

УДК [621.396.96+53.082.74]

В.Г. Машков, В.А. Малышев, В.П. Стражник

**МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД  
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 плоскослоистых сред и выдачи информации летному составу о возможности производства посадки либо отсутствия таковой. Штатные средства, установленные на воздушных судах вертолетного типа в настоящее время не способны обеспечить летный состав информацией о подстилающей поверхности (месте посадки) такой как глубина снега, толщина льда и др. соизмерив с фактической загрузкой и массой воздушного судна вертолетного типа. 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 плоскослоистых 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 плоскослоистых структур на основе бистатических данных погрешность определения толщины слоев и электрофизических параметров увеличивается.*

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

**Введение.** Великое русское изобретение радио русским ученым Александром Степановичем Поповым 7 мая 1895 года и начало освоения полетов на аппаратах тяжелее воздуха способствовало исследованиям, направленным на применение радиоэлектронных устройств на борту летательных аппаратов (ЛА).

Начиная с 20-х годов прошлого столетия, успешные попытки использования радиосвязной аппаратуры на борту позволили начать серийный выпуск самолетных радиосвязных станций.

Развитие воздухоплавания ставит перед учеными следующую задачу – определение местоположения ЛА с помощью радиосредств, решение

которой начинается с проведения экспериментов и заканчивается применением бортовой аппаратуры радионавигационных систем при решении боевых задач с 30...40 годов.

В 30-е годы проектируются первые импульсные радиолокационные станции (РЛС). В 40-е самолетные РЛС обзора воздушного пространства способствуют увеличению боевой эффективности самолетов-истребителей. В эти же годы создаются панорамные РЛС обзора подстилающей поверхности.

Начавшаяся в середине второго десятилетия разработка систем радиотелеуправления летательными аппаратами, привела к созданию серийной аппаратуры управления крылатыми ракетами на рубеже 30...40-х годов.

Развитие авиационной техники после второй мировой войны и принятие на вооружение реактивных самолетов подхлестнуло развитие бортовой военной радиоэлектроники расширяющей возможности авиации.

В настоящее время воздушные суда (ВС), в частности вертолеты, решают широкий круг тактических задач по уничтожению целей, ведения разведки, переброски по воздуху войск, грузов и т.д. Кроме этого решаются задачи навигации воздушного судна вертолетного типа (ВСВТ), прогноза погоды, контроля результатов выполнения боевых заданий, испытания систем оружия, оборудования и др. Эффективное решение перечисленных задач в современных условиях возможно только путем широкого использования радиоэлектронных средств (РЭС) [1].

Несмотря на достигнутые результаты, существуют условия, при которых использование приборов из-за большой погрешности измерений невозможно, но решение поставленных задач требует посадки ВСВТ на неподготовленные площадки.

Для примера, приведем особенности работы радиовысотомера А-037, представляющего собой радиолокационную станцию непрерывного излучения в дециметровом диапазоне длин волн (4200...4400 МГц) с частотной модуляцией, основанной на явлении отражения радиоволн от земной поверхности.

Радиовысотомер позволяет измерять высоты в диапазоне 0...750 метров с погрешностью на высоте:

$$H = 0...20 \text{ м} - \pm 2 \text{ м},$$
$$H = 20...750 \text{ м} - \pm 0,1H \text{ м}.$$

При полете на малых высотах над толстым слоем льда (снега) радиовысотомер может измерять высоту с большой ошибкой, т.к.

измерение высоты может происходить от нижней кромки ледяного (снежного) покрова. Высота до верхней кромки ледяного (снежного) покрова измеряется только при полетах над влажным или загрязненным льдом, или снегом. Поэтому при полетах на высотах менее 50 м над толстым слоем льда (снега) необходимо принимать меры предосторожности.

При полете на малых высотах над лесными массивами в зависимости от состава и плотности леса радиовысотомер может измерять высоту до верхней кромки крон деревьев (густой лес) или до земной поверхности (редкий лес). Поэтому при полетах над лесными массивами на высотах менее 50 м необходимо принимать меры предосторожности.

При полетах над горной местностью, когда резкие изменения высоты полета могут выходить за пределы диапазона измеряемых высот, радиовысотомером пользоваться не рекомендуется.

В горной местности радиовысотомер дает неустойчивые показания, т.к. является малоинерционным прибором, быстро реагирующим на изменения истинной высоты. Устойчивость отработки высоты радиовысотомером зависит от высоты полета и длины препятствий на маршруте, скорости измерения и отработки высоты на указателе и скорости полета.

