

## Бистатическая радиолокация Земли с помощью спутников

Е.О. Потемкин<sup>1</sup>, И.А. Кучерявенков<sup>2</sup>, С.С. Матюгов<sup>2</sup>, А.Г. Павельев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»  
101000, а/я 496, Москва, Хоромный туп., 4  
E-mail: knyazzz@list.ru*

<sup>2</sup> *Фирма им. В.А. Котельникова РАН  
141190, Московская обл., Фрязино, Введенского пл., 1  
E-mail: pvlv@ms.ire.rssi.ru*

Цель статьи состоит в анализе чувствительности амплитудных, фазовых и доплеровских измерений при бистатической радиолокации Земли из космоса к отражательным характеристикам земной поверхности, эффектам рефракции и поглощения в атмосфере, а также в определении возможности альтиметрии. Анализ проведен по данным радиозатменных экспериментов, осуществленных на трассе орбитальная станция МИР — геостационарные спутники, а также с помощью миссий CHAMP и GPS/MET.

**Ключевые слова:** спутниковая бистатическая радиолокация, рефракция, поглощение радиоволн, фаза, доплеровская частота, альтиметрия.

### Введение

Метод бистатической (двухпозиционной) радиолокации был предложен ранее в работах (Кучерявенков и др., 1986; Martín-Neira, 1993) для дистанционного зондирования земной поверхности из космоса с помощью спутников Земли. Первые эксперименты бистатической радиолокации при малых углах места были проведены с помощью системы орбитальная станция «МИР» — геостационарные спутники на длинах волн 2 и 32 см (Pavelyev et al., 1996; Рубашкин и др., 1993; Павельев и др., 1997). Методом сфокусированного апертурного синтеза, развитым в работах (Павельев, 1998; Носке et al., 1999), были выявлены в данных радиозатменных миссий GPS/MET и CHAMP радиосигналы спутников GPS, отраженные от земной поверхности (Beyerle, Носке, 2001; Igarashi et al., 2001; Beyerle et al., 2002; Pavelyev et al., 2002). Задачи бистатической радиолокации можно разделить на три направления:

- рефлектометрия и скеттерометрия земной поверхности, а также зондирование граничного слоя атмосферы,
- радиовидение земной поверхности,
- альтиметрия поверхности океана.

Глобальные радиоволновые поля, создаваемые спутниками навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и других в околоземном пространстве на высотах от 0 до 20 000 км, открывают возможность создания инновационных методов и средств контроля околоземного пространства, а также нового вида пассивной (двухпозиционной и многопозиционной) радиолокации поверхности Земли с помощью приемных устройств, установленных на летательных аппаратах и низкоорбитальных спутниках. Высокая стабильность сигналов космических навигационных систем позволяет применять радиологические методы обработки.

Цель статьи состоит в анализе возможностей бистатической радиолокации для определения отражательных характеристик земной поверхности, альтиметрии, а также рефракции и поглощения в атмосфере.

### Схема бистатической радиолокации земной поверхности

На рис. 1 показана схема бистатической радиолокации. В точках *L*, *G* находятся, соответственно, приемник на низкоорбитальном аппарате и передатчик, расположенный на дру-

гом спутнике, который может быть предназначен для радиосвязи, навигации, телевидения и других целей. Наибольший интерес представляет применение для двухпозиционной (бистатической) радиолокации сигналов, излучаемых навигационными спутниками. Сигнал, излучаемый навигационным спутником в дециметровом диапазоне при правой круговой поляризации радиоволн, проходит по трассам 1 и 2. Трасса 1 соответствует прямому сигналу, трасса 2 — отраженному. Приемник использует прямой сигнал в качестве опорного при измерении характеристик земной поверхности с помощью отраженных радиоволн, распространяющихся по трассе 2. На определенном участке орбиты на борту низкоорбитального спутника регистрируется радиоголограмма, содержащая зависимости амплитуды и фазы опорного и отраженного сигналов от времени. Радиоголограмма передается на Землю, где производится обработка с привлечением данных об орбитах навигационного и низкоорбитального спутников.

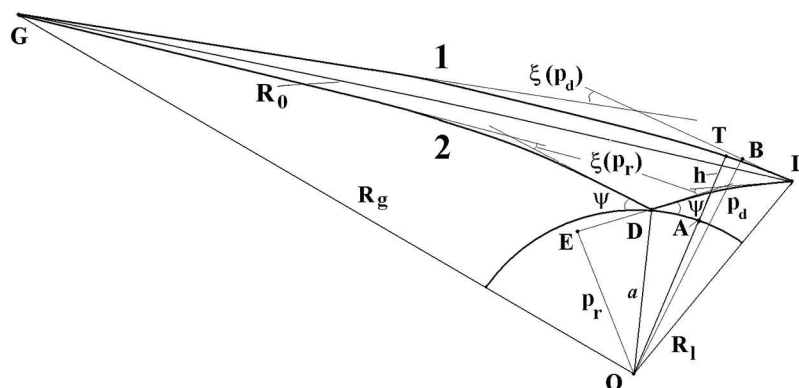


Рис. 1. Схема бистатической радиолокации земной поверхности с помощью сигналов навигационного спутника

