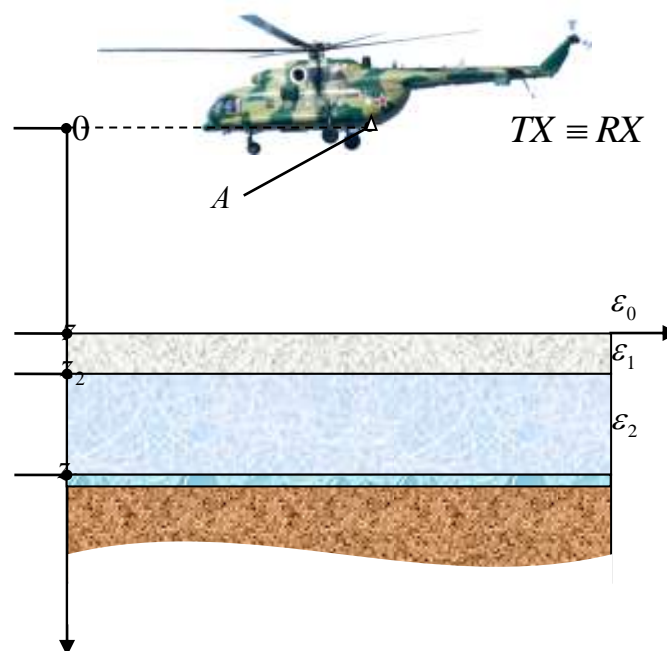


Рисунок 1 – Схема расположения антенны моностатического радара подповерхностного зондирования над местом посадки ВСВТ

Алгоритм инверсии при последовательном демонтаже слоев.
Алгоритм инверсии при последовательном демонтаже слоев [1, 7] заключается в обнаружении эхосигналов, обработке с оценкой временной задержки и амплитуд эхосигналов, отраженных от границ плоскостлой среды с последующим определением необходимых геометрических и

электрофизических параметров среды. Измеренный сигнал $r(x_i, t)$ радаром подповерхностного зондирования, представляет суперпозицию L_i импульсных эхо-сигналов, соответствующих L_i границам среды (или объектам):

$$r(x, t) = \sum_{l=1}^{L_i} a_l(x) s(t - \tau_l(x)) + n(x, t), \quad (3)$$

где $a_l(x)$, $\tau_l(x)$ – амплитуда и временная задержка эхо-сигнала, отраженного от l -й границы; $l = 1, 2, \dots, L_i$; $n(x, t)$ – аддитивный шум.

Характеристики тракта и антенны радара подповерхностного зондирования будут влиять на форму принятого сигнала $s(t)$ который отличается от излученного. Оценка $a_l(x)$ и $\tau_l(x)$ проводится полагая, что форма $s(t)$ известна, а $\tau_l(x) \leq T_i$ – ширина импульса, т.е. отраженные сигналы разделены во времени. Необходимо проводить дополнительные измерения для определения $s(t)$, помещая плоский металлический экран на известном расстоянии от антенны. Возникающие внутренние переотражения в тракте радара подповерхностного зондирования перед обработкой измеряют и компенсируют известными методами.

Амплитуда импульса пропорциональна коэффициенту отражения l -й границы $|a_l(x_i)| \leq 1$, а временная задержка соответствует этому слою, если $|\tau_l(x_i) - \tau_l(x_{i+1})| \leq T_s$, число слоев L_i может измениться при изменении продольной координаты x , но $L_i < L$ (максимального числа слоев).

Обнаружение отраженных сигналов и оценка амплитуды. Обнаружение эхо-сигналов известной формы в каждом местоположении x_i осуществляется на основе корреляционного приема либо согласованной фильтрации на фоне белого гауссова шума. Характеристика согласованного фильтра соответствуют форме импульса [7]

$$r^{(s)}(x, t) = \frac{1}{E_s} \int_0^T r(x, t + \xi) s(\xi) d\xi, \quad (4)$$

где $E_s = \sum_j s^2(t_j)$.

По расположению местных максимумов в (4) оценивается временная задержка отраженных эхо-сигналов в пределах выбранного временного окна T , а амплитуда максимумов, соответствует изолированным эхо-сигналам $r^{(s)}(x, \tau_l(x)) \approx a_l(x)$.

