

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.7>

УДК: 621.396.96

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ ГЕОРАДИОЛОКАТОР НА БПЛА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

А.И. Баскаков¹, А.А. Комаров¹, М.С. Михайлов¹, Н.Д. Лучковский¹, Б. Одсурэн²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

² Институт физики и технологий Монгольской Академии Наук
13330, Монголия, г. Улан-Батор, проспект Мира, 546

Статья поступила в редакцию 5 мая 2023 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается реализация двухпозиционного георадара, расположенного на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и предназначенного для оперативного поиска подземных вод в засушливых и пустынных районах Монголии, что является чрезвычайно актуальной задачей. С помощью синтеза апертуры антенны георадара на БПЛА достигается существенное увеличение информативности по сравнению с существующими георадарами, поскольку появляется возможность получить панорамное радиолокационное изображение подповерхностных слоев зондируемой среды с требуемой разрешающей способностью при достаточно широкой полосе обзора. С другой стороны, необходимая оперативность (требуемая, например, при мониторинге обширных пустынных районов) может быть достигнута лишь при достаточно широкой зоне обзора, создаваемой на базе двухпозиционного принципа зондирования, где излучающий и принимаемый сигналы формируются и обрабатываются на разно- или равновысотных БПЛА, летящих с одинаковой скоростью и разнесенных ортогонально к направлению их движения, что дает возможность использовать квазизеркальное переотражение.

При этом полоса обзора будет заметно больше, чем в случае надирного зондирования. В сжатом виде статья рассматривает следующие вопросы: модель подповерхностного водоносного пласта, геометрия двухпозиционного георадара в квазизеркальном режиме зондирования, вплоть до особенностей синтеза апертуры (доплеровского сужения диаграммы направленности) приемной антенны, разрешающая способность, сравнение требуемого потенциала двухпозиционного георадара для надежного обнаружения водоносного подповерхностного горизонта по сравнению с однопозиционным георадаром.

Ключевые слова: двухпозиционный георадар, поиск подземных вод, синтез апертуры антенны, РСА, квазизеркальное рассеяние, подповерхностный водоносный горизонт, подповерхностный мониторинг при широкой зоне обзора.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерством культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-57-44001.

Автор для переписки: Комаров Алексей Александрович, KomarovALA@mpei.ru

Введение

На базе широко известных исследований [1-4] возникла уверенность в том, что осуществление космического двухпозиционного радара, использующего квазизеркальную область рассеяния СВЧ сигнала поверхностью не только возможно технически, но весьма целесообразно в практическом плане и выгодно экономически.

Очевидно, что данную технологию целесообразно исследовать и для применения в задачах панорамного георадиолокационного обзора подповерхностных структур различных сред с самолетов и БПЛА.

Причины такой уверенности следующие. Во-первых, предлагаемый «тандем» малых летательных аппаратов позволяет создать экономичную группировку из нескольких пар идентичных малых БПЛА, с целью организовать «беспропусковый» оперативный мониторинг поиска подземных вод в

засушливых и пустынных районах при малой повторяемости изображений. Объектами мониторинга в первую очередь являются подповерхностные водные ресурсы в засушливых районах. Во-вторых, данные явления будут наблюдаться при относительно большой для одной пары БПЛА ширине зоны обзора при достаточном пространственном разрешении и высокой чувствительности к наличию подповерхностных аномалий в грунте. В сущности, речь идет о создании двухпозиционного панорамного ГЕОРСА с требуемым пространственным разрешением.

Также необходимо отметить, что данная двухпозиционная геометрия мониторинга при геозондировании представляется более энергетически выгодной, поскольку появляется возможность использовать квазизеркальное переотражение по сравнению с активно разрабатываемыми в настоящее время однопозиционными РСА подповерхностного зондирования с различных летательных аппаратов [5-10].

1. Анализ модели подповерхностного водоносного пласта

В качестве грунтов, как среды распространения радиоволн, взяты типы почв, главенствующих в исследуемых районах. Особенностью почв засушливых и пустынных районов является то, что они имеют почти одинаковую диэлектрическую проницаемость, с лишь небольшим отличием удельного затухания из-за малого содержания воды. Для почвы в аридных зонах Центральной Азии чаще всего характерен следующий тип грунта: мелкоземы в верхних частях, а ниже – песчано-дресвяный грунт с отдельными мучнистыми крупными пятнами карбонатной пропитки и каменно-щебнистыми отложениями (рис. 1), а на поверхности в основном каменистый панцирь (рис. 2). Иногда могут встречаться песчаные участки [11-12].



Рис. 1. Профиль аридной почвы на красноцветных отложениях в Заалтайской Гоби в Монголии (справа видно отложение песка в трещине грунта)



Рис. 2. Каменистая пустыня (гамада) в Монголии на аридных территориях страны

Нас особенно интересует поиск подземных водных ресурсов в южных засушливых и пустынных местностях страны, в которых, во-первых, наземные водные ресурсы очень малы, во-вторых, именно из-за структуры почв, в которых преобладают слабо уплотненные песчаники, пески, рыхлые и плотные конгломераты, угли, алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы, имеющие малое значение удельного затухания для радиоволн. В этих районах водоносные слои ожидается обнаружить на глубине нескольких метров, что позволит использовать метод подповерхностного радиолокационного зондирования для поиска водоносных горизонтов [13]. Поскольку предстоит обследовать протяженные территории, предполагается установить георадар на БПЛА.

Для понимания характера переотраженного радиосигнала от водоносного горизонта, обратимся к моделям подповерхностных водоносных пластов из [13]. Водоносными пластами называются пласты земли, изобилующие пустотами и служащие для скопления воды. Смотря по характеру пустот, в которых

образуется, собирается и движется подводная вода, гидрогеологические и другие свойства водоносных пластов бывают различны.

Например, разница между грунтовыми и подземными водотоками иллюстрируется рис. 3.

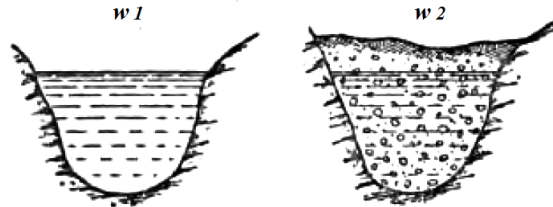


Рис. 3. Схематическое изображение разницы между подземным водотоком и грунтовой водой: $w1$ – подземный водоток с чистой водой, $w2$ – подземный водоток с грунтовыми водами

Если всё сечение канала $w1$ наполнено только водой, и канал этот лежит под землей, то мы имеем подземный водоток. Если сечение канала $w2$ наполнено песком, гравием или галькой, в которых движется подземная вода, то это грунтовая вода.

Рассмотрим три наиболее типичных модели подповерхностных водоемов, для которых характерно изменение диэлектрической проницаемости по глубине (рис. 4).

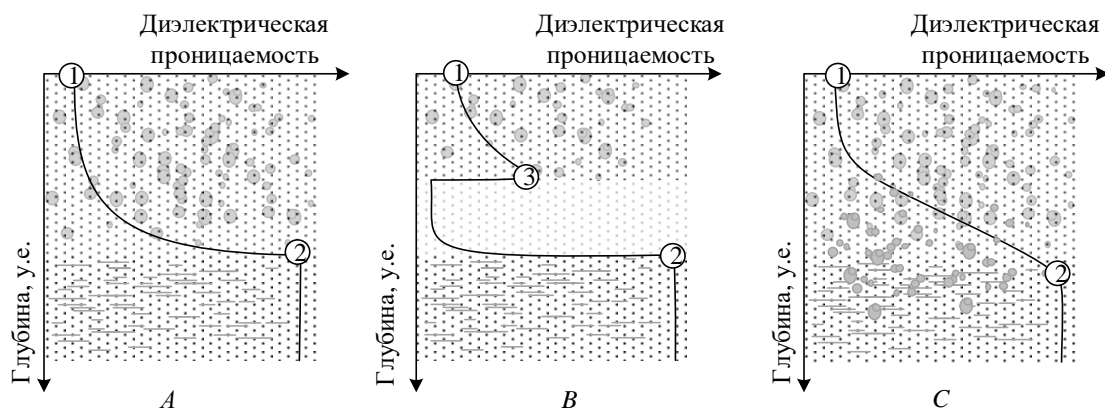


Рис. 4. Возможные типичные равновесные модели изменения диэлектрической проницаемости грунта: A – модель грунта с неполным водотоком канала, B – модель грунта с полным водотоком канала, C – модель с грунтовой водой

На рис. 4 сплошной линией показано возможное изменение диэлектрической проницаемости с глубиной, которое зависит от типа пород, составляющих грунт, от сезона, температуры и т. п. Как было указано выше,

значение диэлектрической проницаемости сухих грунтов различного типа почти одинаково и равно 2...3, поэтому в засушливых районах грунт можно считать однородным почти до уровня воды. Эту ситуацию можно было бы ожидать для большей части промежуточной зоны в грунте после длительного периода без дождя в засушливых районах. При этом профиль содержания влаги, который непосредственно оказывает влияние на значение диэлектрической проницаемости однородной почвы, будет находиться выше уровня воды.