При отслеживании прямого сигнала, проходящего по трассе 1, приемник спутника  $L$  измеряет фазу несущей, а также определяет псевдодальность путем нахождения максимального значения функции корреляции между Р-кодом (или С/А-кодом) опорного (отраженного) сигнала и имеющимся в приемном устройстве моделями указанных кодов. Псевдодальность равна скорости света, умноженной на разницу во времени между часами передатчика и приемника. В псевдодальность входят ошибки часов передатчика и приемника, задержка распространения по трассе  $LG$ , в том числе, вызванная воздействием атмосферы и ионосферы. При отражении сигнала от поверхности океана, величина наименьшего запаздывания, выраженного в единицах длины,  $\Delta_D$ , соответствует точке зеркального отражения  $D$  на средней земной поверхности. В соответствии с условием зеркального отражения радиоволн точка  $D$  находится в плоскости  $LOG$ , где  $O$  — центр Земли. Интервалу запаздываний отраженного сигнала  $\Delta_D$  и  $\Delta_D + \delta$  соответствует область поверхности, ограниченная эллипсом с размером большой и малой полуоси  $b_{\parallel}$ ,  $b_{\perp}$  в сечении земной поверхности плоскостью  $LDG$  и перпендикулярной плоскостью. Величина  $\delta$  равна пространственному размеру одного импульса (чипа) сигнала. В навигационных сигналах системы GPS размер чип Р-кода составляет

$$\delta_Y = \frac{c}{10,23\mu\text{s}} \approx 29\text{м}, \text{ С/А-кода} \quad \delta_C = \frac{c}{1,023\mu\text{s}} \approx 293\text{м}, \text{ где } c \text{ — скорость света в вакууме.}$$

Величины  $b_{\parallel}$ ,  $b_{\perp}$  зависят от угла скольжения радиоволн  $\psi$  в точке  $D$ , и определяются при отсутствии атмосферы соотношениями:

$$b_{\parallel} = \sqrt{\frac{2\delta a}{\left[2 + a \left(\frac{1}{R_{R_{GD}}} + \frac{1}{R_{R_{LD}}}\right) \sin \psi\right] \sin \psi}}, \quad b_{\perp} = \sqrt{\frac{2\delta a}{2 \sin \psi + a \left(\frac{1}{R_{R_{GD}}} + \frac{1}{R_{R_{LD}}}\right)}} \quad (1)$$

$$R_{L,GD} = \sqrt{R_{L,G}^2 - a^2 \cos^2 \psi} - a \sin \psi, \quad (2)$$

где  $R_{LD}, R_{GD}$  — расстояния  $DL, DG$ ;  $a$  — радиус Земли. Размеры первой зоны Френеля  $l_{\parallel, \perp}$  получаются из (1) при  $\delta = \lambda/2$ ,  $\lambda$  — длина радиоволн.

Коэффициент отражения  $\eta^2(\psi)$  определяется в случае малонаправленных приемо-передающих антенн из отношения интенсивностей отраженного и прямого сигналов:

$$\eta^2(\psi) = \frac{\sigma R_0^2}{4\pi R_{DL}^2 R_{DG}^2} \quad (3)$$

где  $R_0$  — расстояние  $GL$  (см. рис. 1);  $R_{DG}, R_{DL}$  — расстояния  $DG, DL$ ;  $\sigma$  — эффективная поверхность отражения. С учетом рефракции величина  $\sigma$  равна (Pavelyev et al., 2011):

$$\sigma = \frac{4\pi R_{DG}^2 R_{DL}^2 \chi_r |V^2(\psi)| X(p_r)}{R_0^2}, \quad (4)$$

$$X(p_r) = \frac{p_r R_0}{p_s R'_{DL} R'_{DG}} \frac{n(a) a \sin \psi}{\left[ 2 \frac{n(a) a \sin \psi \sqrt{R_G^2 - p_r^2} \sqrt{R_L^2 - p_r^2}}{R'_{DL} R'_{DG}} \frac{d\xi(p_r)}{dp_r} + 2 + n(a) a \sin \psi \left( \frac{1}{R'_{DL}} + \frac{1}{R'_{DG}} \right) \right]} \quad (5)$$

$$p_d = \frac{R_L R_G \sin(\theta - \xi_d)}{R_0}, \quad (6)$$

$$p_r = n(a) a \cos \psi, \quad (7)$$

где  $\xi_r, \xi_d$  и  $p_r, p_d$  — углы рефракции и прицельные параметры отраженного и опорного сигналов;  $\chi_r, X(p_r)$  — интегральное поглощение и рефракционное ослабление отраженных радиоволн;  $n(a)$  — показатель преломления в точке  $D$ . Величины  $R'_{DG}, R'_{LD}$  равны:

$$R'_{DG} = \sqrt{R_G^2 - p_r^2} - n(a) a \sin \psi, \quad R'_{LD} = \sqrt{R_L^2 - p_r^2} - n(a) a \sin \psi; \quad p_r = n(a) a \cos \psi. \quad (9)$$

Коэффициент отражения от плоской границы раздела атмосфера-грунт  $V(\psi)$  (4) зависит от угла скольжения  $\psi$ , поляризации радиоволн и диэлектрической проницаемости грунта  $\varepsilon$ . Для круговой поляризации и однородного грунта  $V(\psi)$  находится из соотношений:

$$V(\psi) = 0.5(V_v \pm V_g), \quad V_v = \frac{\varepsilon A - 1}{\varepsilon A + 1}, \quad V_g = \frac{A - 1}{A + 1}, \quad A = \frac{\sin \psi}{\sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}, \quad (10)$$

где знаки  $+$  и  $-$  соответствуют правой и левой круговой поляризации;  $V_v$  и  $V_g$  — коэффициенты отражения радиоволны от плоской поверхности при вертикальной и горизонтальной поляризации.

