

ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТРАССАХ СПУТНИК-СПУТНИК

А.Г. Павельев, А.А. Павельев

ФирЭ им. академика В.А. Котельникова РАН pvlv@ms.ire.rssi.ru

Цель работы состоит в представлении и обосновании метода изучения условий связи на околоземных и спутниковых радиотрассах, в том числе при измерении абсолютных величин интегрального поглощения и рефракционного ослабления. На основе анализа экспериментальных данных показано, что ускорение фазы радиоволн имеет то же значение, что и доплеровская частота при двухпозиционном радиозондировании атмосферы и ионосферы на трассе спутник-спутник. Выявленная связь позволяет преобразовать изменения фазы во временную зависимость рефракционного ослабления радиоволн. Затем можно определить интегральное ослабление радиоволн, исключив найденное рефракционное ослабление из вариаций интенсивности радиоволн. Это необходимо для измерений концентрации водяного пара и малых газовых составляющих в будущих миссиях дистанционного зондирования на трассах спутник-спутник. Указанные выводы подтверждены путем анализа радиозатменных данных, полученных с помощью спутников CHAMP (Германия), FORMOSAT-3 (Тайвань-США).

Дистанционное зондирование ионосферы и атмосферы Земли двухпозиционным (радиозатменным) методом проводится с использованием двух спутников, один из которых излучает радиоволны, в то время как другой космический аппарат принимает их. По мере движения спутников, лучевые траектории радиоволн проходят в вертикальном направлении через ионосферу и атмосферу. Приемником низкоорбитального спутника регистрируются вертикальные профили вариаций фазы и амплитуды. Эти профили содержат информацию о рефракционных свойствах земной ионосферы и атмосферы [1-3]. Эта информация важна для глобального мониторинга ионосферы и атмосферы в реальном времени, а также для оценки условий радиосвязи на транс-ионосферных трассах спутник-спутник.

Радиозатменный метод основан на использовании сферической симметрии атмосферы и ионосферы, а также на предположении о незначительном влиянии турбулентных и нерегулярных структур на восстанавливаемые вертикальные профили.

Определение вертикальных профилей показателя преломления обычно осуществляется с помощью измерений доплеровской частоты радиоволн [3]. При этом информация, содержащаяся в амплитудной части радиоголограмм, не используется, что препятствует разделению вклада слоистых и мелкомасштабных образований. Важная связь между ускорением фазы, доплеровской частотой и интенсивностью вариаций радиозатменного сигнала была вскрыта путем теоретического рассмотрения и экспериментального анализа радиоголограмм, зарегистрированных на спутниках CHAMP и FORMOSAT-3 [4,5]. Указанная связь дает возможность пересчитывать ускорение фазы (или производную по времени от доплеровской частоты) в рефракционное ослабление. Совместный анализ вариаций ускорения фазы и интенсивности позволяет выявить слоистые структуры в атмосфере и ионосфере на фоне вклада турбулентных неоднородностей и мелкомасштабных структур и измерить их параметры. Схема эксперимента на транс-ионосферной трассе спутник-спутник с использованием высокостабильных, синхронизированных атомными часами, радиосигналов навигационной системы GPS показана на рис. 1. Точка О является центром сферической симметрии земной атмосферы. Радиоволны, излучаемые спутником GPS, расположенным в точке G, поступают на вход приемника на борту низкоорбитального спутника (точка L) после прохождения вдоль луча GTL, где Т является перигеем луча.