Точка 1 на рис. 4 принадлежит поверхности Земли и для сухих грунтов диэлектрическая проницаемость почти всегда одинакова. На участке кривой с малой влажностью («сухая область» кривой) можно отметить почти постоянное низкое содержание влаги, связанное с начальным участком кривой диэлектрической проницаемости. Когда сечение канала *B* на рис. 4 частично заполнено водой, то между зеркалом водотока и водоупорным твердым грунтом возникает пустота, в которой значение диэлектрической проницаемости близко к 1. В точке 2 находится зеркало грунтовой воды и значение диэлектрической проницаемости составляет примерно 80.

Однако, характеристика влажности для почвы, имеющей более высокое содержание глины, может не иметь такой крутой характеристики и изменяться более плавно (рис. 4 А, С). Протяженный по глубине переходный слой, насыщенный влагой до зеркала воды, является согласующим, его диэлектрическая проницаемость плавно меняется и отраженный сигнал будет слабым, например, рис. 4 С. Плавные переходы между слоями грунта оказывают согласующее действие, что приводит к существенному уменьшению отражений на границах [14].

Таким образом, наличие достаточно толстого переходного экспоненциального (по изменению диэлектрической проницаемости) слоя приводит к потере радиолокационной информации о внутреннем строении рассматриваемой структуры. Наоборот, если существует весьма тонкий переходный слой, отражение радиоволн от рассматриваемой системы должно быть практически таким же, как и при отсутствии переходного слоя. Поэтому

для расчета энергетических характеристик двухпозиционного георадара будем рассматривать модель с полным водотоком канала, приведенную на рис.4 В. Именно в этом случае наиболее реально обнаружить подземный водоток, водное зеркало которого ничем не отличаются от зеркал водотоков поверхностных.

2. Геометрические соотношения при двухпозиционном зондировании подповерхностной среды

Геометрия зондирования подповерхностной среды (рис. 5) соответствует двухпозиционной системе, где оба БПЛА движутся с одинаковой скоростью по идентичным разно- или равновысотным траекториям, разнесенным ортогонально к направлению их движения.

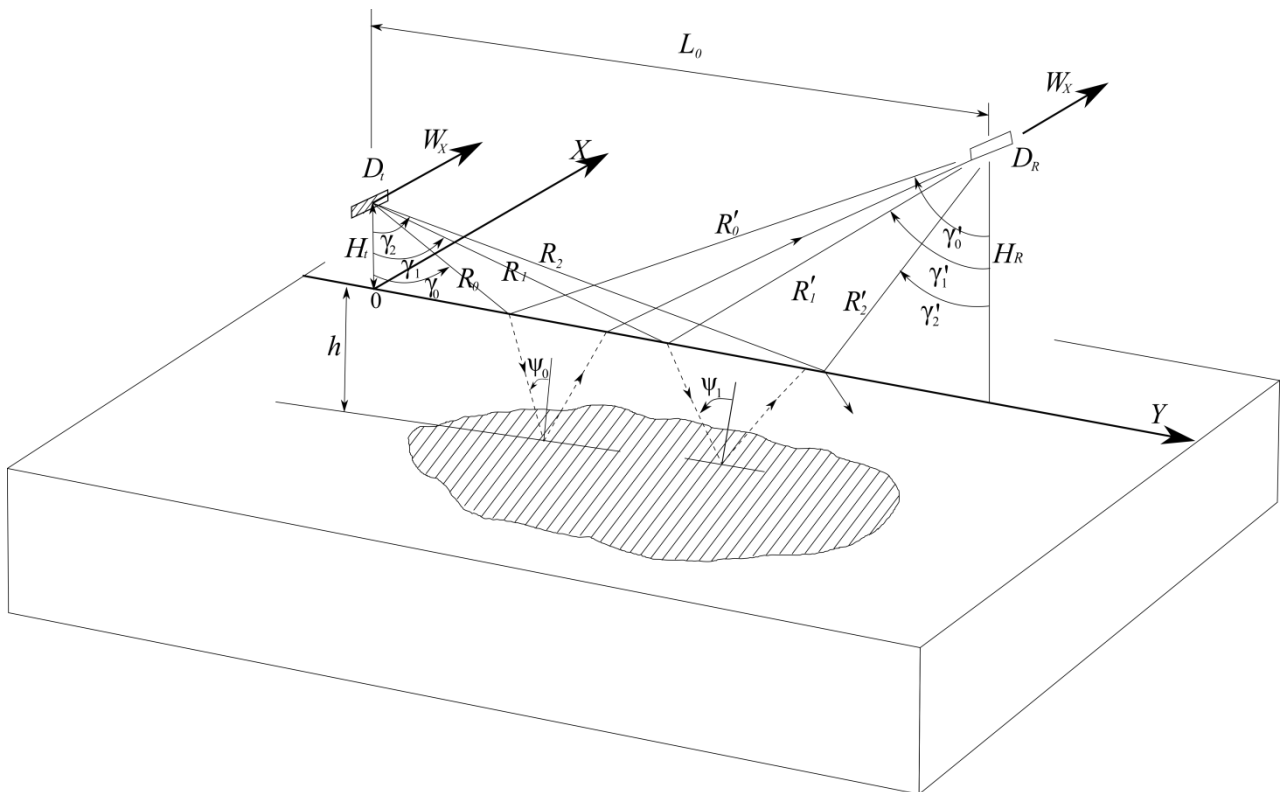


Рис. 5. Геометрия зондирования подповерхностной среды в двухпозиционном ГЕОРСА

Роль излучающего выполняет левый аппарат, на котором установлен передатчик и излучающая антенна D_L VHF диапазона частот. На правом (приемном) аппарате установлен ГЕОРСА с идентичной антенной, имеющей аналогичный горизонтальный размер D_R . Координаты поверхности отсчитываются от точки O , OX – ось движения БПЛА, OY – ось отсчета

горизонтальной дальности, H_t и H_R – соответствующие высоты БПЛА (в общем случае могут отличаться), h – глубина залегания водоносного слоя, L_0 – расстояние между аппаратами вдоль оси Y , γ_0 – зеркальный угол визирования, $2R_0$ – суммарная наклонная дальность в зеркальной точке (в случае равенства высот передающего и приемного БПЛА). При ориентации оси диаграммы направленности антенны (ДНА) в направлении γ_0 наименьший и наибольший углы визирования поверхности с обоих аппаратов составляют: $\gamma_0 - \Delta\theta_\beta/2$ и $\gamma_0 + \Delta\theta_\beta/2$, где $\Delta\theta_\beta$ – ширина ДНА в угломестной плоскости.

Для выбранной геометрии зондирования на приемную антенну приходят три категории сигналов: прямой радиосигнал I, поступающий на приемную антенну по кратчайшему расстоянию, радиосигналы II, рассеянные подстилающей земной поверхностью и квазизеркальный переотраженный радиосигнал III от подповерхностного водоносного горизонта (рис. 5).