С увеличением высоты препятствия (Н) и уменьшением его размеров (Д) стрелка указателя высоты не успевает обрабатывать изменения за время пролета препятствия. Чередование впадин и возвышенностей вызывает хаотические движения стрелки указателя. Чем выше скорость полета над пересеченной местностью, тем менее достоверны показания радиовысотомера.

При углах крена и тангажа более  $20^\circ$  погрешность измерения высоты полета увеличивается за счет влияния наклонной дальности. При углах крена и тангажа более  $40^\circ$  радиовысотомером пользоваться не рекомендуется [2].

Т. о. разработка посадочного радиолокатора позволит не только более точно измерять высоту при посадке ВСВТ до подстилающей поверхности, но и определение параметров многослойной подстилающей поверхности места посадки (МП) позволит принимать решение летному составу о возможности посадки ВСВТ на неподготовленную площадку в различных метеорологических условиях, как днем, так и ночью.

**Метод средней точки.** Метод средней точки (МСТ) относится к бистатическому методу диагностики, когда приемник *RX* и передатчик *TX* разделены в пространстве (рисунок 1), при этом прием и накопление

данных, отраженных от нижнего слоя среды, осуществляется при изменении расстояния между ними относительно средней точки  $p$  [3, 4].

Полагая, что МП ВСВТ это снег, лед, песок и т.д. плоские однородные слои, толщины и диэлектрические постоянные которых необходимо определить. При условии, что передающая (ТХ) и приемная (RX) антенны находятся на поверхности, а время прохождения луча относительно средней точки для однослойной среды толщиной  $h_c$  (рисунок 1), удовлетворяет уравнению

$$t_n(x) = \frac{\sqrt{x_n^2 + h_c^2}}{v}, \quad (1)$$

где  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ ,  $2t_n(x)$ ,  $2t_0(x)$  – время задержки при прохождении луча из исходной точки для конечного  $2x_n$  и нулевого расстояния между антеннами соответственно;  $v$  – скорость распространения волны в слое;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая постоянная;  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в воздухе.

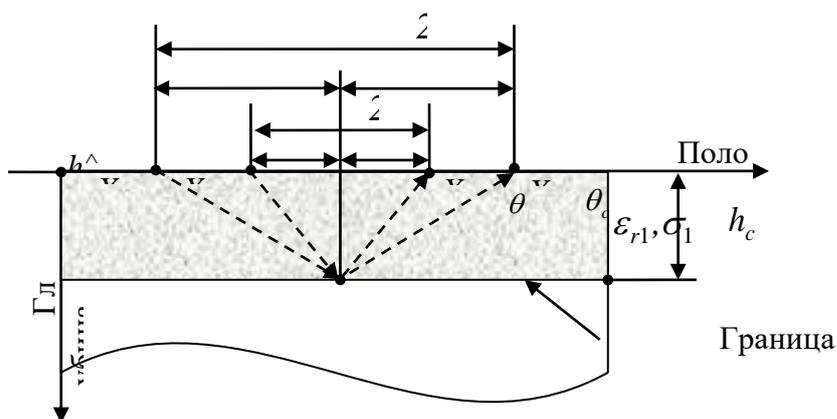


Рисунок 1 – Геометрия задачи для метода средней точки

Изменяя расстояние между передающей ТХ и приемной RX антеннами и регистрируя задержку, получаем переопределенную систему уравнений (1), решая которую, например, методом наименьших квадратов, определим скорость распространения  $v$  (диэлектрическую проницаемость) и толщину слоя  $h_c$ . Для диагностики многослойной среды, можно получить уравнение аналогично (1), а затем определить параметры МП решая полученную систему уравнений. При построении модели МП существенным является знание числа слоев в структуре. Данный метод

справедлив для относительно небольших интервалов измерения расстояний: при очень малых – существенным является влияние прямой поверхностной волны «звон» в тракте приемника, а также критичным является наличие тонких слоев в структуре МП. При больших расстояниях неадекватность традиционной модели распространения даже в однослойной среде, что приводит к неправильным результатам диагностики параметров МП [5]. Для увеличения точности измерений параметров при больших расстояниях между антеннами предложена другая математическая модель, включающая варианты с одним и двумя слоями. Где определены все направления распространения радиоволны в многослойной среде, определяемые на основе закона Ферма [3, 6]. Как показано на рисунке 2, две симметричные точки  $O_1$  и  $O_2$ , в которых луч проникает и выходит через границу тропосфера-поверхностный слой, координаты  $x$ , которых определены, используя принцип Ферма, при этом угол  $\theta_c$  соответствует критическому углу  $h_{c1}$  – глубина первой среды;  $h_{c1}^{\wedge}$  – верхняя граница первой среды;  $h_{c2}^{\wedge}$  – верхняя граница второй среды.