При отсутствии атмосферы величина  $\sigma$  может быть определена из уравнения:

$$\sigma = \frac{4\pi |V^2(\psi)| a^2 \sin \psi}{\left[ 2 + a \sin \psi \left( \frac{1}{R_{DG}} + \frac{1}{R_{LD}} \right) \right] \left[ 2 \sin \psi + a \left( \frac{1}{R_{DG}} + \frac{1}{R_{LD}} \right) \right]} \quad (11)$$

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента отражения  $\eta^2(\psi)$  от угла скольжения  $\psi$ , рассчитанные с помощью соотношений (3), (10), (11) для правой (левая панель) и левой круговой поляризации (правая панель) при высоте орбиты низкоорбитального спутника, равной 800 км. Предполагается, что передающая антенна имеет правую круговую поляризацию. Кривая 1 ( $\epsilon=3,0$ ) соответствует пресному льду, кривые 2 и 3 — сухой и влажной почве (глине) ( $\epsilon=4,0+i0,4$  и  $\epsilon=15,0+i5,4$ ) с содержанием влаги 3% и 15%, кривая 4 — морской воде ( $\epsilon=75+i52$ ). Величины диэлектрической проницаемости были заимствованы из работ (Beyerle et al., 2002; Pavelyev et al., 2002). Согласно рис. 2, угловые и поляризационные зависимости коэффициентов отражения льда, морской воды и глины существенно отличаются. Лед отражает наиболее интенсивно при скользких направлениях наблюдения при правой круговой поляризации передающей и приемной антенны. Различие коэффициентов отражения от морской поверхности и льда существенно как для правой, так и для левой поляризации во всем диапазоне углов скольжения  $0 \dots 90^\circ$ . Это относится также и для сухой и влажной почвы (глины) (кривые 2 и 3). При скользких направлениях распространения радиоволн максимальные значения коэффициента отражения льда приблизительно в три раза выше соответствующих величин для морской поверхности (см. рис. 2, слева) и находятся в пределах  $-10 \dots -18$  дБ. Это позволяет надежно обнаруживать отраженный сигнал от поверхности моря и льдов, а также фиксировать отражения от гладкой поверхности спокойного моря. Максимум коэффициента отражения льда при правой круговой поляризации передающей и приемной антенны соответствует интервалу углов скольжения  $6 \dots 12^\circ$ . Для измерения коэффициента отражения в этом интервале требуется отворот максимума диаграммы антенны на  $12 \dots 24^\circ$  в сторону надира от направления на лимб Земли. В этом случае будут созданы оптимальные условия для распознавания льда, морской воды, а также различных типов почв при правой поляризации приемной антенны.

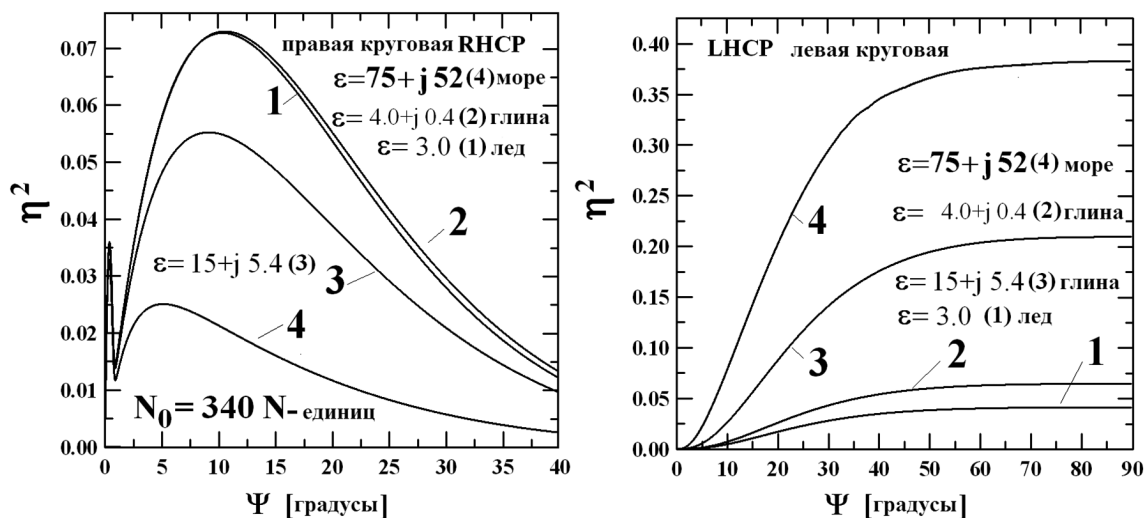


Рис. 2. Коэффициент отражения как функция угла скольжения для случаев правой (RHCP) и левой (LHCP) круговой поляризации приемной антенны в эксперименте радиопросвечивания

В случае сферической симметрии атмосферы, при фиксированной зависимости показателя преломления от высоты  $n(h)$ , можно оценить величину чувствительности разности фазового пути опорного и отраженного сигналов  $S_r - S_d$  к вариациям средней высоты поверхности, используя уравнения (Акиндинов и др., 1976) для  $S_r, S_d, S_r', S_d'$ :

$$\frac{\partial(S_r - S_d)}{\partial a} = -2n(a) \sin \psi. \quad (12)$$

Согласно(12), чувствительность к изменению высоты рельефа максимальна при измерениях в надир, и минимальна — при скользких направлениях наблюдения. Разность