Для VHF диапазона частот с максимальной частотой 300 МГц и минимальной длиной радиоволны $\lambda \geq 1$ м при анализе радиосигнала II воспользуемся, критерием гладкости поверхности, сформулированный Рэлеем: если разность хода лучей, рассеянных земной поверхностью (средний размер неровностей Δh) равна:

$$2\Delta l = 2\Delta h \cdot \cos \gamma,$$

то разность фаз рассеянных поверхностью лучей для гладкой поверхности не должна превышать:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta h \cdot \cos \gamma \leq \frac{\pi}{4}. \quad (1)$$

Другими словами, если разность фаз $\Delta\varphi$ мала, то рассеянные поверхностью лучи будут находиться почти в одной фазе, что характеризует гладкую поверхность. Тогда должно выполняться неравенство:

$$\Delta h \cdot \cos \gamma \leq \frac{\lambda}{16}. \quad (2)$$

Даже при значительном $\Delta h/\lambda$, но пологом падении лучей, поверхность обладает свойствами гладкой, удовлетворяющей условиям зеркального отражения. При среднем угле облучения поверхности $40^\circ \dots 50^\circ$ получим допустимый средний размер мелких неровностей поверхности $\Delta h \approx 10$ см, что выполняется для аридных территорий (рис. 2). Таким образом, радиосигнал II, отраженный от статистически мелкошероховатой земной поверхности, имеет превалирующую регулярную (квазизеркальную) компоненту и относительно небольшую рассеянную неровностями, диффузную составляющую. Радиосигнал III, переотражённый от подповерхностного водоносного горизонта, содержит квазизеркальную компоненту и очень слабую диффузную составляющую.

При оценке размеров участка ровной поверхности, эффективно участвующего в формировании отраженного сигнала в сторону приемной антенны D_R , пользуются законом Френеля. Метод построения зон Френеля при наклонном зондировании ясен из рис. 6 [15].

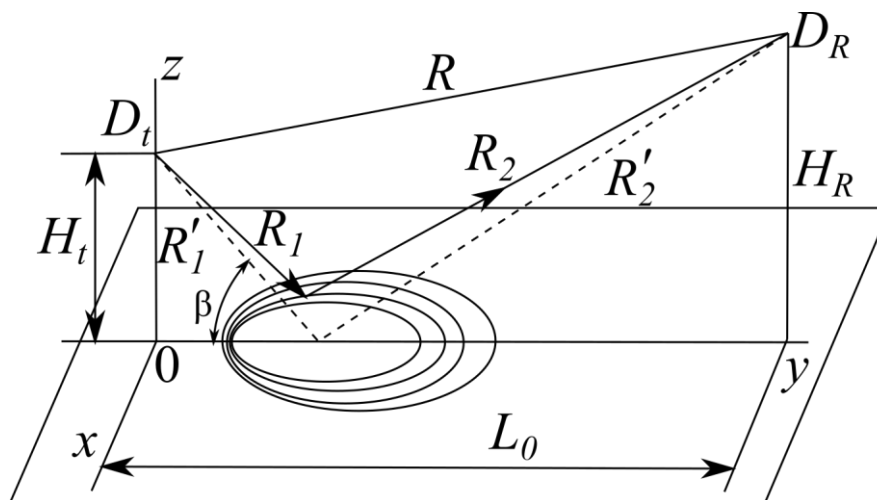


Рис. 6. Построение зон Френеля при наклонном облучении земной поверхности

Поле в точке нахождения приемной антенны D_R образуется прямой и отраженный от гладкой поверхности волнами (рис. 6). Для первой зоны разность хода лучей от центра зоны и до любой точки внутри зоны не превышает $\lambda/4$, что после отражения на границе зоны соответствует разности хода $\lambda/2$, т. е. сдвигу фаз на 180° . Остальные зоны строятся аналогично. Вследствие того, что сигналы, отраженные от этих зон, имеют разные знаки, происходит их взаимная частичная

компенсация и результирующий отраженный сигнал соответствует примерно половине формируемого первой зоной Френеля, что и определяет главную роль этой зоны.

Геометрическое место точек на плоскости xoy , для которых разность расстояний (а, следовательно, фаз) этих волн постоянна в точке D_R , определяется из равенства:

$$R_1 + R_2 - R = c.$$

Так как расстояние R постоянно, то:

$$R_1 + R_2 = R + c = \text{const},$$

что является уравнением эллипсоида вращения с фокусами в точках расположения D_t и D_R , так что на плоскости образуется семейство эллипсов. Если c увеличивается через $\lambda/2$, то средняя фаза колебаний от каждой соседней зоны, ограниченной эллипсом, отличается на π . Формулы для определения центра эллипсов y_{0n} , их больших y_{1n} и малых x_{1n} полуосей при известных H_t , H_R и $L_0 \gg c$ имеют вид:

$$y_{0n} = \frac{L_0}{2} \cdot \frac{n\lambda L_0 + 2H_t(H_t + H_R)}{n\lambda L_0 + (H_t + H_R)^2}, \quad (3)$$

$$y_{1n} \approx \frac{L_0}{2} \cdot \frac{n\lambda L_0 \sqrt{1 + 4H_t H_R / (n\lambda L_0)}}{n\lambda L_0 + (H_t + H_R)^2}, \quad (4)$$

$$x_{1n} \approx \frac{\sqrt{n\lambda L_0}}{2} \cdot \sqrt{\frac{n\lambda L_0 + 4H_t H_R}{n\lambda L_0 + (H_t + H_R)^2}}, \quad (5)$$

где номер зоны $n = 1, 2, \dots$

Отметим, что:

$$\frac{2H_t H_R}{L_0} \approx R'_1 + R'_2 - R,$$

причем R'_1 и R'_2 – расстояния от D_t и D_R до центра эллипсов (пунктир на рис. 6).

Эллипсы сужаются и удлиняются с уменьшением угла β .

На рис. 7 показаны изменения размеров больших и малых полуосей эллипсов первых трёх зон Френеля ($n = 1, 2, 3$) от расстояния между аппаратами вдоль оси Y при разных высотах полёта БПЛА.

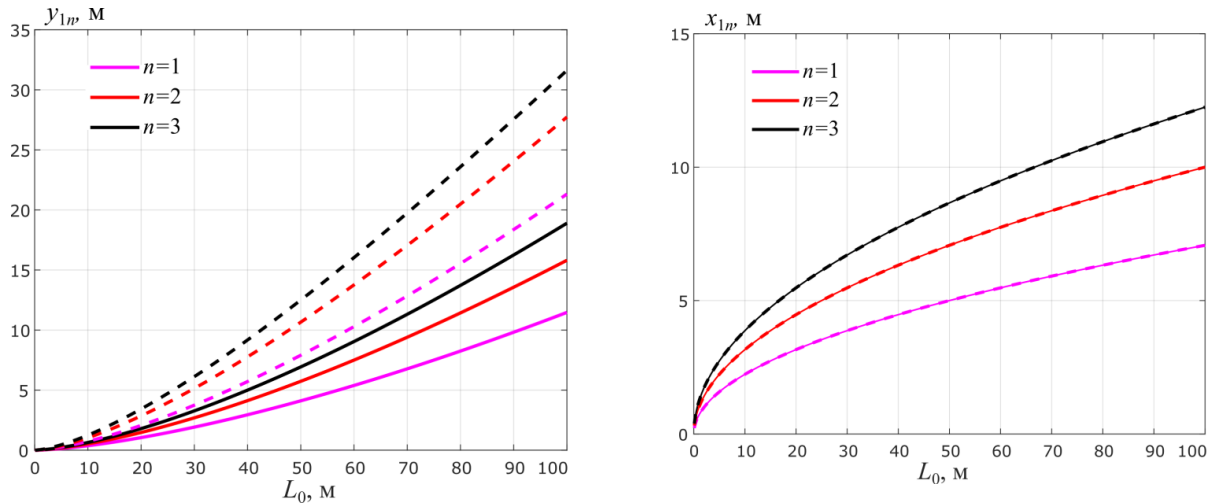


Рис. 7. Изменения больших (слева) и малых (справа) полуосей эллипсов зон Френеля ($n = 1, 2, 3$) от расстояния между аппаратами L_0 , $f_0 = 150$ МГц: сплошные линии – $H_t = H_R = 30$ м, штриховые линии – $H_t = H_R = 15$ м

На рис. 8 показано изменение размеров зон Френеля при существенной разнице высот БПЛА.

