

# Перспективные радиолокационные технологии подповерхностного зондирования с борта летательного аппарата

В.Е. Туров, А.Н. Кренин, Е.М. Ильин, Е.А. Селянская

Рассматриваются технологии (методы) подповерхностного радиолокационного зондирования (ППРЛЗ) с целью обнаружения подповерхностных объектов с борта летательного аппарата. Выявлено и проанализировано четыре основных метода ППРЛЗ: на основе сверхширокополосных сигналов, на основе использования особой геометрии зондирования при угле падения зондирующего сигнала вблизи угла Брюстера, применение вращающихся антенн, зондирование на основе поляризационных резонансов.

*Ключевые слова:* подповерхностное зондирование, радиолокация, летательные аппараты, сверхширокополосный сигнал, вращающиеся антенны, угол Брюстера.

## 1. Введение

Одним из наиболее актуальных путей применения методов ППРЛЗ в военных целях является использование их для дистанционного обнаружения подповерхностных объектов. Наиболее перспективным подходом к решению такой задачи является применение методов ППРЛЗ в составе разведывательных комплексов на базе летательных аппаратов (ЛА), в том числе беспилотных. Рассмотрим существующие методы ППРЛЗ с точки зрения возможности базирования соответствующей аппаратуры на борту ЛА и возможности обнаружения подповерхностных объектов.

## 2. Метод ППРЛЗ на основе сверхширокополосных сигналов

Сверхширокополосные (СШП) сигналы используют с целью достижения высокой разрешающей способности при детектировании цели. Наиболее широко используемая система ППРЛЗ передает СШП сигнал сквозь поверхность и обнаруживает слабый сигнал обратного рассеяния от залегающей цели или целей. Возможность разрешения целей зависит от формы сигнала и метода обработки полученного отклика. В настоящее время имеется значительное количество публикаций по тематике применения СШП сигналов для ППРЛЗ.

Одним из наиболее известных устройств подповерхностного зондирования в целях детектирования близкорасположенных объектов является радиолокатор, построенный по бистатической схеме локации. Общим недостатком такого типа устройств является необходимость расположения радиолокатора в непосредственной близости к границе раздела сред, что в задаче разминирования и разведки нежелательно. Кроме того, для достижения необхо-

димого разрешения требуется уменьшать длительность импульсов зондирования, что сложно в реализации аппаратуры формирования и обработки сигналов.

В настоящее время исследования в области СШП ППРЛЗ ведутся в двух направлениях:

а) повышение разрешающей способности устройств зондирования с использованием более короткоимпульсных сигналов;

б) повышение точности распознавания объектов с использованием новых алгоритмов обработки эхо-сигналов.

Вопрос зондирования с помощью СШП-сигналов с поднятым над землей радиолокатором исследуется на уровне теории и математического моделирования, а также описания такого рода схем зондирования (с использованием самолётов, вертолётов, БПЛА в качестве носителя радиолокатора) приводятся в патентах [1, 2]. В патентах описана геометрия задачи при расположении радиолокатора на борту самолёта или вертолёта. Однако кроме коротковолновости предлагается использовать дополнительные параметры: падение зондирующего сигнала под углом Брюстера к разделяющей поверхности и использование вертикальной поляризации этого сигнала.

Первые упоминания о проведении экспериментальных исследований с использованием СШП-радиолокаторов для подповерхностного зондирования с борта ЛА встречаются в 2000 г. [3]. Были проведены работы по гуманитарному разминированию территорий в Косово с борта аэростата. Получены результаты по обнаружению мин, однако также в описании эксперимента говорится, что для получения нужного отклика от подповерхностных объектов был использован поляриметрический режим работы радиолокатора. Кроме того, описано, что для достижения необходимой глубины зондирования при поднятии радиолокатора над поверхностью мощность импульсов должна быть не менее 1 МВт.