$S_r - S_d$  может быть измерена корреляционным методом путем определения задержки максимума корреляционной функции опорного и отраженного сигнала. Инструментальная ошибка определения фазового пути  $\Delta S_{C,Y}$  этим методом зависит от корреляционных характеристик сигнала GPS, а также от соотношения сигнал/шум по напряжению  $N_v$  (Lowe et al., 2002). Используя соотношения (Lowe et al., 2002) с учетом (12), можно определить инструментальную погрешность альтиметрических определений высоты средней поверхности  $\Delta a_{C,Y}$  в виде:

$$\Delta a_{C,Y} \approx \frac{0,5\delta_{C,Y}}{n(a)N_v \sin \psi}, \quad (13)$$

где  $\delta_{C,Y}$  является пространственным размером одного импульса (чипа) сигнала. При  $\delta_C \approx 300$  м,  $\delta_Y \approx 30$  м и соотношении  $N_v \approx 100$  (40 дБ), можно оценить из (13) погрешность  $\Delta a_{C,Y}$  для  $\psi = 90^\circ$   $\Delta a_C = 1,5$  м,  $\Delta a_Y \approx 0,15$  м. Указанное значение  $N_v$  было достигнуто в эксперименте на орбитальной станции Shuttle (Lowe et al., 2002), что позволило провести измерения высоты морской поверхности и скорости ветра в приземном слое атмосферы. При скользких направлениях погрешность измерений  $\Delta a_{C,Y}$  существенно возрастает.

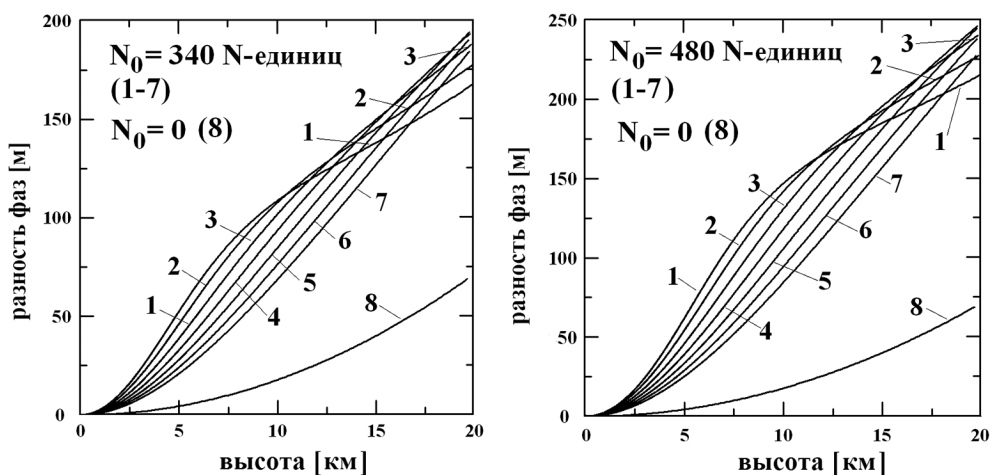


Рис. 3. Разность фазовых путей отраженного и прямого сигналов как функция высоты перигея радиолуча (см. рис. 1). Величина равна 340 -единиц (левая панель) и 480 -единиц (правая панель)

В случае гладкой отражающей поверхности (например, море при штиле и отсутствии зыби) применим когерентный способ обработки, основанный на различии доплеровских частот опорного и отраженного сигнала (Pavelyev et al., 1996; Рубашкин и др., 1993; Павельев и др., 1997; Павельев, 1998; Hocke et al., 1999). Этот метод можно также использовать при локации в случае малых углов места, когда выполняется критерий Релэя. Метод был апробирован для определения характеристик отраженного сигнала в данных радиозатменных экспериментов GPS/МЕТ, CHAMP (Beyerle, Hocke, 2001, 2002; Igarashi et al., 2001; Pavelyev et al., 2002). В этих экспериментах для сжатия спектра прямого сигнала с целью обнаружения слабых отражений от поверхности успешно применялся метод сфокусированного апертурного синтеза (Павельев, 1998; Hocke et al., 1999; Beyerle, Hocke, 2001, 2002; Igarashi et al., 2001; Pavelyev et al., 2002). Альтиметрические измерения вариаций высоты средней поверхности вблизи Северного полюса были проведены путем совместного анализа амплитудных и фазовых вариаций отраженного сигнала по данным радиозатменной миссии CHAMP при малых углах места, ошибка измерений высоты рельефа составила  $\pm 0,7$  м; результаты измерений подтверждены данными лазерного зондирования, проводившимися в этом районе (Cardellach et al., 2004). Достигнутая инструментальная точность когерентного метода была определена в ходе многократных измерений приращения фазового пути прямого сигнала, проводившихся бортовым приемником, установленным на спутнике CHAMP, и изменялась в пределах от  $\pm 0,02$  до  $\pm 0,25$  см (Montenbruck, Remco, 2003), что существенно меньше

величины ошибок корреляционного метода. Однако, применение когерентного метода ограничено из-за воздействия неровностей рельефа и неоднородностей атмосферы. Требуется устранить систематические погрешности, возникающие из-за технических сложностей измерений фазы несущей частоты, пропуска циклов (периодов), а также влияния случайных неровностей поверхности, многолучевого распространения и воздействия ионосферы.