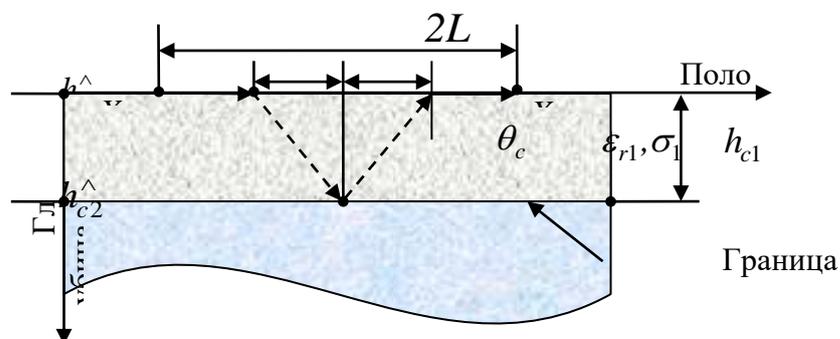


Рисунок 2 – Геометрия задачи для метода средней точки с одним и двумя слоями

Обозначая расстояние между антеннами  $2L$  электрофизические параметры слоя  $\epsilon_{r1}, \sigma_1$ , согласно геометрии (рисунок 2), время  $T(x)$  прохождения вдоль пути отраженного луча  $TX \rightarrow O_1 \rightarrow P \rightarrow O_2 \rightarrow RX$

$$T(x) = 2 \left( \frac{L - x}{c} + \frac{\sqrt{x^2 + h_c^2}}{v} \right) \text{ для } L > x, \quad (2)$$

$$T(x) = 2 \left( \frac{x - L}{c} + \frac{\sqrt{x^2 + h_c^2}}{v} \right) \text{ для } L \leq x. \quad (3)$$

Минимизируя  $T(x)$  относительно переменной  $x$ , получаем из (2):

$$x = \frac{h_c}{\sqrt{\left(\frac{c}{v}\right)^2 - 1}}. \quad (4)$$

Учитывая, что  $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_1}}$ , представим (4) в виде

$$x = \frac{h_c}{\sqrt{\varepsilon_1 - 1}}, \quad (5)$$

из (3) аналогично находим, что  $T(x)$  является возрастающей функцией и достигает минимума при  $x = L$ . Аналогичные соотношения получены при распределении лучей для двухслойной структуры, геометрия которой и характерные точки преломления траектории луча представлена на рисунке 3.

Представленный бистатистический метод диагностики параметров МП на примере новой модели одно- и двухслойной структуры продемонстрировал процедуру поиска путей распространения лучей (рисунок 2, 3) в зависимости от глубины и диэлектрической постоянной каждого слоя, что учтено в алгоритме вычисления параметров структуры [3, 6]. Где:  $h_{c1}$  – глубина первой среды;  $h_{c2}$  – глубина второй среды;  $h_{c1}^{\wedge}$  – верхняя граница первой среды;  $h_{c2}^{\wedge}$  – верхняя граница второй среды;  $h_{c3}^{\wedge}$  – верхняя граница третьей среды. А  $h_{c1}$  и  $h_{c2}$  определяются выражениями

$$h_{c1} = h_{c2}^{\wedge} - h_{c1}^{\wedge}, \quad (6)$$

$$h_{c2} = h_{c3}^{\wedge} - h_{c2}^{\wedge}. \quad (7)$$

Данный метод является частным случаем метода средней точки позволяющий повысить точность восстановления параметров по сравнению с традиционными особенно для многослойной структуры, содержащей относительно тонкий слой ( $h_c \ll L$ ).