В области повышения разрешающей способности устройств используют схемы с уменьшением длительности зондирующего импульса (порядка 1 – 5 нс. Описано достаточное количество экспериментальных образцов и конструктивных решений. В [4, 5] описан радиолокатор с длительностью зондирующего импульса 2.5 нс, проведены эксперименты и показано, что разрешающая способность по глубине составляет 10 см. В [6] описан радиолокатор с длительностью импульса 0.25 нс и шириной полосы от 1 ГГц до 5 ГГц по уровню 3 дБ. Особенности данного решения является применение восьмиканальной схемы зондирования, причём каждый канал организован на своей несущей частоте, и возможность работы в режиме полнополяриметрической локации. Благодаря применению поляриметрического режима работы удаётся определить ориентацию залегающего объекта и более точно детектировать тип неоднородности в приповерхностном слое. Однако известные экспериментальные исследования были проведены при расположении радиолокатора в непосредственной близости к границе раздела сред.

Таким образом, возможность использования радиолокаторов для подповерхностного зондирования с поднятого носителя связана с применением дополнительных свойств сигналов и иных методик зондирования и обработки данных.

### **3. Метод ППРЛЗ на основе применения эффекта, возникающего при угле падения зондирующего сигнала вблизи угла Брюстера**

В задаче детектирования объектов с помощью ППРЛЗ одной из проблем является наличие помехового эхо-сигнала поверхности и объектов, расположенных на поверхности. Для борьбы с этими помехами используется эффект, возникающий при падении зондирующего сигнала на поверхность раздела под углом Брюстера. Уменьшение помехового сигнала позволяет повысить точность идентификации объекта.

Рассмотрим данный эффект подробнее. Радиолокационные сигналы при подповерхностном зондировании объектов формируются в результате совместного влияния нескольких факторов: рассеяния на неровностях границы раздела воздуха и грунта; рассеяния на неоднородностях грунта; отражения от объекта, находящегося на глубине  $H_{\text{под}}$  поверхностью; дифракции и рассеяния волн на неровностях поверхности самого объекта  $G$  и т. д. (рис. 1).

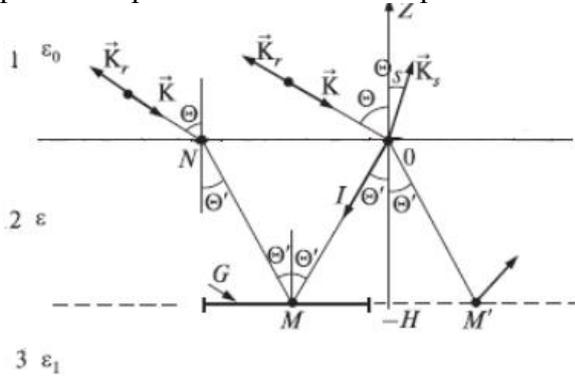


Рис. 1. Геометрия задачи при падении волны под углом Брюстера

Так как для подповерхностного зондирования используются дециметровые, метровые и более длинные волны, объёмным рассеянием можно пренебречь, поскольку размеры частиц фрагментов грунта и расстояния между ними намного меньше длины радиоволны. Для достаточно крупных и «гладких» (в масштабе длины волны) объектов  $G$  можно также пренебречь диффузным и дифракционным компонентами сигнала, рассеянного на  $G$ , ограничившись учётом только зеркально отражённых волн. Если в качестве

подповерхностного объекта выступает плоская граница раздела двух однородных сред, то удельное сечение обратного рассеяния от объекта  $G$  превышает сечение рассеяния на неровностях грунта в  $K$  раз. Коэффициент  $K$  называется коэффициентом контраста. Для горизонтальной поляризации зондирующего сигнала коэффициент контраста  $K_H$  имеет вид:

$$K_H = \frac{\sigma}{\sigma_s} = \left| \frac{1 + R_2}{1 + RR_2} \right|^4, \quad (1)$$

а для вертикальной:

$$K_V = \left| \frac{1 + R_2 + 2R_2 \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}}{(1 + RR_2)^2} \right|^2, \quad (2)$$

где  $R_2$  – экспоненциальный множитель,  $R$ ,  $R_1$  – коэффициенты Френеля отражения поляризованных волн от границ раздела сред. Из рис. 2 [4] видно, что значения коэффициента  $K_H$  слабо зависят от угла облучения  $\theta$ , в то время как  $K_V$  имеет глубокий минимум вблизи угла Брюстера  $\theta = \theta_B$ , где  $\sin^2 \theta_B = \varepsilon' / (\varepsilon' + 1)$ .