Для определения возможностей когерентного метода оценим чувствительность  $\frac{\partial \Delta F}{\partial a}$

разности доплеровских частот прямого и отраженного сигналов  $\Delta F$  к изменению высоты земной поверхности в случае круговых орбит:

$$\Delta F = -(p_d - p_r) \frac{d\theta}{\lambda dt}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial a} = -\lambda^{-1} \frac{2 \left( 1 + \frac{n(a)a \sin \psi}{R'_{DG}} \right) \left( 1 + \frac{n(a)a \sin \psi}{R'_{LD}} \right) \cos \psi}{2 + n(a)a \sin \psi \left[ \frac{1}{R'_{DG}} + \frac{1}{R'_{LD}} - \frac{d\xi_r}{dp_r} \left( 1 + \frac{n(a)a \sin \psi}{R'_{DG}} \right) \left( 1 + \frac{n(a)a \sin \psi}{R'_{LD}} \right) \right]} \frac{d\theta}{dt}, \quad (15)$$

где  $\theta$  — угол с вершиной в центре Земли между направлениями  $OL$ ,  $OG$ ;  $\xi_r, p_r$  — угол рефракции и прицельный параметр лучей  $DL$ ,  $DG$  (см. рис. 1). Из (15) следует, что величина  $\frac{\partial \Delta F}{\partial a}$  возрастает при уменьшении угла скольжения  $\psi$ . Трудность доплеровской аль-

тиметрии состоит в исключении влияния расширения спектра отраженного сигнала из-за воздействия неровностей поверхности. Ширина доплеровского спектра отраженных радиоволн в дециметровом диапазоне существенно возрастает при увеличении угла места и может достигать нескольких сотен герц (Рубашкин и др., 1993). Однако, при малых углах места, если выполняется критерий Релэ, влияние неровностей может быть несущественно, и доплеровская альтиметрия может быть применена для альтиметрических измерений.

Для подтверждения возможности обнаружения отраженных сигналов в радиозатменных экспериментах, проводимых с помощью навигационных спутников, на рис. 3 представлена зависимость разности фазовых задержек отраженного и прямого сигналов  $S_r - S_d$  как функции высоты перигея луча  $h$  на трассе 1 для значений  $N_0$ , равных 340 N-единиц (левая панель) и 480 N-единиц (правая панель), соответственно. Кривые 1–7 на рис. 3 соответствуют значениям  $\frac{dN(h)}{Eh}$ , равным: 80 N -единиц (1); 70 N -единиц (2); 60 N -единиц (3);

52 N -единиц (4); 43 N -единиц (5); 37 N -единиц (6); 32 N -единиц (7). Кривая 8 соответствует случаю свободного пространства. Согласно рис. 3 разность  $S_r - S_d$  изменяется в пределах  $0 \dots 250$  м в интервале высот перигея луча  $1 \theta < h < 20$  км, что размера импульса непрерывного C/A кода GPS сигнала, равного 300 м. Поэтому при радиозатменном приеме сигналов GPS-спутника на выходе приемника одновременно содержатся данные о прямом и отраженном сигналах.

### Эксперименты на трассе орбитальная станция «МИР» — геостационарные спутники

На рис. 4 (левая панель, длина волны  $\lambda = 32$  см) показан доплеровский спектр сигналов (в Гц), отраженных поверхностью Индийского океана. По горизонтальной оси отложена величина доплеровского сдвига, выраженная в герцах, по вертикальной оси отложена интенсивность отраженных сигналов, нормированная на спектральную плотность прямого сигнала. Временной интервал между соседними спектрами равен  $1/3$  с. Из рис. 4 (левая панель)

можно сделать вывод о временной зависимости доплеровской частоты отраженных сигналов. Случайные вариации этой частоты могут быть связаны с особенностями крупномасштабных неоднородностей морской поверхности и влиянием приземного слоя атмосферы.

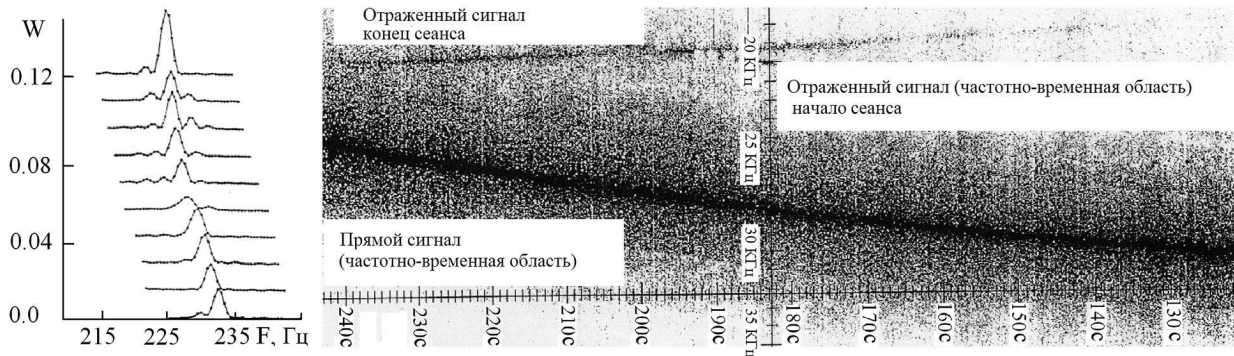


Рис. 4. Частотно-временная история принимаемых сигналов при отражении от поверхности Индийского океана (левая панель) и Аральского моря (правая панель) по данным станция «Мир» – геостационарный спутник на длинах волн 32 и 2 см

Отраженный сигнал был также обнаружен на длине волны 2 см из экспериментальных радиозатменных данных, полученных на трассе МИР–геостационарный спутник 28 мая 1998 г. Зависимость доплеровского сдвига частоты от времени при отражении от поверхности Аральского моря (данные МИР – геостационарный спутник) представлена на рис. 4 (правая панель). На рисунке наблюдается узкая полоса отраженного сигнала (сверху) вблизи частоты 20 кГц, наряду с мощным прямым сигналом вблизи 25 кГц. Доплеровский сдвиг между прямым и отраженным сигналами постепенно уменьшается с увеличением времени. Отраженный сигнал пропадает после прохождения зоны зеркального отражения от Аральского моря. Это происходит из-за попадания зоны отражения на неровную поверхность суши.