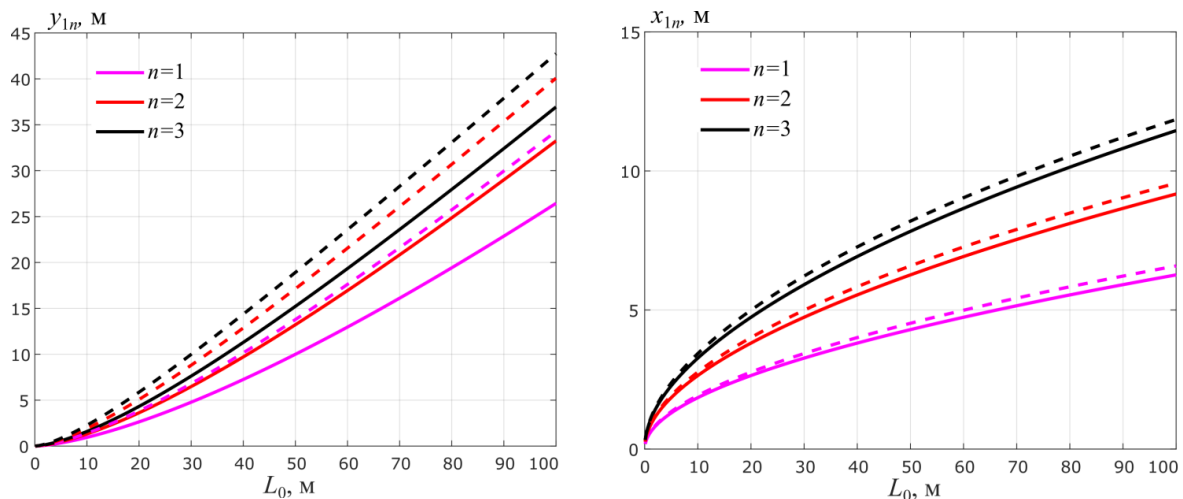


Рис. 8. Изменения больших (слева) и малых (справа) полуосей эллипсов зон Френеля ($n = 1, 2, 3$) от расстояния между аппаратами L_0 , $f_0 = 150$ МГц: сплошные линии – $H_t = 4$ м, $H_R = 15$ м, штриховые линии – $H_t = 3$ м, $H_R = 10$ м

В этом варианте передатчик достаточно большой мощности и передающая антенна могут быть установлены на движущемся автомобиле, а приемник – на параллельно летящим на небольшой высоте БПЛА.

На рис. 9 представлены вариации положения центров зон Френеля при заметной разнице высот БПЛА.

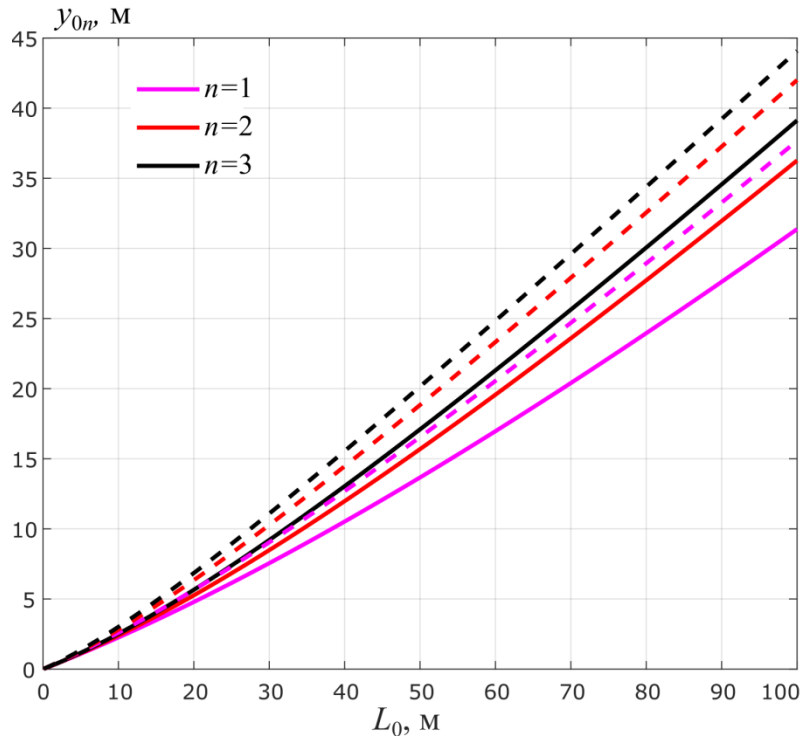


Рис.9. Вариации центров эллипсов зон Френеля ($n = 1, 2, 3$) от расстояния между аппаратами L_0 вдоль оси Y , $f_0 = 150$ МГц: сплошные линии – $H_t = 4$ м, $H_R = 15$ м, штриховые линии – $H_t = 3$ м, $H_R = 10$ м

Для понимания характера переотраженного радиосигнала III от подповерхностного водоносного горизонта обратимся к модели подповерхностного водоносного пласта с полным водотоком канала, приведенную на рис. 4 В. [14]. Соотношения, аналогичные (3)–(5), будут справедливы и для квазизеркального переотраженного радиосигнала III от подповерхностного водоносного горизонта (рис. 5) при условии, что H_t и H_R будут увеличены на величину h – глубину залегания водоносного слоя. При этом, если H_t и $H_R > h$, то изменение размеров подповерхностных зон Френеля будет незначительным.

3. Особенности несфокусированного синтеза апертуры приёмной антенны и достигаемая разрешающая способность

Так как антенны, применяемые при подповерхностном зондировании, характеризуются низкой направленностью, то при геозондировании шероховатой поверхности в метровом диапазоне возможны интенсивные паразитные отражения от отдельных крупных неровностей поверхности, находящихся вне облучаемой зоны Френеля. Эти отражения могут маскировать более слабые отражения от подповерхностных слоев.

Разрешающая способность георадара по продольной координате X определяется шириной луча антенны, который в свою очередь зависит от эффективной площади антенны, определяемой ее апертурой. Возможности повышения разрешающей способности по оси X увеличением геометрических размеров антенны для георадаров на БПЛА сильно ограничены, поэтому применяются методы синтеза апертуры, основанные на обработке отраженных сигналов, полученных при движении носителя радара над поверхностью вдоль трассы зондирования.

На рис. 10 показана геометрия облучения для расчета доплеровской частоты f_d от произвольной точки $A(x, y)$ на земной поверхности.

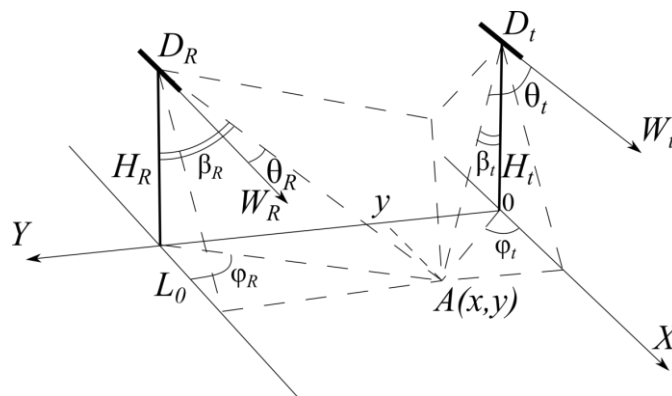


Рис. 10. К расчёту доплеровского сдвига от произвольного отражателя $A(x, y)$ на земной поверхности при двухпозиционном наклонном зондировании

Из геометрических построений на рис. 10 следует соотношение для расчёта доплеровской частоты[^]

$$f_d = \frac{1}{\lambda} (W_t \cos \theta_t + W_R \cos \theta_R), \quad (6)$$

где

$$\cos \theta_t = \cos \varphi_t \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta_t \right) = \cos \left(\arctg \frac{y}{x} \right) \sin \left(\arctg \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{H_t} \right), \quad (7)$$

$$\cos \theta_R = \cos \varphi_R \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta_R \right) = \cos \left(\arctg \frac{L_0 - y}{x} \right) \sin \left(\arctg \frac{\sqrt{x^2 + (L_0 - y)^2}}{H_R} \right). \quad (8)$$

На рис.11 показаны три характерных зоны на земной поверхности.