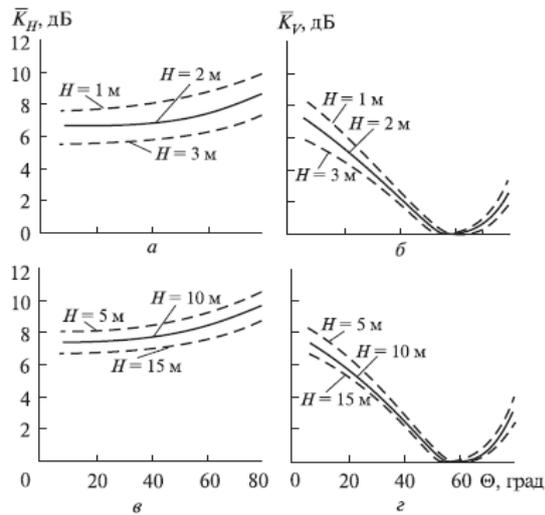


Рис. 2. Расчётные значения коэффициентов контрастов горизонтальной ( $\bar{K}_H$ ) и вертикальной ( $\bar{K}_V$ ) поляризации от угла падения  $\theta$ , при длине волны 0.23 м (а, б) и 2 м (в, г) для различных глубин  $H$  (тип почвы – песок)

отклик от протяжённого объекта, расположенного в Е-плоскости падения волны, в 21 раз превышает отклик от такого же объекта, расположенного в Н-плоскости. На основе полученных данных предлагается определённым образом подбирать ориентацию зондирующих антенн.

В [8] рассмотрены возможности применения описанной геометрии зондирования для случая обнаружения мин. Показано, что в реальных условиях выигрыш от использования сигналов с вертикальной поляризацией не достаточен, для того чтобы удовлетворить требованиям чувствительности существующих георадаров. Выходом из данной ситуации, по предложению автора, является использование поляризационной структуры отклика от мин для идентификации полезного сигнала и установления порога шума.

В патентах [9, 10] предложены система и способ ППРЛЗ с возможностью поднятия радара над поверхностью раздела сред. В обоих патентах предлагается использовать падение зондирующего сигнала под углом Брюстера. В качестве носителя для радара предлагается использовать ЛА (самолёт, вертолёт). В патенте [10], в отличие от патента [1], предлагается использовать два зондирующих сигнала, падающих под углом Брюстера: один с вертикальной, другой с горизонтальной поляризацией, что позволяет облегчить обработку эхо-сигнала и повысить контрастность эхо-сигналов от подповерхностных объектов.

#### 4. Метод ППРЛЗ с использованием вращающихся антенн

В традиционной технике подповерхностного зондирования часто пренебрегают векторной структурой поля. Однако поляризационная структура рассеянных от объекта волн несёт важную дополнительную информацию, которая может быть использована для классификации обнаруженных целей.

Для описания электромагнитной волны используется представление в виде вектора ортогонально поляризованных компонент:

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} \exp(j\omega t), \quad (3)$$

Такая зависимость уровня эхо-сигнала поверхности от угла падения сигнала и его поляризации даёт возможность получить более сильный отклик от залегающих предметов, используя вертикально поляризованную волну и зондируя под углом Брюстера.

В литературе описано несколько реализаций данного метода. В статье [7] проводится моделирование и экспериментальный анализ эхо-сигналов, получаемых при зондировании СШП-сигналами с различными поляризациями. Исследуется зависимость уровня эхо-сигнала от поляризации зондирующего сигнала и ориентации зондируемого объекта. Показано, что