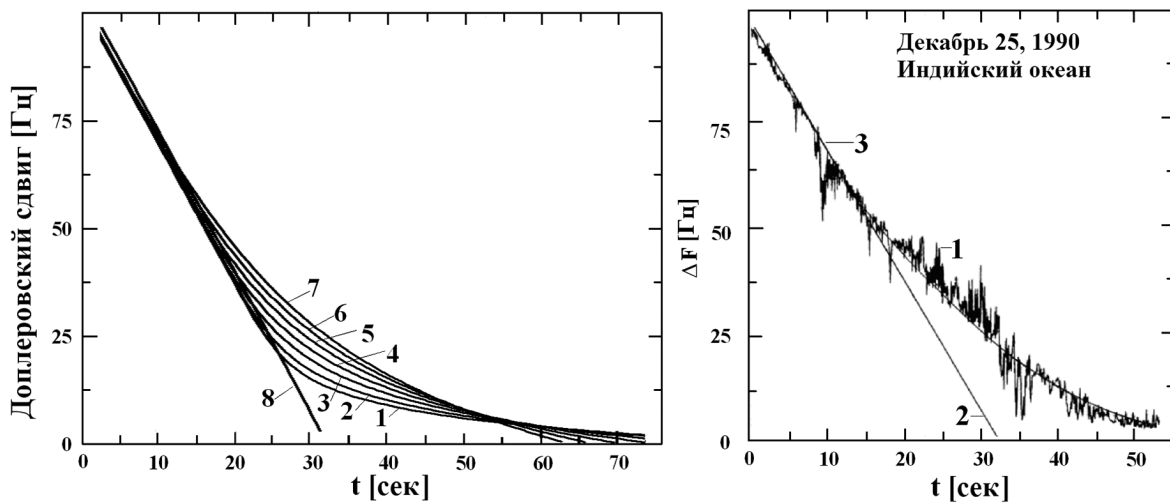


Рис. 5. Разность доплеровских сдвигов частоты отраженного и прямого сигналов в эксперименте радиопросвечивания на трассе станция «Мир» – геостационарный спутник

Результаты моделирования доплеровских сдвигов частоты между прямым и отраженным сигналами представлены на рис. 5 (левая панель). Кривые 1–7 соответствуют  $N_0 = 340N$ -единиц при вертикальных градиентах показателя преломления  $-80,2$ ;  $-70,6$ ;  $-59,7$ ;  $-50,8$ ;  $-43,5$ ;  $-37,5$  и  $-32,5N$ -единиц/км, соответственно. Кривая 8 соответствует отсутствию атмосферы. На рис. 5 (правая панель) показана временная зависимость доплеровского сдвига частоты  $\Delta F(t)$  (Гц) между прямым и отраженным сигналами для сеанса 25 декабря 1990 г. (длина волны 32 см). Координаты района радиопросвечивания (Индийский

океан) —  $31,2^\circ$  ю.ш.,  $68,2^\circ$  в.д. Кривая 1 иллюстрирует экспериментальные данные. Кривая 2 описывает доплеровский сдвиг частоты  $\Delta F(t)$  в случае свободного распространения. Кривая 3 показывает влияние атмосферы со значениями параметров на приземном слое  $N_0 = 350N$ -единиц, и вертикального градиента, равного  $-38N$ -единиц/км. Как следует из рис. 5, доплеровский сдвиг частоты  $\Delta F(t)$  наиболее сильно изменяется около границы радиотени. Увеличение вертикального градиента приводит к более медленному уменьшению  $\Delta F(t)$  около границы радиотени. Данный эффект можно также проследить на рис. 5 (левая панель) по отличию значений  $\Delta F(t)$ , соответствующих разным величинам вертикального градиента показателя преломления. Из анализа рис. 5 следует, что зависимость доплеровского сдвига  $\Delta F(t)$  позволяет оценить вертикальный градиент показателя преломления на приземном слое. Теоретические зависимости уровня отраженных сигналов с разными значениями вертикального градиента показателя преломления представлены на рис. 6 (левая панель).