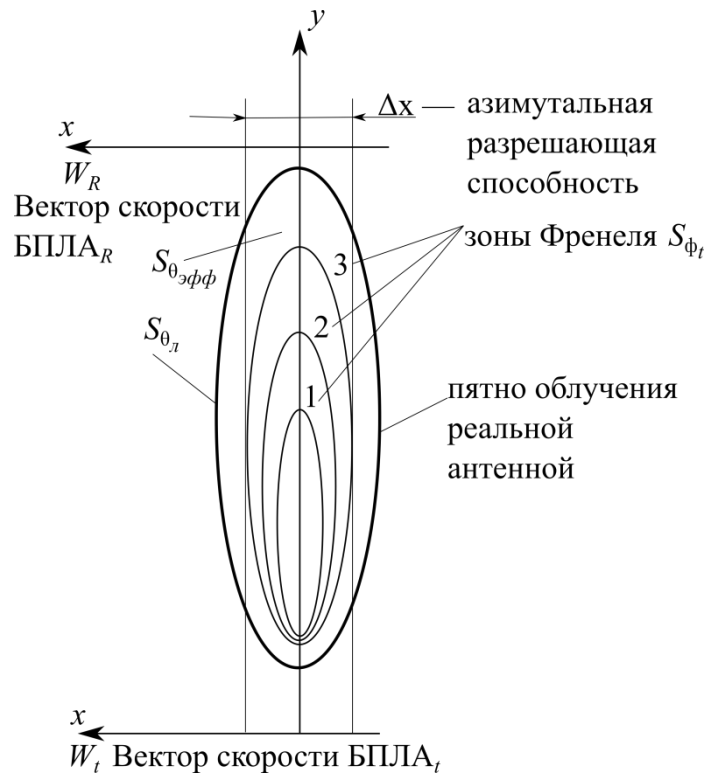


Рис. 11. Характерные зоны на земной поверхности: S_{θ_l} – пятно облучения, формируемое реальной антенной, определяемое реальной шириной диаграммы $\Delta\theta_l$; S_{ϕ_i} – зоны Френеля; $S_{\theta_{эфф}}$ – зона облучения, ограниченная в азимутальном направлении формируемой синтезированной эффективной диаграммой $\Delta\theta_{эфф}$ приёмной антенны

При этом эффективная ширина диаграммы в азимутальной плоскости $\Delta\theta_{эфф}$ получена доплеровским сужением диаграммы направленности приемной антенны.

Для организации георадара на борту БПЛА хорошо подходит алгоритм доплеровской фильтрации отраженных сигналов [16]. Влияние паразитных отражений от рельефа можно уменьшить фильтрацией низких доплеровских частот, при этом формируется $S_{\theta_{\text{эфф}}}$ – область, заключённая в пределах отражений, попадающих в пределы полосы доплеровского фильтра.

Конечно, под поверхностью все эти зоны несколько искажаются из-за эффектов фокусировки и расфокусировки в слоях грунта, однако, в первом приближении этими эффектами можно пренебречь.

Принцип сужения диаграммы ясен из рис. 12, где показаны графики изменения доплеровской частоты при движении БПЛА вдоль оси X и частотная характеристика фильтра нулевой доплеровской частоты.

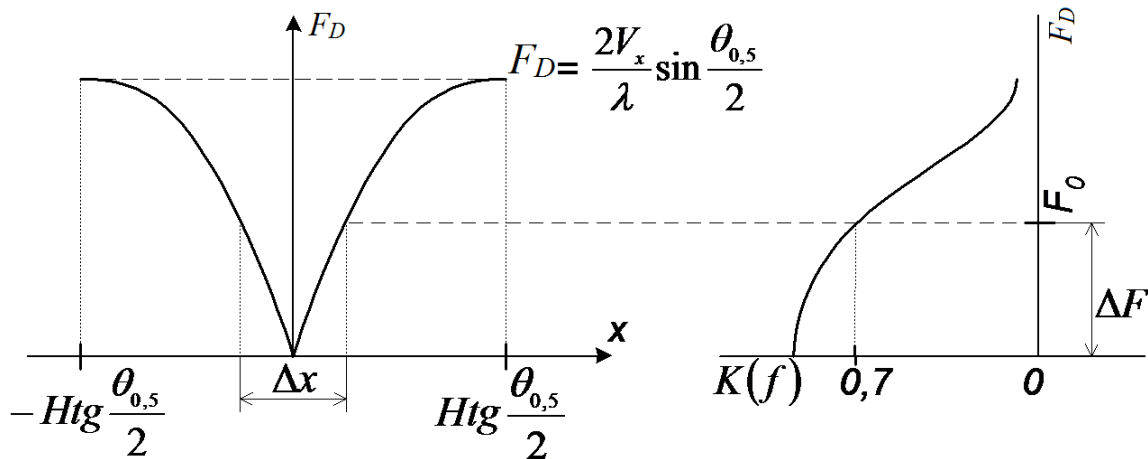


Рис. 12. График изменения частоты Доплера и полоса доплеровского фильтра

Фильтрация принимаемых сигналов, осуществляемая доплеровским фильтром с полосой пропускания $\Delta F \approx F_0$, ограничивает область приема сигналов, отраженных поверхностью зондируемой среды вдоль оси x , участком Δx . Это эквивалентно сужению диаграммы направленности используемой антенной системы в плоскости ZOX до значения:

$$\Delta\theta_{\text{эфф}} = 2 \arctg\left(\frac{\Delta x}{2R}\right) \cong \Delta x \frac{\cos \gamma}{H_R}. \quad (9)$$

В частности, азимутальная разрешающая способность Δx может быть выбрана сравнимой с малыми полуосями x_{1n} эллипсов n -ых зон Френеля

(соотношение (5)), от которых принимается зеркальная и более слабая диффузная компоненты отраженного радиосигнала II и радиосигнала III.

Для оценки требуемой полосы доплеровского фильтра был проведен расчет вариации доплеровской частоты на границах эллипсов $n = 1...3$ зон Френеля для скорости движения $W_t = W_R = 30 \text{ м/с}$; $f_0 = 150 \text{ МГц}$; при различном расстоянии между антеннами L_0 и высот передающего H_t и приемного БПЛА H_R . Результаты расчета показаны на рис. 13, 14.

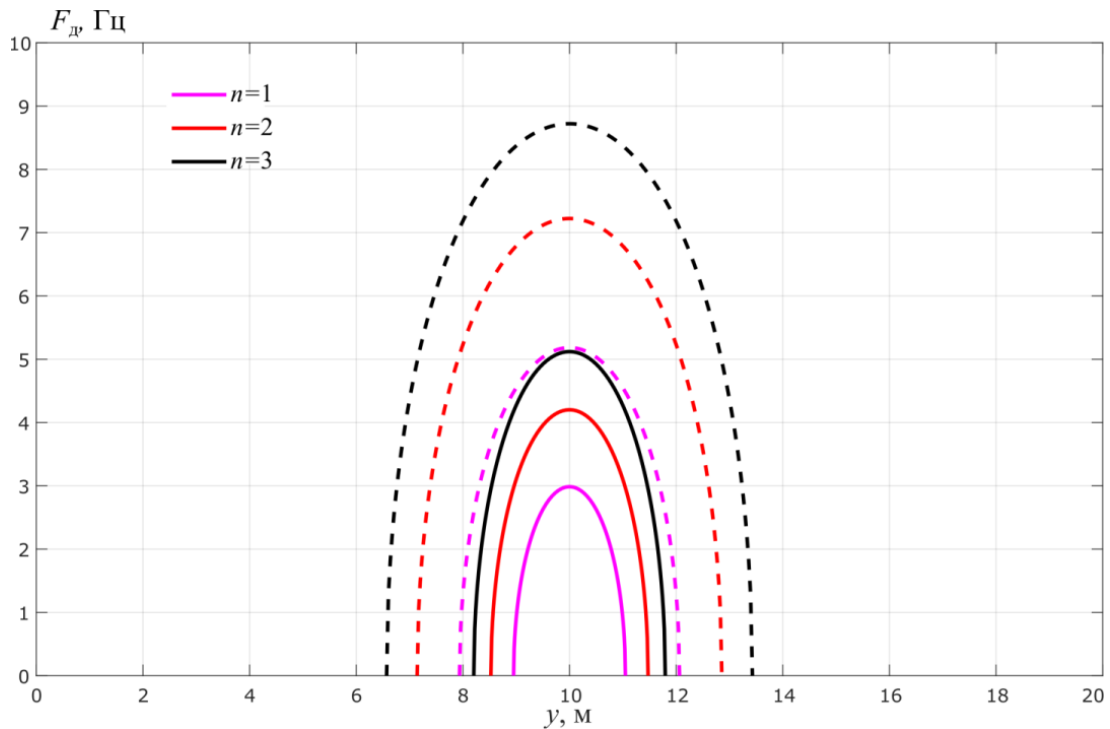


Рис. 13. Зависимость положительного доплеровского смещения частоты на границах эллипсов зон Френеля ($n = 1, 2, 3$) при расстоянии между антеннами $L_0 = 20$ м вдоль оси Y :