где  $\omega$  – несущая частота сигнала,  $\dot{E}_x$ ,  $\dot{E}_y$  – комплексные амплитуды проекций на оси выбранной системы координат  $(x, y)$ , образующей поляризационный базис  $\{x, y\}$ . В радиолокации обычно используется вертикальная  $y = V$  и горизонтальная  $x = H$  поляризации. Как известно, отражённый от объекта сигнал  $\vec{E}_{ref}$  вида (3) связан с зондирующим сигналом  $\vec{E}_{in}$  комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМР)  $\dot{S}$ :

$$\vec{E}_{ref} = \dot{S}\vec{E}_{in}. \quad (4)$$

ПМР описывает отражательные свойства объекта на ортогональных поляризациях (например, горизонтальной и вертикальной):

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{HH} \exp(j\Psi_{HH}) & \dot{S}_{HV} \exp(j\Psi_{HV}) \\ \dot{S}_{VH} \exp(j\Psi_{VH}) & \dot{S}_{VV} \exp(j\Psi_{VV}) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При моностатической радиолокации  $\dot{S}_{HV} = \dot{S}_{VH}$ . В матрице (5) содержится вся информация об отражательных свойствах объекта при заданной частоте зондирования и фиксированном ракурсе наблюдателя.

Когерентная декомпозиция ПМР (5) основана на представлении ПМР собственными числами  $\lambda_1, \lambda_2$  и собственными векторами  $\vec{\zeta}_E$ , которые определяются характеристическим уравнением

$$\dot{S}\vec{\zeta}_E = \lambda\vec{\zeta}_E \quad (6)$$

и имеют вид

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \exp(j\psi_1) & 0 \\ 0 & \lambda_2 \exp(j\psi_2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\vec{\zeta}_E = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E \\ \sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_E \\ j \sin \varphi_E \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\theta_E, \varphi_E$  – поляризационные параметры собственной поляризации объекта. Физически собственные поляризации (8), соответствующие собственным числам (7) матрицы (4), характеризуются отсутствием в отражённом сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. При этом собственные числа  $\lambda_1, \lambda_2$  ПМР  $\dot{S}$  являются комплексными коэффициентами отражения объекта при зондировании его сигналами собственных поляризаций, а собственные вектора  $\vec{\zeta}_E$  (8), соответствующие собственным числам  $\lambda_1, \lambda_2$ , являются ортогональными по определению и образуют собственный синфазный ортогонально эллиптический поляризационный базис объекта. Два собственных числа поляриметрической матрицы рассеивания определяют поляриметрическую анизотропию цели и независимы от её ориентации.

Для получения информации о поляризационной матрице или её компонентах используется метод зондирования на основе вращения антенн. Метод чаще всего применяется с антенной системой в виде двух линейно поляризованных скрещенных диполей. Основным недостатком этого метода является необходимость механического вращения антенны и точная настройка угла поворота для того, чтобы точно определить ориентацию цели (рис. 3).

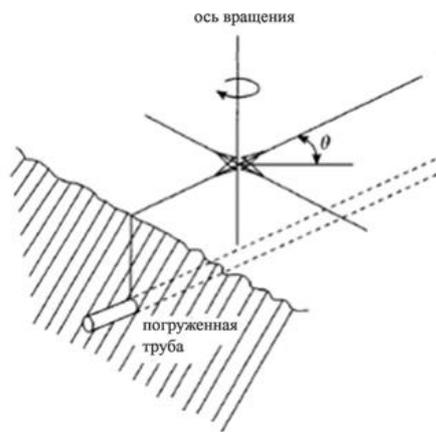


Рис. 3. К методу вращающихся антенн

Чтобы избежать описанных недостатков, некоторые исследователи предлагают применять вместо двух скрещенных диполей с линейной поляризацией одну антенну с круговой поляризацией. Это позволит получить деполаризационный ответ от цели без применения механического вращения. Однако круговая поляризация имеет место только в установившемся режиме, при котором передается импульс. Т.к. ППРЛЗ проводится с использованием импульсов длительностью не более 5 нс, достичь установившегося режима за это время сложно, и соответственно, применение антенн с круговой поляризацией очень затруднено.