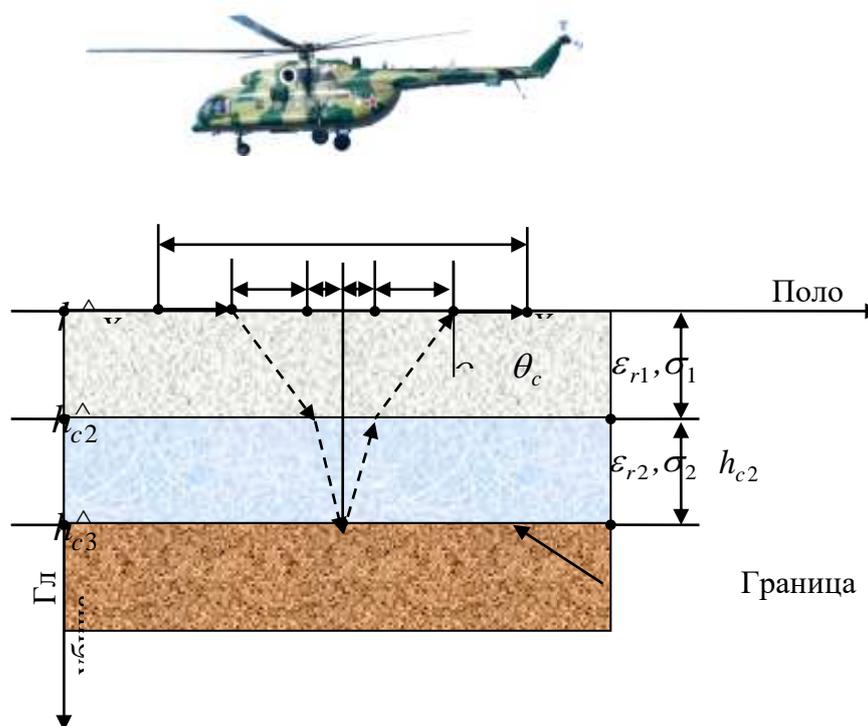


Рисунок 3 – Модель для двухслойной среды

К недостаткам бистатического метода можно отнести [3]:

- на достоверность результатов восстановления параметров (глубина среды, диэлектрическая проницаемость, скорость распространения) существенное влияние оказывает продольная неоднородность структуры слоев на интервале измерения;
- для определения числа слоев в структуре необходимо тщательное предварительное «профилирование среды», осуществляемое в моностатическом режиме зондирования. К существенной погрешности или неконтролируемой погрешности при восстановлении параметров слоя может привести ошибка типа «пропуск слабоконтрастного тонкого слоя»;
- для реальных структур, состоящих из трех и более слоев возникает сложность применения данного метода;
- с увеличением расстояния между передающей и приемной антеннами растет затухание, поэтому необходимо повышать мощность передатчика для компенсации;
- существенно снижается качество регистрируемых данных, используемых при восстановлении параметров структуры для слоев, обладающих высоким ослаблением, скорость в которых определяется согласно (4);

- незначительная продольная неоднородность и слабая дисперсия даже одного из слоев структуры приводит как к изменению траектории луча, так и к изменению формы регистрируемого сигнала;

- не учтена поляризация электромагнитного поля, ориентация приемной и передающей антенн при поиске путей распространения луча, а также структура слоистой среды, в зависимости от которых возникают особенности распространения Е- и Н- волн.

В свободном пространстве радиоволна обладает поперечной структурой, т.е. входящие в ее состав взаимосвязанные электрическое и магнитное поля перпендикулярны друг другу и направлению распространения. На рисунке 4 вектор  $\vec{E}$  характеризует в некоторый момент времени направление электрического поля волны, а вектор  $\vec{H}$  – направление магнитного поля волны, вектор  $\vec{P}$  показывает направление распространения электромагнитной волны [1].

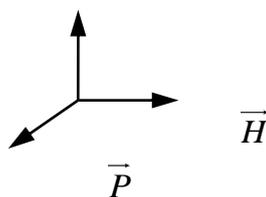


Рисунок 4 – Ориентация векторов напряженностей полей электромагнитной волны

Такая лучевая трактовка методов диагностики, реализующих бистатическую схему, представленная выше, полностью игнорирует влияние приемо-передающей (ПП) антенны и радиочастотного тракта радара подповерхностного зондирования и рассеянного сигналов, что также снижает точность определения параметров среды.

В работе [3, 7] рассмотрен один из подходов повышения точности измерения толщины и диэлектрической проницаемости на примере однослойной среды, основой которого являются процедуры калибровки, учитывающие влияние ряда факторов при регистрации и обработке данных радара подповерхностного зондирования: оценка фактической высоты  $h$  над средой или объектом и расстояние  $D$  между ПП антеннами при регистрации разности времени прихода прямого и отраженного сигналов  $\Delta t = t_1 - t_2$ ; оценка погрешностей регистрации амплитудного отраженного (рассеянного) сигнала от высоты ПП антенн, особенно в случае, когда среда или объект находится в ближней зоне.