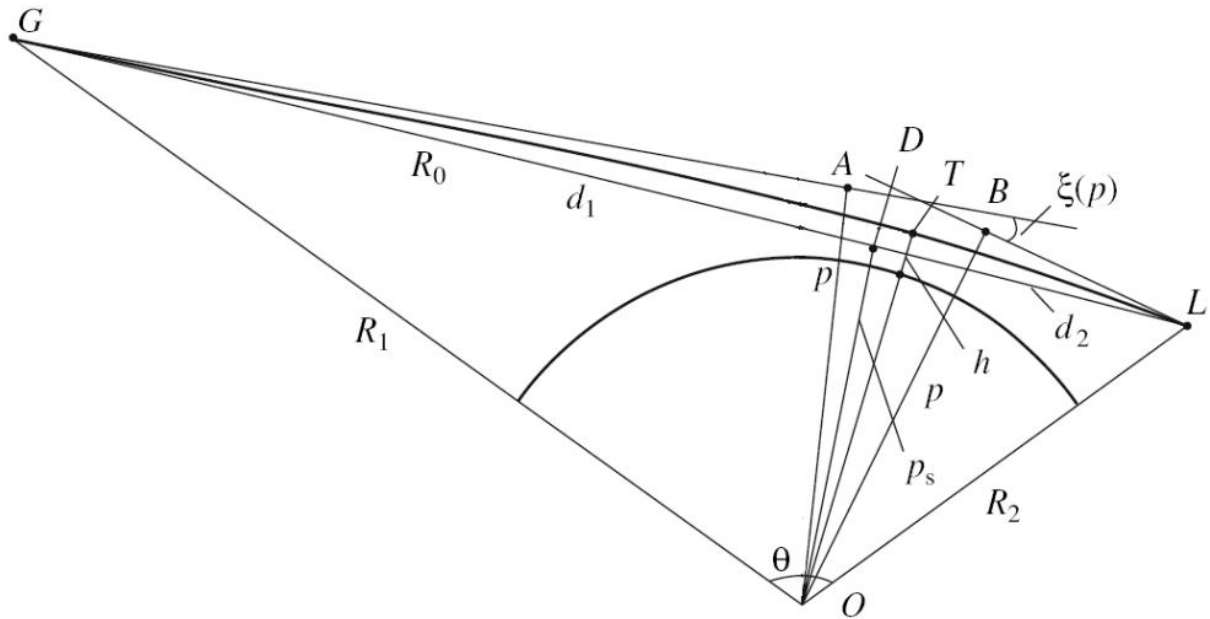


Рис. 1. Схема экспериментов на трассе спутник-спутник

В точке Т расстояние луча от земной поверхности h является минимальным и градиент показателя преломления $N(h)$ перпендикулярен к лучевой траектории GTL (рис. 1). Проекция точки Т на земную поверхность определяет географические координаты исследуемого района. Записи сигналов вдоль траектории низкоорбитального спутника на двух частотах системы GPS $f_1=1575.42$ МГц и $f_2=1227.6$ МГц являются одномерными радиоголограммами, которые содержат амплитуды $A_1(t)$ и $A_2(t)$, а также приращения фазового пути $\Phi_1(t)$ и $\Phi_2(t)$ радиополя в виде функций времени. Вертикальная скорость радиозатменного луча v_{\square} составляет около 2 км/с, что во много раз больше скорости движения слоев в ионосфере и атмосфере. Таким образом, радиозатменные данные являются, в сущности, мгновенными 1-D радиоголограммами ионосферы и атмосферы. В случае глобальной сферической симметрии ионосферы и атмосферы выполняются следующие соотношения между приращениями фазового пути $\Phi(p)$ и рефракционным ослаблением радиоволн $X(p)$ [4,5]

$$\Phi(p) = L(p) + \kappa(p) - R_0 \quad (1)$$

$$X(p) = pR_0^2 [R_1 R_2 d_1 d_2 \sin\theta |\partial\theta / \partial p|]^{-1} \quad (2)$$

$$\partial\theta / \partial p = d\xi / d p - (1/d_1 + 1/d_2) \quad (3)$$

$$L(p) = d_1 + d_2 + p\xi(p) \quad (4)$$

где $\kappa(p)$ является главной рефракционной частью приращения фазового пути, $\xi(p) = -d\kappa(p)/dp$ является углом рефракции, $\theta(p)$ является центральным углом, p, ps являются прицельными параметрами лучевой траектории GTL, и линии прямой видимости GQL, соответственно, R_0, R_1, R_2 являются расстояниями GQL, OG, и OL, соответственно, $L(p)$ является расстоянием GABL, которое состоит из двух отрезков d_1 (GA), d_2 (BL), и дуги AB (рис. 1). При условии $|p - p_s| \ll p_s$ первая производная от приращения фазового пути $\Phi(p)$

по времени t (доплеровская частота F_d) имеет вид:

$$d\Phi(p) / dt = F_d \approx -(p - p_s) dp_s / dt (1/d_{1s} + 1/d_{2s}) \quad (5)$$