Ещё одним методом для получения вращения поляризационной структуры поля является применение равноугольных спиральных антенн [10 – 12]. Из-за неоднородной структуры такой антенны происходит увеличение длительности импульса, сформированного такой антенной. Применение такого типа антенн для определения залегания трубопроводов на глубине не более 1 м показано в [10]. В [11] предложено реализовывать спиральную антенну как многоэлементную планарную структуру. Но всё же и при такой реализации не удаётся добиться строгой круговой поляризации поля, что, в свою очередь, вносит неточности в измеряемый сигнал и затрудняет обработку полученных при зондировании данных. В [12] для получения вращающегося вектора поляризации предложено использовать цилиндрическую спиральную антенну.

В соответствии с вышеизложенным, наиболее частым способом формирования электромагнитной волны с круговой поляризацией является использование двух ортогонально поляризованных волн с одинаковыми амплитудами и сдвигом фаз в  $90^\circ$ . У всех выше описанных схем есть один значительный недостаток: они не способны разрешить цели, которые вносят незначительный деполаризационный компонент в эхо-сигнал.

## 5. Метод ППРЛЗ на основе поляризационных резонансов

Ещё одним методом, возможным для применения в задачах подповерхностного зондирования, является метод ППРЛЗ на основе поляризационных резонансов. Метод описан в патенте [13, 14]. Основой метода является применение для зондирования сигналов с управляемым вращением вектора поляризации. В отличие от описанных выше методов с применением вращающихся антенн или вращающегося вектора поляризации, в данном методе на периоде зондирования скорость вращения вектора поляризации не остаётся постоянной. Для этого используют как минимум двухканальное радиопередающее устройство и особым образом сформированный зондирующий сигнал.

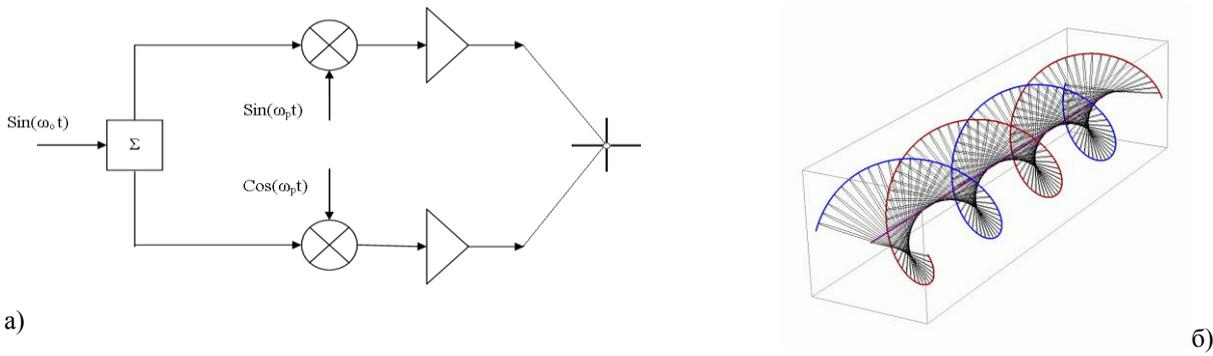


Рис. 4. Схема формирования сигнала с управляемым вращением вектора поляризации (а) и фрагмент трёхмерного представления формируемого поля (б)

Управление вращением вектора поляризации осуществляется путём формирования модулирующих сигналов (к примеру, напряжений) для двух каналов передающего устройства, которые и определяют частоту вращения вектора поляризации и её закон. Эти сигналы представляют собой пару когерентных гармонических колебаний и используются в радиопередающем устройстве для амплитудной модуляции колебаний несущей частоты в каждом из каналов. Одновременно колебания несущей частоты подвергаются фазовой манипуляции, осуществляемой синхронно с амплитудной модуляцией. При этом частота указанных модулирующих напряжений однозначно определяет частоту вращения вектора поляризации формируемого электромагнитного поля, а закон их изменения – закон изменения частоты вращения вектора поляризации.

В зависимости от стоящих задач несущая частота может принимать несколько фиксированных значений. При этом с увеличением значения несущей частоты глубина зондирования уменьшается, а разрешающая способность и точность определения геометрических и физических характеристик исследуемых структур – возрастают.