*Калибровка приемо-передающих антенн.* При работе радара подповерхностного зондирования время прихода прямого  $t_2$  и отраженного объектом эхо-сигнала  $t_1$  связаны уравнением

$$\sqrt{h^2 + \frac{D^2}{4}} - \frac{x}{2} = \frac{(t_1 - t_2) c}{2} = \frac{\Delta t c}{2}, \quad (8)$$

где  $h$  – высота антенны над объектом;  $D$  – расстояние между антеннами;  $x$  – расстояние, пройденное прямой волной;  $c$  – скорость электромагнитной волны в воздухе.

Уравнение (8)  $t_1$  и  $t_2$  могут быть измерены при приеме сигналов, но значения  $h$  и  $D$  не могут быть замерены точно, так как координаты исходной точки излучения и конечной точки приема электромагнитного поля фактически неизвестны.

Знание этих величин необходимы как для измерения толщин и диэлектрической проницаемости плоскостойкой среды, так и формирования подповерхностного изображения объектов. Для определения  $h$  и  $D$  используется метод калибровки, при этом в качестве эталона используется металлических экран, расположенный на фиксированном расстоянии от антенны перпендикулярно направлению излучения электромагнитного поля. При различных высотах антенн  $h'_i$  регистрируют разность  $\Delta t_i = t_{1i} - t_{2i}$  время прибытия прямой и отраженной волн при фиксированном расстоянии  $D'$  между антеннами.

Эти параметры удовлетворяют следующим уравнениям:

$$\sqrt{(h'_i + \Delta h)^2 + \left(\frac{D'}{2} + \Delta D\right)^2} - \frac{x}{2} = \frac{\Delta t_i c}{2}, \quad (9)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – число проведенных измерений;  $\Delta h$  и  $\Delta D$  – погрешность измерения фактической высоты антенны и расстояния между ними, которые можно рассматривать как константы, исключая их случайный характер.

Используя (9) можно определить значения  $\Delta h$  и  $\Delta D$  из следующих уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{(h'_2 + \Delta h)^2 + \frac{D^2}{4}} - \sqrt{(h'_1 + \Delta h)^2 + \frac{D^2}{4}} = \frac{(\Delta t_2 - \Delta t_1)c}{2}, \\ \sqrt{(h'_3 + \Delta h)^2 + \frac{D^2}{4}} - \sqrt{(h'_2 + \Delta h)^2 + \frac{D^2}{4}} = \frac{(\Delta t_3 - \Delta t_2)c}{2}, \\ \vdots \\ \sqrt{(h'_N + \Delta h)^2 + \frac{D^2}{4}} - \sqrt{(h'_{N-1} + \Delta h)^2 + \frac{D^2}{4}} = \frac{(\Delta t_N - \Delta t_{N-1})c}{2}, \end{array} \right. \quad (10)$$

где  $\frac{D}{2} = \frac{D'}{2} + \Delta D$ .

Точность определения  $\Delta h$  и  $\Delta D$  существенно зависит от точности измерения разности  $\Delta t_i$  при калибровке, которая обеспечивается значительным уровнем сигналов, отраженных от металлического экрана.

Используя (10), мы можем получить зависимость фактической высоты антенн  $h_i = h'_i + \Delta h$  от  $\Delta t_i$ , затем осуществляя интерполяцию, строят кривую калибровки, используя которую определяют точное значение фактической высоты, антенны, вычисляя предварительно  $\Delta t$  при регистрации сигнала.

*Калибровка амплитуды поля отраженного сигнала.* При калибровке амплитуды поля эхо-сигнала для увеличения амплитуды рассеянного сигнала антенну радара подповерхностного зондирования располагают очень близко к среде или объекту. В этом случае должна быть учтена структура ближнего поля, которая существенно отличается от плоской волны, кроме того, энергия эхо-сигнала нелинейная по отношению к высоте антенны, но значение его амплитуды необходимо для расчета толщины и диэлектрической проницаемости среды или идентификации объектов. Осуществляя процедуру калибровки амплитуды  $A_{mi}$  эхо-сигнала при изменении высоты антенны, аналогично калибровке, рассмотренной выше, получают кривую калибровки – зависимость  $A_{mi}$  от  $\Delta t_i$ .

*Калибровка поверхностного слоя.* При калибровке поверхностного слоя для многослойной среды отраженные эхо-сигналы могут использоваться при определении толщины диэлектрической проницаемости каждого слоя. В частности, для слоя толщиной  $m$  разница во времени регистрации эхо-сигналов, отраженных от его поверхности и основания –  $\Delta t_2$ , при постоянной разности времени прихода прямого сигнала –  $\Delta t_1$ , определяется уравнением

$$\frac{\Delta t_2 c}{2\sqrt{\varepsilon}} = \sqrt{(h+m)^2 + \frac{D^2}{4}} - \sqrt{h^2 + \frac{D^2}{4}}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя.