сплошные линии – $H_t = H_R = 30$ м,

штриховые линии – $H_t = H_R = 15$ м

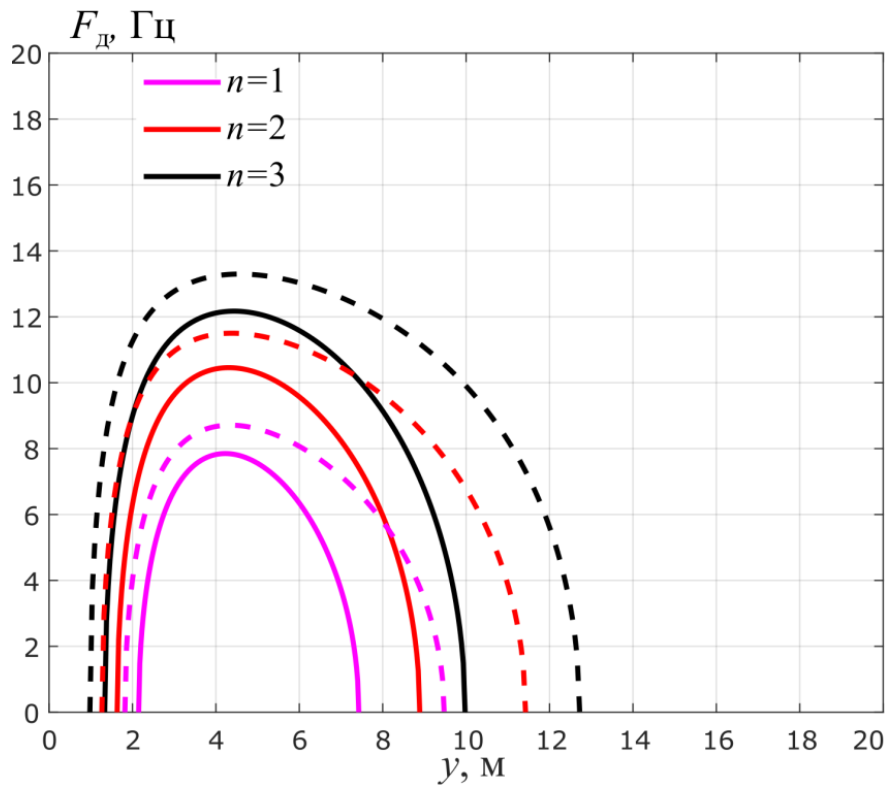


Рис. 14. Зависимость положительного доплеровского смещения частоты на границах эллипсов зон Френеля ($n = 1, 2, 3$) при расстоянии между антеннами $L_0 = 20$ м вдоль оси Y :

сплошные линии – $H_t = 4$ м, $H_R = 15$ м,
штриховые линии – $H_t = 3$ м, $H_R = 10$ м

При этом для расчетов по формулам (6)–(8) использована каноническая запись формы эллипса при известных из (3)–(5) значениях центров и осей эллипсов зон Френеля.

На рис. 13, 14 показаны значения только положительных доплеровских частот от участков поверхности по направлению движения от оси Y (для участков поверхности противоположных направлению движения от оси Y значения доплеровских частот аналогичны и отличаются только знаком).

Расчеты показали, что при скорости движения $W_x = 10 \dots 30$ м/с, $\lambda = 2$ м и диапазоне углов γ от 20° до 60° полоса ФНЧ будет составлять величину не более 15 Гц. Но при выборе полосы ФНЧ необходимо учесть, что представленные оценки будут работать только при идеальной ортогональности и одинаковой скорости движения БПЛА, иначе появившийся дополнительный доплеровский сдвиг приведет к заметному ослаблению сигнала на выходе ФНЧ.

Для успешной работы трассы обследования территорий группировкой БПЛА должны строго контролироваться и привязываться к координатам поверхности. Для этого существуют современные достаточно точные системы навигации и местоопределения.

4. Оценка разрешающей способности по горизонтальной дальности при двухпозиционном геозондировании

Известно, что разрешающая способность РСА по горизонтальной дальности для однопозиционного случая $\Delta y_{\text{одн}}$ определяется шириной спектра зондирующего сигнала Δf_c и углом визирования γ :

$$\Delta y_{\text{одн}} = \frac{c}{2 \cdot \Delta f_c \sin \gamma}. \quad (10)$$

На рис. 15 показана геометрия двухпозиционного геозондирования для получения необходимых соотношений разрешающей способности Δy .

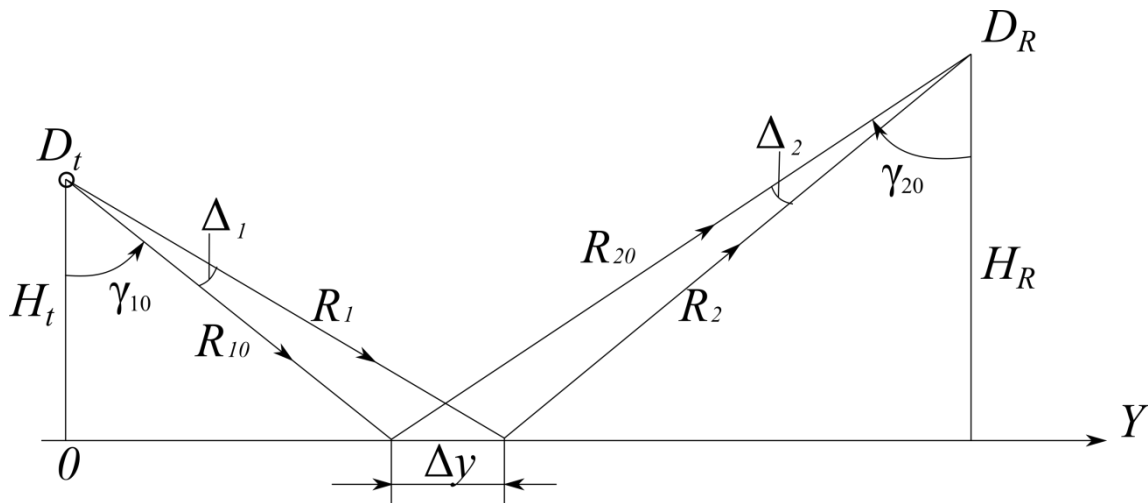


Рис. 15. Геометрия двухпозиционного геозондирования для получения необходимых соотношений при оценке разрешающей способности по горизонтальной дальности Δy

Разрешающая способность двухпозиционной бистатической системы РСА по горизонтальной дальности Δy существенно отличается от однопозиционной, для этого рассмотрим рис. 15, откуда следует исходное условие для определения:

$$(R_1 + R_2) - (R_{10} + R_{20}) = \frac{c}{\Delta f_c} = c\tau_{\text{сж}}, \quad (11)$$

где $\tau_{\text{сж}}$ – длительность сжатого импульса после оптимальной обработки в приемнике георадара.

Нетрудно показать, что наихудшая разрешающая способность по горизонтальной дальности Δy будет вблизи точки зеркального отражения зондирующего сигнала и заметно возрастать слева и справа от этой точки [16].