Зондирующий сигнал представляет собой пакет радиоимпульсов, который по мере распространения через некоторое время достигает  $i$ -ую структуру с электрической толщиной  $L_i N_i$ , значения составляющих которой (геометрическая толщина структуры  $L_i$ , диэлектрическая и магнитная проницаемости – показатель преломления  $N_i$ ) априори неизвестны и подлежат определению. При достижении частотой вращения вектора поляризации значения, при котором

$$L_i N_i = n_i \cdot \lambda_{ki} p / 2, \quad (9)$$

где  $\lambda_{ki}$  –  $k$ -ое резонансное значение длины волны вектора поляризации на  $i$ -ой структуре,  $n_i$  – количество длин полуволн, укладываемых на  $i$ -ой структуре, на  $i$ -ой структуре наступает структурно-параметрический поляризационный резонанс. При этом под структурно-параметрическим поляризационным резонансом понимается такое состояние, при котором на некоторой  $i$ -ой структуре в направлении распространения электромагнитной волны укладывается целое число длин полуволн вектора поляризации. Соотношение определяет условие наступления структурно-параметрического поляризационного резонанса на  $i$ -ой структуре.

Для обнаружения выявляемых структур для каждой точки местоположения производят сравнение вычисленных значений автокорреляционных и взаимокорреляционных функций с порогом, который устанавливается пропорциональным среднему значению мощности принятого сигнала, и определение значений частот наступления структурно-параметрического поляризационного резонанса и соответствующих времен запаздывания. Полученные значения являются исходными для расчёта глубин залегания, геометрических и физических характеристик (диэлектрической и магнитной проницаемости – показателя преломления, ко-

эффицента поглощения) выявленных структур. Показатель преломления  $i$ -ой структуры рассчитывают по формуле

$$N_i = \frac{1}{\Delta t_i \cdot F_{ki} P}, \quad (10)$$

а глубину ее залегания (толщину) – по формуле

$$L_i = d_i \frac{\Delta t_i}{\sqrt{\Delta t_i'^2 - \Delta t_i^2}}, \quad (11)$$

где  $d_i$  – текущее значение величины базы приёма,

$t_i, t_{i-1}, t_i', t_{i-1}'$  – времена запаздывания принятых сигналов относительно излученного для верхней и нижней границ  $i$ -ой структуры в режимах совмещенного и разнесённого приёма, соответственно;  $F_{ki} P, F_{(k-1)i} P$  – значения частоты вращения вектора поляризации, на которых для  $i$ -ой структуры наблюдается  $k$  и  $k-1$  резонансы, соответственно.

Показано, что в случае применения подобного типа сигнала в качестве зондирующего можно добиться увеличения глубины исследования до 6 км [14].

## 6. Заключение

Как видно из обзора, технологии подповерхностного зондирования являются актуальной и комплексной задачей. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Выявлены методы радиолокационного обнаружения подповерхностных объектов с борта летательного аппарата.
2. Известные методы базируются на зондировании в метровом диапазоне длин волн под углом Брюстера к поверхности, при этом используются:
  - подсветка наземным источником с использованием мощного (1МВт) сверхширокополосного сигнала;
  - поляризационная обработка с использованием специальных алгоритмов РСА;
  - эффект поляризационного резонанса.
3. Наиболее перспективными, с точки зрения размещения на БЛА, следует считать комплексный подход, сочетающий поляризационный резонанс на электромагнитных волнах с поляризационной модуляцией и специальные алгоритмы РСА.

## Литература

1. Патент РФ на изобретение № 2453864 «Радар формирования подповерхностного изображения», заявка №2008105899/07, 15.02.2008, опубл. 20.06.2012, бюл. №17.
2. Патент США №7528762 «Signal processing methods for ground penetrating radar from elevated platforms», дата публикации 01.02.2007.
3. MineseekerFoundation. KOSOVO TRIALS REPORT / Электронный ресурс [www.mineseeker.org](http://www.mineseeker.org), дата обращения 27.08.2014.
4. В.Н. Цымбал Применение радиофизических методов и средств для дистанционного обнаружения подповерхностных объектов с борта самолета-лаборатории / В.Н. Цымбал, С.Е. Яцевич, В.Б. Ефимов, А.С. Курекин, А.Я. Матвеев, А.С. Гавриленко, Д.М. Бычков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2010 – Т.7 - №4 – С. 274-284.