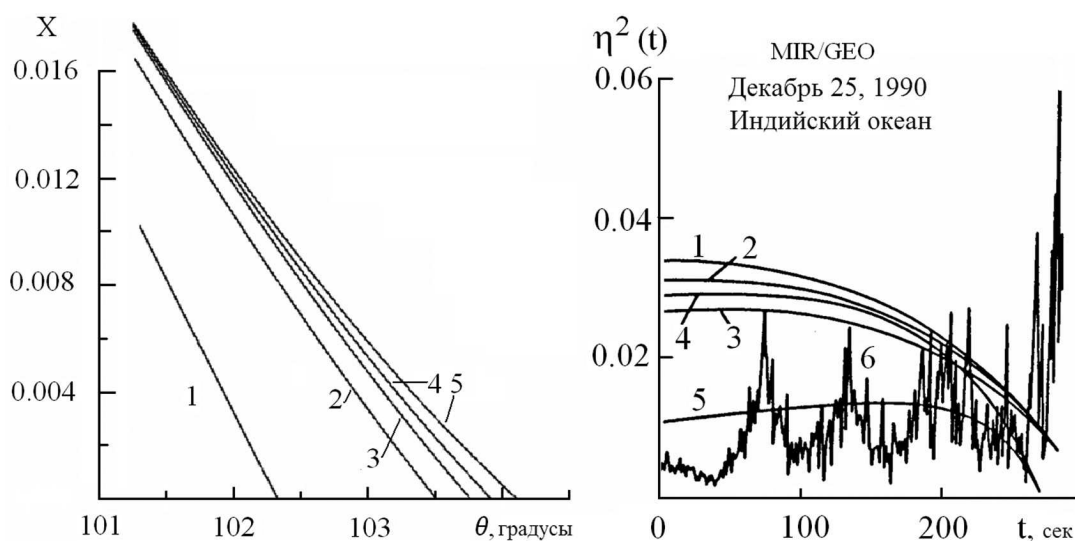


Рис. 6. Теоретические зависимости рефракционного ослабления отраженных сигналов от центрального угла  $\theta$  при разных значениях вертикального градиента показателя преломления (левая панель). Теоретические и экспериментальные зависимости коэффициента отражения от времени (правая панель)

По горизонтальной оси отложен центральный угол  $\theta$ , (выраженный в градусах). По вертикальной оси отложено рефракционное ослабление отраженного сигнала (рис. 6, левая панель). Кривая 1 соответствует распространению в свободном пространстве. Кривые 2–5 соответствуют распространению в среде с вертикальными градиентами показателя преломления  $-35,4N$ -единиц/км;  $-43N$ -единиц/км;  $-50N$ -единиц/км;  $-57N$ -единиц/км. Угловое положение радиотени для указанных вертикальных градиентов различно и изменяется, соответственно, от  $102,3^\circ$  (отсутствие атмосферы) до  $103,5$ ;  $103,75$ ;  $103,9$ ;  $104,1^\circ$ . Согласно рис. 6 мощность отраженных волн вблизи границы радиотени является функцией центрального угла  $\theta$  и вертикального градиента. Амплитуда отраженных сигналов около границы радиотени является индикатором вертикального градиента показателя преломления в приземном слое атмосферы. В дециметровом диапазоне радиоволн атмосферное поглощение на трассе 1 мало, т. е. коэффициент  $\chi_d$  близок к единице. При распространении вдоль трассы 2 радиоволны проходят весь интервал высот при малых углах наклона и испытывают заметное поглощение. Коэффициент отражения  $\eta^2(t)$  был подсчитан на основе сравнения мощностей прямого и отраженного сигналов  $W_r(t)$  и  $W_d(t)$ . Измеренные коэффициенты отражения  $\eta^2(t)$  затем были сравнены с результатами теоретических расчетов, представленными на рис. 6 (правая панель) по вертикальной оси. Время измерений указано по горизонтальной оси. Кривые 1–3 построены по результатам вычислений коэффициента отражения для  $N_0 = 320N$ -единиц и вертикального градиента,



равного  $-42,0N$ -единиц/км. Данные значения  $N_0$  и соответствуют стандартной модели показателя преломления (Лещанский et al., 1971). Кривая 4 описывает  $\eta^2(t)$  в случае отсутствия атмосферы. Кривые 1–4 вычислены для случая проводимости морской воды  $\sigma_W = 2,7, 4,0;$  и  $7,0$  мОм/м, соответственно. Согласно работе (Лещанский et al., 1971), реальная часть восприимчивости была принята равной 79. Кривая 5 была построена для  $\sigma_W = 4$  мОм/м с учетом полного поглощения атмосферным кислородом. Кривая 6 соответствует экспериментальным данным. Момент времени, когда орбитальная станция «Мир» входит в зону радиотени относительно геостационарного спутника, соответствует пересечению кривой 4 с горизонтальной осью рис. 6 (правая панель). Коэффициент отражения достигает максимума в районе радиотени и подвержен сильным флуктуациям. Вне зоны радиотени кривая 5 удовлетворительно согласуется со средним измеренным значением коэффициента отражения  $\eta^2(t)$ . Сравнение кривой 5 с кривыми 1–3 указывает на общее поглощение в атмосфере в районе измерения  $\Gamma = 4,8 \pm 1,2$ , что соответствует среднему коэффициенту поглощения  $0,0096 \pm 0,0024$  дБ/км при длине участка распространения радиоволн в атмосфере 500 км. Это значение хорошо согласуется с теоретическими и экспериментальными результатами, изложенными в (Montenbruck, Remco, 2003; Кисляков, Станкевич, 1967).

### Заключение

Получены соотношения, определяющие предельную чувствительность бистатической радиолокации при альтиметрии земной поверхности с помощью фазовых и доплеровских измерений с учетом влияния атмосферы Земли. Чувствительность фазы к вариациям высоты средней поверхности Земли падает, а доплеровской частоты возрастает при уменьшении угла скольжения радиоволн. Кроме того, при малых углах места возрастает воздействие атмосферы на фазу и доплеровскую частоту, что позволяет определять параметры приземного слоя атмосферы. Коэффициент отражения радиоволн при бистатической радиолокации существенно зависит от поляризации и угла скольжения, что позволяет использовать сигналы навигационных спутников для определения физических свойств грунта при наблюдении отражений из космоса.