Рассмотрим случай $\gamma_{10} = \gamma_{20} = \gamma_0$. Тогда справедливы следующие соотношения, которые следуют из геометрии рис. 15:

$$R_{10} + R_{20} = (H_t + H_R) \sec \gamma_0, \quad (12)$$

$$R_1 + R_2 = H_t \sec(\gamma_0 + \Delta_1) + H_R \sec(\gamma_0 - \Delta_2), \quad (13)$$

$$\Delta_1 = \frac{\Delta y}{R_{10}} \sin \gamma_0 = \frac{\Delta y}{H_t} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0, \quad (14)$$

$$\Delta_2 = \frac{\Delta y}{R_{20}} \sin \gamma_0 = \frac{\Delta y}{H_R} \sin \gamma_0 \cos \gamma_0 \quad (15)$$

Подставляя выражения (12), (13) в (11), находим:

$$c\tau_{\text{сж}} = \frac{H_t}{\cos(\gamma_0 + \Delta_1)} + \frac{H_R}{\cos(\gamma_0 - \Delta_2)} - \frac{H_t + H_R}{\cos \gamma_0}. \quad (16)$$

Из соотношений (14), (15) следует, что:

$$\Delta_1, \Delta_2 \ll 1.$$

Тогда выражение (16) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} c\tau_{\text{сж}} &\approx \frac{H_t}{\cos \gamma_0 \left[1 - \frac{\Delta_1^2}{2} - \Delta_1 \operatorname{tg} \gamma_0 \right]} + \frac{H_R}{\cos \gamma_0 \left[1 - \frac{\Delta_2^2}{2} + \Delta_2 \operatorname{tg} \gamma_0 \right]} - \frac{H_t + H_R}{\cos \gamma_0} \approx \\ &\approx \frac{H_t}{\cos \gamma_0} \left(\frac{\Delta_1^2}{2} + \Delta_1 \operatorname{tg} \gamma_0 \right) + \frac{H_R}{\cos \gamma_0} \left(\frac{\Delta_2^2}{2} - \Delta_2 \operatorname{tg} \gamma_0 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Наконец, подставляем соотношения (14), (15) в (17) и находим:

$$\Delta y = \sqrt{\frac{2c\tau_{\text{сж}}}{\sin^2 \gamma_0 \cos \gamma_0} \frac{H_t H_R}{H_t + H_R}}. \quad (18)$$

В случае одинаковых высот полёта БПЛА ($H_t = H_R = H$) выражение (18) упрощается до:

$$\Delta y = \sqrt{\frac{c\tau_{сж}}{\sin^2 \gamma_0 \cos \gamma_0}} H. \quad (19)$$

Например, при:

- 1) $H_t = H_R = 15$ м; $L_0 = 30$ м; $\Delta f = 50$ МГц; $\gamma_0 = 45^\circ$, получим $\Delta y = 15,6$ м, при однопозиционном режиме зондирования РСА и при аналогичных исходных данных $\Delta y_{\text{одн}} = \frac{c\tau_{сж}}{2\sin \gamma_0} = 4,24$ м.
- 2) $H_t = 3$ м; $H_R = 10$ м; $L_0 = 30$ м; $\Delta f = 50$ МГц; $\gamma_0 = 23,42^\circ$, получим $\Delta y = 13,88$ м.

Следовательно, при всех, рассмотренных выше вариациях геометрии зондирования получили, что Δy заметно превышает размеры разрешающей способности для однопозиционного случая $\Delta y_{\text{одн}}$.

5. Методика расчёта требуемого энергетического потенциала двухпозиционного георадара для надежного обнаружения водоносного подповерхностного горизонта

Анализ энергетических характеристик принимаемого сигнала для различных условий функционирования радиолокатора подповерхностного зондирования является важным этапом проектирования и во многом определяет как выбор параметров георадара, так и значения его характеристик и показателей качества.

По сравнению с активно разрабатываемыми в настоящее время однопозиционными РСА подповерхностного зондирования с различных ЛА [5-10] предлагаемая двухпозиционная геометрия мониторинга при гео зондировании представляется более энергетически выгодной, поскольку появляется возможность использовать квазизеркальное переотражение подповерхностным водотоком. В геолокации, кроме значительного затухания сигнала в грунте, существует проблема априорной неопределённости электрофизических характеристик среды распространения. Как уже было

сказано выше, в случае сухого грунта, его диэлектрическая проницаемость почти для всех видов грунта является примерно одинаковой. Это обстоятельство позволяет нам считать грунт в засушливой и пустынной местности для зондирующего сигнала примерно однородным даже, если почва состоит из нескольких слоев. При этом целью зондирования является подповерхностный водоносный слой и для расчета энергетических характеристик двухпозиционного георадара будем рассматривать модель с полным водотоком канала, приведенную на рис. 4В. Именно в этом случае наиболее реально обнаружить подземный водоток.

Для расчета энергетических характеристик георадара рассмотрим геометрическую постановку задачи дистанционного зондирования, приведенную на рис. 5. Передающая и приемная антенны отстоят друг от друга в горизонтальной плоскости на расстояние L_0 и находятся на разно- или равной высоте H над поверхностью грунта. В качестве «цели» дистанционного зондирования будем рассматривать, расположенную на глубине h относительно верхней границы грунта, слабошероховатую водную границу с известными электрофизическими характеристиками.

Радиолокационное уравнение для подповерхностного зондирования учитывает всевозможные потери, которые могут возникать при распространении сигнала в грунте, такие как потери за счет расхождения фронта волны при зондировании и приеме радиосигнала на высоте H , потери на границах, потери в среде, потери из-за дефокусировки и т. д.

В рассматриваемом случае двухпозиционного дистанционного зондирования в диэлектрической среде с потерями уравнение радиолокации может записано в следующем виде [13]:

$$P_R = P_T \cdot G_{A1} \cdot g_1 \cdot \tilde{L}_{A1} \cdot \frac{\tilde{L}_{t1} \tilde{L}_{B1} \tilde{L}_{h1}}{4\pi R_1^2} \cdot L_{fk} \cdot \tilde{L}_{tg} \cdot \frac{\tilde{L}_{t2} \tilde{L}_{B2} \tilde{L}_{h2}}{4\pi R_2^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{A2}}{4\pi} \cdot g_2 \cdot \tilde{L}_{A2} \cdot L_{dfk}, \quad (20)$$

где P_T и P_R соответственно мощность передатчика и принимаемая мощность; G_{A1} , G_{A2} – коэффициенты направленного действия приемной и передающей

антенн, а g_1, g_2 – нормированные диаграммы направленности антенн (ДНА); $\tilde{L}_A = \tilde{L}_{A1} \cdot \tilde{L}_{A2}$ – потери в передающем и приемном антенно-фидерных трактах георадара; $\tilde{L}_t = \tilde{L}_{t1} \cdot \tilde{L}_{t2}$ – потери при распространении через слой воздуха; $\tilde{L}_B = \tilde{L}_{B1} \cdot \tilde{L}_{B2}$ – потери, связанные с отражением от границы раздела воздух-грунт-воздух и грунт-подземный водоносный отражающий слой; $\tilde{L}_h = \tilde{L}_{h1} \cdot \tilde{L}_{h2}$ – потери при распространении электромагнитной волны в грунте; \tilde{L}_{Tg} – потери, связанные с отражением зондирующего сигнала от границы водораздела двух слоев при дистанционном зондировании; L_{fk} – выигрыш из-за фокусировки при переходе границы раздела воздух-грунт; L_{dfk} – потери из-за дефокусировки при переходе границы раздела грунт-воздух. Наклонные дальности в первом приближении считаем равными:

$$R_1 = H_t \sec \gamma_{10}, R_2 = H_R \sec \gamma_{20}. \quad (21)$$

Потенциалом георадара принято называть величину:

$$p[\text{дБ}] = 10 \lg \left(\frac{P_T}{P_{R \min}} \right) = L_A + L_t + L_B + L_h - L_{fk} + L_{dfk} + L_{Tg}. \quad (22)$$

Если уравнение радиолокации представить в логарифмической форме, то суммарные потери в канале дистанционного зондирования выражаются в децибелах (дБ) [18,19]:

- потери в антенно-фидерном тракте георадара:

$$L_A = L_{A1} + L_{A2}, \quad (23)$$

- потери распространения:

$$L_t = 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^3 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 \cdot g_2} \right) \approx 10 \lg \left(\frac{(4\pi)^3 \cdot H_t^2 \cdot H_R^2 \cdot \sec^2 \gamma_{10} \cdot \sec^2 \gamma_{20}}{G_{A1} \cdot \lambda^2 \cdot G_{A2} \cdot g_1 \cdot g_2} \right), \quad (24)$$

- потери, связанные с отражением от границы раздела воздух-грунт-воздух (Вз-Гр) и грунт-подземный водоносный отражающий слой (Гр-Ос):

$$L_B = L_{B1} + L_{B2},$$

$$L_{B1} = -20 \lg R_{B3-\Gamma p}, \quad (25)$$

$$L_{B2} = -20\lg R_{\Gamma p-Oc} - 20\lg |1 - R_{B3-\Gamma p}^2|, \quad (26)$$

где $R_{B3-\Gamma p}$ – коэффициент отражения воздух-грунт; $R_{\Gamma p-Oc}$ – коэффициент отражения грунт-подземный отражающий слой; L_h – потери из-за затухания электромагнитной волны при распространении в среде с потерями на расстоянии $h \sec \psi_0$:

$$L_h = 10\lg \left(8.686 \cdot h \sec \psi_0 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon'(h)}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)} \right), \quad (27)$$

где ε' – вещественная часть диэлектрической проницаемости грунта, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь грунта, L_{fk} – выигрыш из-за фокусировки при переходе границы раздела воздух-грунт:

$$L_{fk} = 20\lg \left(\frac{H_t \sec \gamma_{10} + h \sec \psi_0}{H_t \sec \gamma_{10} + h \sec \psi_0 / \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}} \right), \quad (28)$$

L_{dfk} – потери из-за дефокусировки при переходе границы раздела грунт-воздух:

$$L_{dfk} = 20\lg \left(\frac{H_R \sec \gamma_{20} + h \sec \psi_0}{h \sec \psi_0 + H_R \sec \gamma_{20} \cdot \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}} \right). \quad (29)$$

Поскольку целью георадара является подземный отражающий слой, то потери, связанные с отражением зондирующего сигнала, учитываются потерями на границах.