Наличие случайных малоразмерных неоднородностей – рассеивателей изменяют свойства реальной среды в пределах ее объема, определяемого размером «пятна» антенны на границе среды и продолжительностью регистрации импульсов. Для эхо-сигналов, регистрируемых за большие временные интервалы, соответствующие временному окну T , случайное распределение рассеивателей в облучаемом объеме снижает отношение сигнал/шум.

Полученные результаты обработки эхо-сигналов, направлены на повышение отношения сигнал/шум в согласованном фильтре, полученном на основе (4) и последующего усреднения в пределах изменяемого во времени и пространственного окна, размер которого L_x выбирается большим, чем интервал корреляции шумов:

$$r^{(s)}(x, t) = \frac{1}{E_s L_x} \int_{-L_x/2}^T \int_{-L_x/2}^{L_x/2} r(x - x_i, t + \xi) s(\xi) d\xi dx_i, \quad (5)$$

Линейно увеличивающейся со временем размер L_x обеспечивает приблизительное постоянство отношения сигнал/шум, однако, хотя его максимальное значение ограничено боковыми задержками эхо-сигнала, отличными от $\tau_l(x_i)$ при $|\xi| \leq T$.

Улучшение точности определения временной задержки $\tau_l(x)$ и амплитуды $a_l(x)$ дает дополнительная коррекция усреднения в пределах изменяемого во времени окна, возможна за счет временной задержки боковых обнаруженных эхо-сигналов предварительно определив профиль задержки $\tau_l(x)$ отраженного от l -й границы сигнала, а затем усреднив (5) для уточненного времени задержки $\tau_l(x)$ находят

$$r_l^{(s)}(x) = \frac{1}{E_s L_x} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} r(x - x_i, \tau_l(x) + \xi) s(\xi) d\xi dx_i, \quad (6)$$

Сигнал (6) на практике определяется после оценки временной задержки, что позволяет улучшить точность оценки амплитуды для l -й границы зная время $\tau_l(x_i)$ и $r_l^{(s)}(x) \approx a_l(x)$, и на основе полученных данных определяют диэлектрическую проницаемость и толщину слоев структуры.

Определении границ структуры. Определении границ структуры места посадки (МП) является важным этапом диагностирования, поскольку от этого будет зависеть возможность посадки ВСВТ.

При зондировании слоистой среды наблюдается большой объем регистрируемых данных, который требует эффективного анализа, определения ее структуры с целью отслеживания временной задержки от

границы раздела среды после обнаружения эхо-сигналов с наибольшей амплитудой в пределах окна поиска и предсказания временной задержки с помощью $\alpha - \beta$ следящего фильтра. Итерационно выполняется отслеживание многих границ среды. Каждая итерация соответствует прослеживанию только одной границы. При оценке временной задержки уже прослеженные границы в предыдущих итерациях удаляются с целью уменьшения объема вычислений.

В данном случае используется вероятностный подход для обнаружения, регистрации и последующего определения параметров многослойной структуры. На основе модели Маркова определена функция априорной плотности вероятности обнаружения отраженного импульса, которая определяет ее для данного обзора на основе ее предыдущих значений. Используя теорему Байеса, производят вычисления для текущего обзора. Повторяя этот подход последовательно для каждого слоя, удаляя эхо-сигнал каждого обнаруженного слоя из полного отраженного сигнала, его используют для многослойной среды. Процесс повторяется, пока не будут удалены все «известные» слои либо регистрируемый отраженный сигнал будет ниже порогового значения.

Заключение. В качестве основных недостатков представленного подхода можно отметить пропуск либо выбор несоответствующего эхо-сигнала. К большим погрешностям в определении диэлектрической постоянной структуры, а также погрешности оценки амплитуды, особенно, для более глубоких слоев может привести ложная тревога в обнаружении и прослеживании границ раздела [1]. Несмотря на указанные недостатки – это эффективная техника для профилирования слоистой среды, в особенности для случая обработки сигнала в режиме реального времени в радиолокационной системе посадки ВСВТ используемой для зондирования подстилающей поверхности при посадке на неподготовленную площадку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринев А.Ю., Темченко В.С., Багно Д.В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. Монография. – М.: Радиотехника, 2013. С. 21-38.