Проведена оценка поглощения радиоволн по результатам измерений коэффициента отражения в радиозатменных экспериментах на трассе орбитальная станция МИР — геостационарные спутники. Работа поддержана РФФИ (проект № 10-02-01015-а) и Программой Президиума РАН № 22.

### Литература

1. Акиндинов В.В., Нарышкин В.Л., Рязанцев А.М. Электромагнитные поля в морской воде // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 5. С. 913–924.
2. Кисляков А.Г., Станкевич К.С. Исследование тропосферного поглощения радиоволн радиоастрономическими методами // Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1244–1265.
3. Кучерявенков А.И., Милехин О.Е., Павельев А.Г. Анализ возможностей бистатической радиолокации Земли с помощью спутников // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 4. С. 86.
4. Лещанский Ю.И., Лебедева Г.Н., Шумилин В.Д. Электрические параметры песчаного и глинистого грунта в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // Радиофизика. 1971. Т. 14. № 4. С. 562–569.
5. Матюгов С.С., Яковлев О.И., Вилков И.А. Поглощение сантиметровых и дециметровых радиоволн при затменных экспериментах на трассе спутник — спутник // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 8–9. С. 1251.
6. Павельев А.Г. О возможности радиологических исследований волновых полей вблизи зоны радиотени Земли на трассе спутник — спутник // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43(8). С. 939–944.

7. Павельев А.Г., Захаров А.И., Кучерявенков А.И., Сидоренко А.И., Кучерявенкова И.И., Павельев Д.А. Особенности распространения радиоволн радиоволн, отраженных от земной поверхности при малых углах скольжения, на трассе связи низкоорбитальный спутник — геостационар // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 1. С. 51–57.
8. Рубашкин С.Г., Павельев А.Г., Яковлев О.И., Кучерявенков А.И., Сидоренко А.И., Захаров А.И. Отражение радиоволн поверхностью океана при бистатической локации с использованием двух спутников // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 3. С. 447.
9. Beyerle G., Hocke K. Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in Radio Occultation Experiments // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28(9). P. 1895–1898.
10. Beyerle G., Hocke K., Wickert J., Schmidt T., Reigber C. GPS radio occultations with CHAMP: A radio holographic analysis of GPS signal propagation in the troposphere and surface reflections // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. 4802. doi: 10.1029/2001JD001402.
11. Cardellach E., Ao C.O., De la Torre Juarez M., Hajj G.A. Carrier phase delay altimetry with GPS — reflection/occultation interferometry from low Earth orbiters // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. L10402. doi:10.1029/2004GL019775.
12. Hocke K., Pavelyev A.G., Yakovlev O.I., Barthes L., Jakowski N. Radio occultation data analysis by the radio-holographic method // Atmospheric and Terrestrial Physics. 1999. V. 61(15). P. 1169–1177.
13. Igarashi K., Pavelyev A., Hocke K., Pavelyev D., Wickert J. Observation of wave structures in the upper atmosphere by means of radio holographic analysis of the radio occultation data // Advances in Space Research. 2001. V. 27. N. 6–7. P. 1321–1326.
14. Lowe S.T., Labrecque J.L., Zuffada C., Romans L.J., Young L., Hajj G.A. First Spaceborne Observation of an Earth-Reflected GPS Signal // Radio Science. 2002. V. 37(1). P. 7-1–7-28.
15. Martín-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry // ESA J. 1993. V. 17. P. 331–355.
16. Montenbruck O., Remco K. In-flight performance analysis of the CHAMP BlackJack GPS Receiver // GPS Solutions. 2003. V. 7. P. 74–86. doi:10.1007/s10291-003-0055-5.
17. Pavelyev A.G., Igarashi K., Reigber C., Hocke K., Wickert J., Beyerle G., Matyugov S., Kucherjavenkov A., Pavelyev D., Yakovlev O.I. First application of the radio holographic method to wave observations in the upper atmosphere // Radio Science. 2002. V. 37. N. 3. doi:10.1029/2000RS002501.
18. Pavelyev A.G., Volkov A.V., Zakharov A.I., Krytikh S.A., Kucherjavenkov A.I. Bistatic radar as a tool for Earth observation using small satellites // Acta Astronautica. 1996. V. 39. N. 9–12. P. 721–730.
19. Pavelyev A.G., Zhang K., Matyugov S.S., Liou Y.A., Wang C.S., Yakovlev O.I., Kucherjavenkov I.A., Kuleshov Y. Analytical model of bistatic reflections and radio occultation signals // Radio Science. 2011. V. 46. RS1009. doi:10.1029/2010RS004434.

## **Bistatic radio location of the Earth's surface from space**

**E.O. Potemkin<sup>1</sup>, I.A. Kucher'avenkov<sup>2</sup>, S.S. Matyugov<sup>2</sup>, A.G. Pavelyev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *OAO «VNIIEМ» Corporation»*

*101000, Moscow, Khoromniy, 4*

*E-mail: knyazzz@list.ru*

<sup>2</sup> *Kotelnikov'FIRE RAS*

*141190, Moscow region, Fryazino, Vvedenskogo sq., 1*

*E-mail: pvlv@ms.ire.rssi.ru*

Analysis of the sensitivity of the phase and Doppler frequency of radio waves to variations of the reflective properties, effects of refraction and absorption, and to average Earth's surface height is provided for bistatic radar measurements from space under small grazing angles. The results are supported by experimental data obtained during radio occultation experiments by use of the communication link orbital station "MIR" — geostationary satellites.

**Keywords:** bistatic radio location Earth's surface space refraction absorption radio waves phase Doppler frequency.