Из уравнения (11) можно получить выражения для расчета толщины поверхностного слоя:

$$m = \sqrt{\left( \frac{\Delta t_2 c}{2\sqrt{\varepsilon}} + \sqrt{(h+m)^2 + \frac{D^2}{4}} \right)^2 - \frac{D^2}{4}} - h. \quad (12)$$

Высота  $h$  и расстояние  $D$  между антеннами измерены с учетом калибровок, представленных выше. Диэлектрическая постоянная оценивается выражением

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}}, \quad (13)$$

где  $A_1$  и  $A_m$  – амплитуда эхо-сигнала, отраженного от поверхности и металлического экрана при той же высоте антенны.

*Калибровка радара подповерхностного зондирования по известной толщине и диэлектрической проницаемости.* Уменьшить ошибку системы при последующих измерениях можно, если калибровку радара подповерхностного зондирования осуществлять по известной фактической толщине слоя  $m$  и  $\Delta t_2$ . Из уравнения (12) оценивают  $\varepsilon'$  слоя. Для этого после  $K$  измерений определяют среднюю диэлектрическую проницаемость

$$\bar{\varepsilon}' = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \varepsilon_i', \quad (14)$$

а затем толщину слоя оценивают как

$$m = \sqrt{\left( \frac{\Delta t_2 c}{2\sqrt{\bar{\varepsilon}'}} + \sqrt{h^2 + \frac{D^2}{4}} \right)^2 - \frac{D^2}{4}} - h. \quad (15)$$

В этом случае сначала определяют диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_i$  из уравнения (13), затем, используя фактическую толщину из уравнения (12), определяют диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_i'$ . Тогда коэффициент калибровки определяют в виде

$$k = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{\sqrt{\varepsilon_i}}{\sqrt{\varepsilon_i'}}, \quad (16)$$

который используют при последующих измерениях толщины  $m$ .

Данная процедура измерений и калибровки требует существенной доработки для многослойных сред. Главный недостаток обработки заключается в недооценивании диэлектрических констант подповерхностных слоев из-за пренебрежения потерями в среде, поэтому, оценивают толщину слоев больше истинного значения.

*Обобщенный метод калибровки.* Для повышения точности измерения толщины слоя и диэлектрической проницаемости многослойной среды в работах [3, 4] представлен обобщенный метод калибровки, основанный на последовательной послойной электромагнитной инверсии регистрируемых данных: амплитуда и временная задержка волны, отраженной от каждого слоя. Погрешность измерения амплитуды определяет непосредственно точность диэлектрической постоянной каждого слоя, а погрешности измерения временной задержки и диэлектрической постоянной определяют точность измерения толщины. Вначале используют единственный коэффициент калибровки для уменьшения погрешности измерения. Тогда

$$\sqrt{\varepsilon_1} = k_1 \frac{1 + \frac{A_0}{A_m}}{1 - \frac{A_0}{A_m}}, \quad h_i = \frac{c(t_{i+1} - t_i)}{2\sqrt{\varepsilon_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (17)$$

$$\sqrt{\varepsilon_i} = k_i \sqrt{\varepsilon_{i-1}} \frac{4\sqrt{\varepsilon_{i-2}\varepsilon_{i-1}} - \frac{A_{i-1}}{A_{i-2}}}{\varepsilon_{i-2} - \varepsilon_{i-1} + \frac{A_{i-1}}{A_{i-2}}} = k_i \sqrt{\varepsilon_{i-1}} \frac{X_i - Y_i}{X_i + Y_i} \quad (i = 2, 3, \dots, N), \quad (18)$$

где  $i$  – номер слоя;  $N$  – число слоев;  $A_0$  – амплитуда сигнала, отраженного от поверхности структуры;  $A_i$  – амплитуда отраженного от  $i$ -ого слоя;  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ -ого слоя;  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  – временная задержка между сигналами, отраженными от «верхних границ» ( $\hat{h}_{c1}$ ,  $\hat{h}_{c2}$ ,  $\hat{h}_{c3}$ )  $i+1$ -ого и  $i$ -ого слоев; остальное из (12) и (13).