2. Машков В.Г. Модель диагностирования плоскостойких сред при посадке воздушного судна вертолетного типа / Машков В.Г., Малышев В.А., Стражник В.П. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Том 6 – № 3 (22). – С. 179-195
3. Proc. of the I-XIII International Conf. on Ground Penetrating Radar, 1986-2010.
4. Lambot S., Slob E.C., Van den Bosch I. Modeling of GPR for Accurate Characterization of Subsurface Electric Properties // IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. № 11. P. 2555-2567.
5. Kelley D.F., Destan T.J., Luebbers R.J. Debye Function Expansions of Complex Permittivity Using a Hybrid Particle Swarm-Least Squares Optimization Approach. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2007. V. 55, N 7. P. 1999-2005.
6. Uduwawala D., Norgren M., Fuks P. A complete FDTD simulation of a mill GPR antenna system operating above lossy and dispersive grounds // Progress In Electromagnetics Research, PIER 50, 2005. P. 209-229.
7. Rampa V., Spagnolini U. Multitarget Detection/Tracking for Monostatic Ground Penetrating Radar: Application to Pavement Profiling // IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing. 1999. V. 37. № 1. P. 383-394.
8. Spagnolini U. Permittivity Measurements of Multilayered Media With Monostatic Pulse Radar // IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing. 1997. V. 35. № 2. P. 454-463.

V.G. Mashkov, V.A. Malyshev
**MODEL PLANE-DIAGNOSING ENVIRONMENTS
BY SURFACE REFLECTION WHILE LANDING
AIRCRAFT OF THE HELICOPTER TYPE**

*Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»,
Voronezh, Russia*

The relevance of the study is due to the need to create a radar system for landing a helicopter-type aircraft on an unprepared site with the possibility sensing the underlying surface (landing site), determining the parameters and characteristics of plane-layered media and issuing information to the flight crew about the possibility landing or lack thereof. A variant using the midpoint method related to the bistatic diagnostic method is based on measurements the time delay between the direct wave and the subsurface layer reflected from the base, which is a function its thickness. The data obtained, under certain conditions, allow to restore the geometric and electrophysical parameters of the layered structure. However, there are a number of factors in the diagnosis of plane-layered media by bistatic methods, which make a significant contribution to the total error, especially due to a slight longitudinal heterogeneity, or a weak dispersion even one of the layers of the structure,

which cannot be considered in the simulation. Then, in the diagnosis real plane-layered structures based on bistatic data, the error in determining the thickness of the layers and electrophysical parameters increases. The variant using the method surface reflection related to the monostatic method layered media review is less sensitive to horizontal changes in electrophysical and geometric parameters and is the most economical in terms reception, accumulation and processing of data by subsurface sensing radars.

Keywords: plane-medium; subsurface sensing; landing of the helicopter; a landing place; an unprepared area.

REFERENCES

1. Grinev A.YU., Temchenko V.S., Bagno D.V. Radary podpoverhnostnogo zondirovaniya. Monitoring i diagnostika sred i ob"ektov. Monografiya. – M.: Radiotekhnika, 2013. С. 21-38.
2. Mashkov V.G. Model' diagnostirovaniya ploskosloistyykh sred pri posadke vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa / Mashkov V.G., Malyshev V.A., Strazhnik V.P. // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. – 2018. –Vol. 6 – No. 3(22). – S. 179-195
3. Proc. of the I-XIII International Conf. on Ground Penetrating Radar, 1986-2010.
4. Lambot S., Slob E.C., Van den Bosch I. Modeling of GPR for Accurate Characterization of Subsurface Electric Properties // IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No.11. P. 2555-2567.
5. Kelley D.F., Destan T.J., Luebbers R.J. Debye Function Expansions of Complex Permittivity Using a Hybrid Particle Swarm-Least Squares Optimization Approach. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2007. V. 55, N 7. P. 1999-2005.
6. Uduwawala D., Norgren M., Fuks P. A complete FDTD simulation of a mill GPR antenna system operating above lossy and dispersive grounds // Progress In Electromagnetics Research, PIER 50, 2005. P. 209-229.
7. Rampa V., Spagnolini U. Multitarget Detection/Tracking for Monostatic Ground Penetrating Radar: Application to Pavement Profiling // IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing. 1999. V. 37. No. 1. P. 383-394.
8. Spagnolini U. Permittivity Measurements of Multilayered Media With Monostatic Pulse Radar // IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing. 1997. V. 35. No. 2. P. 454-463.