Необходимо отметить, что требуемый потенциал двухпозиционного георадара ниже, чем потенциал однопозиционного РСА подповерхностного зондирования, т. е. двухпозиционная геометрия мониторинга при гео зондировании является энергетически более выгодной. Этот факт обусловлен разными условиями отражения от подповерхностной среды при двухпозиционном и однопозиционном наклонном зондировании [20].

Для однопозиционной РСА на БПЛА обратное подповерхностное рассеяние будет иметь диффузный характер. В случае бистатического зондирования РСА с разнесенными передатчиком и приемником, когерентность не нарушается, пока неровности не слишком велики. Например, если рабочая

частота 150 МГц (длина волны 2 м), а среднеквадратичные ординаты неровностей подземного водотока по модели B не велики, порядка $\sigma_h=2...3$ см. Тогда эффективность бистатического зондирования к однопозиционному, которое определяется разливием требуемых потенциалов РСА геолокаторов зависит от отношения коэффициентов отражения (рис. 16).

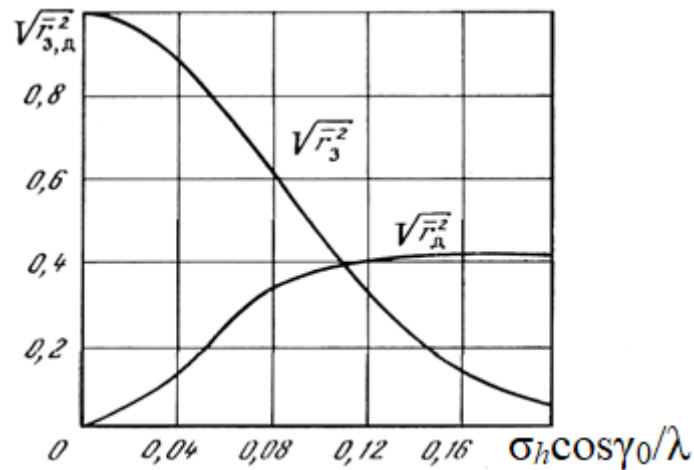


Рис. 16. Зависимость коэффициентов отражения для зеркальной (когерентной) и диффузной составляющих от угла падения и параметра неровностей [20]

Как видно из рис. 16, равенство зеркальной и диффузной составляющих имеет место при $\sigma_h \cos \gamma_0 = 0,11\lambda$. При двухпозиционном зондировании в VHF-диапазоне $\sigma_h \cos \gamma_0 < 0,04\lambda$.

Понятно, что для реализации требуемой энергетики двухпозиционного георадара желательно использовать радиолокационные сигналы сложной формы с достаточно широким спектром, при этом для минимизации уровня корреляционных шумов необходимы сигналы с чрезвычайно низким уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции, предложенные, например, в [21].

Заключение

- 1) Выбрана модель подповерхностного водоносного пласта, для которой реально обнаружить подземный водоток в засушливых районах с борта БПЛА.

- 2) Предложена геометрия двухпозиционного георадара в квазизеркальном режиме зондирования, с учетом особенностей синтеза апертуры (доплеровского сужения диаграммы направленности) приемной антенны и переменной разрешающей способностью по горизонтальной дальности.
- 3) Показано, что данная технология более эффективна при сравнении требуемого потенциала двухпозиционного георадара для надежного обнаружения водоносного подповерхностного горизонта с требуемым потенциалом однопозиционного георадара.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерством культуры, образования, науки и спорта Монголии в рамках научного проекта № 19-57-44001.

Литература

1. Потемкин Е.О., Кучерявенков И.А., Матюгов С.С., Павельев А.Г. Бистатическая радиолокация Земли с помощью спутников. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т.9. №4. С.37-46.
2. Масюк В.М., Калинин А.А., Короткий О.А. О возможности бистатической радиолокации земной поверхности. *Вопросы радиоэлектроники*. 2017. №6. С.6-10.
3. Юшкова О.В., Яковлев О.И. Анализ возможностей определения характеристик грунта Луны методом бистатической радиолокации. *Радиотехника и электроника*. 2017. Т.62. №1. С.26-34. <https://doi.org/10.7868/S0033849417010156>
4. Неронский Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2011. №11. С.5.
5. Калинин А.А., Кутуза Б.Г., Плющев В.А., Дручинин С.В. Возможности использования многочастотной РСА для послойного зондирования

- подстилающей поверхности. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2001. №11. С.31-39.
6. Суханов Д.Я., Якубов В.П. Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации. *Журнал технической физики*. 2006. Т.76. №7. С.64-68.
 7. Leuschen C., Goodman N., Allen C., Plumb R. An interferometric technique for synthetic aperture ground-penetrating radar. *1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Lincoln. NE. USA. 1996. V.4. P.2033-2035.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516879>
 8. Elsherbini A., Sarabandi K. Image Distortion Effects in SAR Subsurface Imaging and a New Iterative Approach for Refocusing and Coregistration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V.52. №5. P.2994-3004.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2268388>
 9. Yamauchi Y., Kidera S. Inverse Scattering Enhanced Synthetic Aperture Imaging for Multi-layered Ground Media. *2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. Sydney. Australia. 2022. P.225-226.
<https://doi.org/10.1109/ISAP53582.2022.9998787>
 10. García-Fernández M., Álvarez-Narciandi G., López Y.Á., Andrés F.L.-H. SAFEDRONE project: development of a UAV-based high-resolution GPR system for IED detection. *16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Madrid. Spain. 2022. P.1-5.
<https://doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9768934>
 11. Маринов Н.А., Попов В.Н. *Гидрогеология Монгольской народной республики*. Москва, Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. 1963. 431 с.
 12. Панкова Е.И., Конюшкова М.В. Климат и засоленность почв пустынь Центральной Азии. *Почвоведение*. 2013. Т.46. №7. С.721-727.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13070071>
 13. Баскаков А.И., Одсурэн Б., Комаров А.А., Тувдендоорж Г. Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного

- слоя в засушливых районах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.10>
14. Всевожский В.А. *Основы гидрогеологии*. Москва, Издательство МГУ. 2007. 448 с.
 15. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. *Статистическая теория радиолокации протяженных целей*. Москва, Радио и связь. 1982. 232 с.
 16. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. *Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии*. Москва, Недра. 1986. 128 с.
 17. Baskakov A.I., Komarov A.A. Estimation of the Resolution of a Multi-Position Radar for the Control of Small-Sized Space Debris Objects That Are Not Resolved by Angular Coordinates. *Progress in Electromagnetics Research Symposium: PIERS-Toyama 2018 – Proceedings*. Toyama. Japan. 2018. P.476-481. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598081>
 18. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Engineering and Technology. 2004. 752 p.
 19. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1994. 216 с.
 20. Финкельштейн М.И. *Основы радиолокации*. Москва, Радио и связь. 1983. 536 с.
 21. Ipanov R.N., Baskakov A.I., Olyunin N., Ka M.H. Radar Signals with ZACZ Based on Pairs of D-Code Sequences and Their Compression Algorithm. *IEEE Signal Processing Letters*. 2018. V.25. №.10. P.1560-1564. <https://doi.org/10.1109/LSP.2018.2867734>

Для цитирования:

Баскаков А.И., Комаров А.А., Михайлов М.С., Лучковский Н.Д., Одсурэн Б. Двухпозиционный георадиолокатор на БПЛА для оперативного мониторинга подповерхностных водных ресурсов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.7>