Погрешность отношения амплитуд может быть эффективно уменьшена, а линейная погрешность разницы во времени в (15) может быть учтена калибровкой  $k_i$ . Такая калибровка позволяет эффективно учесть погрешности измерений параметров поверхностного слоя. Но для более глубокого,  $i$ -ого слоя, нелинейная погрешность измерений, в основном определяемая погрешностью регистрации амплитуды  $A_i$  в (18), не может быть эффективно уменьшена за счет простой линейной калибровки  $k_i$ .

Для более точного измерения толщины и диэлектрической проницаемости каждого слоя используют второй коэффициент калибровки  $f_i$ , чтобы калибровать нелинейные искажения амплитуды принятых волн. Тогда уравнения для определения диэлектрической проницаемости примут вид:

$$\sqrt{\varepsilon_1} = k_1 \frac{1 + f_1 \frac{A_0}{A_m}}{1 - f_1 \frac{A_0}{A_m}}, \quad (19)$$

$$\sqrt{\varepsilon_i} = k_i \sqrt{\varepsilon_{i-1}} \frac{X_i - f_i Y_i}{X_i + f_i Y_i} \quad (i = 2, 3, \dots, N), \quad (20)$$

где  $f_i$  и  $k_i$  коэффициенты для соответствующего слоя;  $f_i$  используется для уменьшения влияния убывания амплитуды поля, затухания в слоях структуры и отношения амплитуд, отраженных от границ;  $k_i$  – коэффициент калибровки линейной погрешности, но также играет роль коэффициента коррекции для погрешности временной задержки и погрешности оценки диэлектрической проницаемости.

Используя совместно коэффициенты калибровки, может быть получено более точное значение диэлектрической проницаемости каждого слоя и используя (15) можно определить толщину слоя. Точность определения  $\Delta h$  и  $\Delta D$  существенно зависит от точности измерения разности  $\Delta t_i$  при калибровке, которая обеспечивается значительным уровнем сигналов отраженных от металлического экрана. Получив зависимость фактической высоты антенны  $h_i = h_i' + \Delta h$  от  $\Delta t_i$ , осуществляя интерполяцию, строят кривую калибровки, с помощью которой определяют точное значение фактической высоты антенны.

Для определения коэффициентов калибровки необходимо знать достаточно большое количество данных (толщину слоя, амплитуды отраженных волн...). Для получения данных используют эталонные

образцы (керна) слоистой среды (снег, лед, песок...), предварительно тестируемое радаром подповерхностного зондирования, а полученные коэффициенты могут быть использованы для диагностики подобного покрытия.

Для калибровки единственного коэффициента требуется не меньше чем  $2N$  данных, для проведения калибровки двух коэффициентов необходимо не менее чем  $3N$  данных. Уравнения для ряда толщин и диэлектрической проницаемости слоев с учетом неизвестных коэффициентов, а его решение связано с определением параметров оптимизации, обеспечивающих минимум целевой функции, которая для метода двух коэффициентов может быть представлена:

$$O(k_1, f_1) = \sum_{j=1}^K \left[ H_{1,j} - \frac{C(t_{2,j} - t_{1,j}) \left( 1 - f_1 \frac{A_{0j}}{A_m} \right)}{2k_1 \left( 1 + f_1 \frac{A_{0j}}{A_m} \right)} \right]^2, \quad (21)$$

$$O(k_i, f_i) = \sum_{j=1}^K \left[ H_{i,j} - \frac{C(t_{i+1,j} - t_{i,j}) \left( \frac{4\sqrt{\varepsilon_{i-2,j}\varepsilon_{i-1,j}}}{\varepsilon_{i-2,j} - \varepsilon_{i-1,j}} + f_i \frac{A_{i-1,j}}{A_{i-2,j}} \right)}{2k_i \sqrt{\varepsilon_{i-1,j}} \left( \frac{4\sqrt{\varepsilon_{i-2,j}\varepsilon_{i-1,j}}}{\varepsilon_{i-2,j} - \varepsilon_{i-1,j}} - f_i \frac{A_{i-1,j}}{A_{i-2,j}} \right)} \right]^2, \quad (22)$$

где  $i=2, 3, \dots, N$ ;  $K$  – число выборок; индекс  $j$  – номер выборки;  $H_{i,j}$  – толщина слоя, измеренная для эталона (керн).

Толщину  $H_{i,j}$ , амплитуду  $A_{i,j}$  и временную задержку  $t_{i,j}$ , подставляют в целевые функции и на основе методов оптимизации определяют ее минимум функций. Используя (21), сначала определяют коэффициенты калибровки верхнего слоя, диэлектрическая проницаемость соответствующего слоя может быть получена из (18) и (19), затем на основе (22) определяют коэффициенты калибровки для более глубокого слоя.