5. Development of a UWB GPR System for Detecting Small Objects Buried under Ground // Young-Kyung Jeong et al. Development of Ground Penetration Radar using Impulse Technology // APMC2005 Proceedings, 0-7803-9433-X/05/\$20.00 ©2005 IEEE.
6. A.G. Yarovoy Advances in Ground penetration radar for humanitarian demining // электронный ресурс <http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA02/papers/p0415.pdf>, (дата обращения 27.08.2014).
7. Vanderkruk, J., and Slob, E. C: Reduction of reflections from above surface objects in GPR data. Journal of Applied Geophysics 55 (2004) 271– 278.
8. Yarovoy, A Landmine and unexploded ordnance detection and classification with ground penetrating radar. In Harry. M.Jol (Ed.), 14. Ground penetrating radar theory and applications (pp. 445-479). Amsterdam/ Oxford: Elsevier Science.
9. Патент США №7528762 Signal processing methods for ground penetrating radar from elevated platform, дата публикации 01.02.2007
10. Scott H. E., Gunton D. J. «Radar detection of buried pipes and cables». Institution of Gas Engineers, 53rd Annual Meeting, London, UK, 1987, Communication 1345.
11. Anders R. «On the complete calculation of the equiangular spiral antenna». Proc. 20th Int. Symposium on Antennas and propagation, Japan, 1971, pp. 19-20.
12. К.Ф. Аджахунов, М.С. Ветошкин, И.В. Пичуев, В.Н. Татаринов Формирование излучения с вращающейся линейной поляризацией для РЛС с повышенной информационной способностью// электронный ресурс <https://gpo-conference.tusur.ru/conference/2012/themes/17>, (дата обращения 27.08.2014).
13. Патент РФ №2436130 «Способ и система радиолокационного зондирования земных недр», заявка: 2009140912/28, 06.11.2009, опубликовано 10.12.2011.
14. Адаптация метода георадиолокационной разведки к задаче комплексного геоэлектромагнитного 3D картографирования льдов, дна, донных отложений, структуры донных грунтов и полезных ископаемых на глубину до 6 км в условиях арктического бассейна с дрейфующих льдов и летательных аппаратов [Текст]: // Отчёт о НИР (промежуточ.) // ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»; рук. А.Н. Крнев; исполн.: Боровков Е.Ю. [и др.]. – Ярославль, 2013. – 183 с. – №ГР 01201360475. – Инв. № 02201362071.

*Статья поступила в редакцию 17.03.2015*

### **Туров Виктор Евгеньевич**

д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий инженер научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150050, Ярославль, ул. Яковлевская, д. 14, кв. 20), тел. 8(4852)72-51-53, e-mail: victorturov@gmail.com

### **Крнев Александр Николаевич**

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ, (150023, Ярославль, ул. Курчатова, д. 7, кв. 48), тел. 8(4852)72-51-53, e-mail: krenev@uniyar.ac.ru

### **Ильин Евгений Михайлович**

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик МГТУ им. Н.Э.Баумана (105077, Москва, ул. Средняя Первомайская, д. 17, кв. 45), тел. 8499 263-6846, e-mail: evgil45@mail.ru

**Селянская Екатерина Андреевна**

инженер I категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ, (150064, Ярославль, ул. Строителей, д.5, корп. 4, кв. 136), тел. 8(4852)79-77-72, e-mail: eselyanskaya@mail.ru

**Advanced radar technologies of subsurface sensing from the board of the aircraft**

**Victor E. Turov, Alexander N. Krenev, Eugene M. Il'yn, Catherine A. Selianskaia**

This paper considers methods of subsurface radar sensing to detect subsurface objects using aircrafts. Four main technologies were identified and analyzed on the basis of ultra-wideband signals, usage of special sensing geometry with the angle of signal incidence near Brewster angle, usage of rotating antennas as well as sensing based on polarization resonances.

*Keywords:* radar sensing, aircraft, Brewster angle, polarization resonances, UWB signal.