**Заключение.** Указанные факторы при диагностике плоскостойких сред бистатическими методами, 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 погрешность определения толщины слоев, при диагностике на основе бистатистических данных, может достигать 15...20 %, а электрофизических параметров в 20...30 % [3, 8]. Но даже эти погрешности можно учесть при принятии решения на производство посадки воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную площадку либо о запрещении таковой, на основе полученных данных от радара подповерхностного зондирования (радиолокационной системы посадки) и допустимых параметров толщины плоскостойкой структуры (снег, лед и т.д.) для конкретного типа ВСВТ и фактической его загрузки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Франчук А.К. Авиационные радиоэлектронные системы: учеб. пособие / А.К. Франчук. – Сызрань: Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Сызрань), 2016. – 156 с.
2. Самойлов Ю.Б., Хизёв Г.Ю. Радиоэлектронное оборудование вертолетов. Радиоэлектронное оборудование вертолета Ми-8МТ: учеб. пособие: Ю.Б. Самойлов, Г.Ю. Хизёв. – Сызрань: Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Сызрань), 2017. – 114 с.
3. 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.
4. Pennock S.R., Redfern M.A. Multihead Configuration for Ground Penetrating Radar and Depth Determination // Proc. 11th International Conf. on Ground Penetrating Radar, June 19-22, 2006, Columbus, Ohio, USA.
5. Arcone S.A., P. PeaPles, L. Liu. Propagation of a ground-penetrating radar (GPR) pulse in a thin-surface waveguide // Geophysics. 2007. V. 68. P. 1922-1933.
6. Kao C., Li J., Wang Y. Measurement of Layer Thickness and Permittivity Using a New Multilayer Model From GPR // IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45, № 8. P. 2463-2470.
7. Huang C., Tao Yi. The Calibration Technology of Subsurface Penetrating Radar // Proc. 11th International Conf. on Ground Penetrating Radar, June 19-22, 2006, Columbus, Ohio, USA.
8. Proc. of the I-XIII International Conf. on Ground Penetrating Radar, 1986-2010.

V.G. Mashkov, V.A. Malyshev, V.P. Strazhnik  
**MODEL PLANE-DIAGNOSING ENVIRONMENTS  
DURING LANDING OF AN AIRCRAFT, THE HELICOPTER TYPE**  
*Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy named  
after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Воронеж, Россия*

*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 plane-layered media and issuing information to the flight crew about the possibility of landing or lack thereof. Regular means installed on helicopter - type aircraft are currently not able to provide the flight crew with information about the underlying surface (landing site) such as snow depth, ice thickness and so on commensurate with the actual load and weight of the helicopter-type aircraft. A variant using the midpoint method related to the bistatic diagnostic method is based on measurements of 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 the layers 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.*

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

## REFERENCES

1. Franchuk A.K. Aviacionnye radioelektronnye sistemy: ucheb. posobie / A.K. Franchuk. – Syzran': Filial VUNC VVS «VVA» (g. Syzran'), 2016. – 156 s.
2. Samojlov YU.B., Hizyov G.YU. Radioelektronnoe oborudovanie vertoletov. Radioelektronnoe oborudovanie vertoleta Mi-8MT: ucheb. posobie: YU.B. Samojlov, G.YU. Hizyov. – Syzran': Filial VUNC VVS «VVA» (g. Syzran'), 2017. – 114 s.
3. 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.
4. Pennock S.R., Redfern M.A. Multihead Configuration for Ground Penetrating Radar and Depth Determination // Proc. 11th International Conf. on Ground Penetrating Radar, June 19-22, 2006, Columbus, Ohio, USA.
5. Arcone S.A., P. PeaPles, L. Liu. Propagation of a ground-penetrating radar (GPR) pulse in a thin-surface waveguide // Geophysics. 2007. V. 68. P. 1922-1933.

6. Kao C., Li J., Wang Y. Measurement of Layer Thickness and Permittivity Using a New Multilayer Model From GPR // IEEE Trans, on Gescience and Remote Sensing. 2007. V. 45, № 8. P. 2463-2470.
7. Huang C., Tao Yi. The Calibration Technology of Subsurface Penetrating Radar // Proc. 11th International Conf. on Ground Penetrating Radar, June 19-22, 2006, Columbus, Ohio, USA.
8. Proc. of the I-XIII International Conf. on Ground Penetrating Radar, 1986-2010.