где d_{1s}, d_{2s} являются расстояниями GD и DL, соответственно (рис. 1). Как показано в работах [4,5], вторая производная от приращения фазового пути $\Phi(p)$ по времени удовлетворяет соотношению:

$$1 - X(t) = ma = m dF_d / dt = m d^2\Phi(p) / dt^2 \quad (6)$$

$$m = q / (dp_s / dt)^2, \quad (7)$$

$$q = d_{1s} d_{2s} / R_0 \quad (8)$$

Формула (6) связывает рефракционное ослабление $X(t)$ и ускорение фазы $a = dF_d(t) / dt = d^2\Phi(p) / dt^2$ соотношением, подобным уравнению классической динамики. Уравнения (6) указывают на эквивалентность между ускорением приращения фазового пути a , производной от доплеровской частоты $F_d(t)$ по времени и рефракционным ослаблением $X(t)$. Параметры m и dp_s / dt определяются в радиозатменных экспериментах из орбитальных данных. Уравнение (6) дает возможность пересчитать ускорение фазы и/или производную от доплеровской частоты $F_d(t)$ по времени в рефракционное ослабление $X_p(t)$. Отсюда следует возможность оценки поглощения в атмосфере. Ослабление $X_a(t)$ определяется из амплитудных данных в виде отношения интенсивности радио сигнала, распространяющегося через атмосферу $I_a(t)$, к его интенсивности в свободном пространстве $I_s(t)$

$$X_a(t) = I_a(t) / I_s(t) \quad (9)$$

Определенная в эксперименте величина $X_a(t)$ является произведением вкладов рефракции и поглощения. Однако, ускорение фазы зависит только от эффекта рефракции. Это дает возможность исключить рефракционное ослабление и определить интегральное поглощение в атмосфере $Y(t)$ из соотношений:

$$Y(t) = X_a(t) / X_p(t), \quad X_p(t) = 1 - ma = 1 - mdF_d(t) / dt \quad (10)$$

где $X_p(t)$ является рефракционным ослаблением радиоволн, пересчитанным из фазовых данных. Уравнения (6) позволяют определить поглощение радиоволн с помощью совместного анализа данных в амплитудном и фазовом канале спутниковых радиоголограмм. Результаты совместного анализа данных фазового и амплитудного каналов спутниковых радиоголограмм для экспериментов СНАМР № 0175 и № 0187 показаны на рис. 2. Эксперименты были проведен 20 ноября 2003 года и соответствуют полярному и экваториальному району. Рефракционные ослабления $Xp(t)$, $Xa(t)$, рассчитанные по амплитудным и фазовым данным с помощью уравнений (6) и (9), показаны слева на рис. 2 (кривые 1 и 2, соответственно). Гладкие кривые 3 на рис. 2 показывают стандартные зависимости рефракционного ослабления с учетом интегрального ослабления в атмосферном кислороде, рассчитанного по данным работы [6] для дециметрового диапазона радиоволн. Хорошее соответствие между медленными трендами в рефракционных ослаблениях $Xa(t)$ и $Xp(t)$ от 0 дБ на высотах от 40 км до -10 дБ ... -15 дБ на высотах около 5 км заметно на рис. 2 (слева). Это – экспериментальное подтверждение выполнения закономерностей, описываемых уравнениями (6) – (9), которые были применены для расчета рефракционного ослабления $Xp(t)$ по данным фазового канала спутниковых радиоголограмм. Существует заметная корреляция между высокочастотной частью вариаций в изменениях величин $Xa(t)$ и $Xp(t)$ (рис. 2, левая панель). Таким образом, показана возможность выявления вертикальной структуры атмосферных слоев на фоне вклада случайных неоднородностей. Возможность определения вертикальной структуры плазменных слоев, их наклона и горизонтального смещения в нижней ионосфере была показана ранее в наших работах [4, 5]. Очевидная связь между рефракционными ослаблениями, восстановленными из амплитудных и фазовых вариаций, важна для оценки высотной зависимости интегрального поглощения в атмосфере. Эти зависимости показаны кривой 1 на рис. 2 (справа). Гладкая кривая 2 соответствует интегральному поглощению в атмосферном кислороде, рассчитанному в соответствии с работой [6]. В соответствии с этой работой влияние поглощения в атмосферном кислороде может быть заметно ниже высоты 15 км. Экспериментальные данные

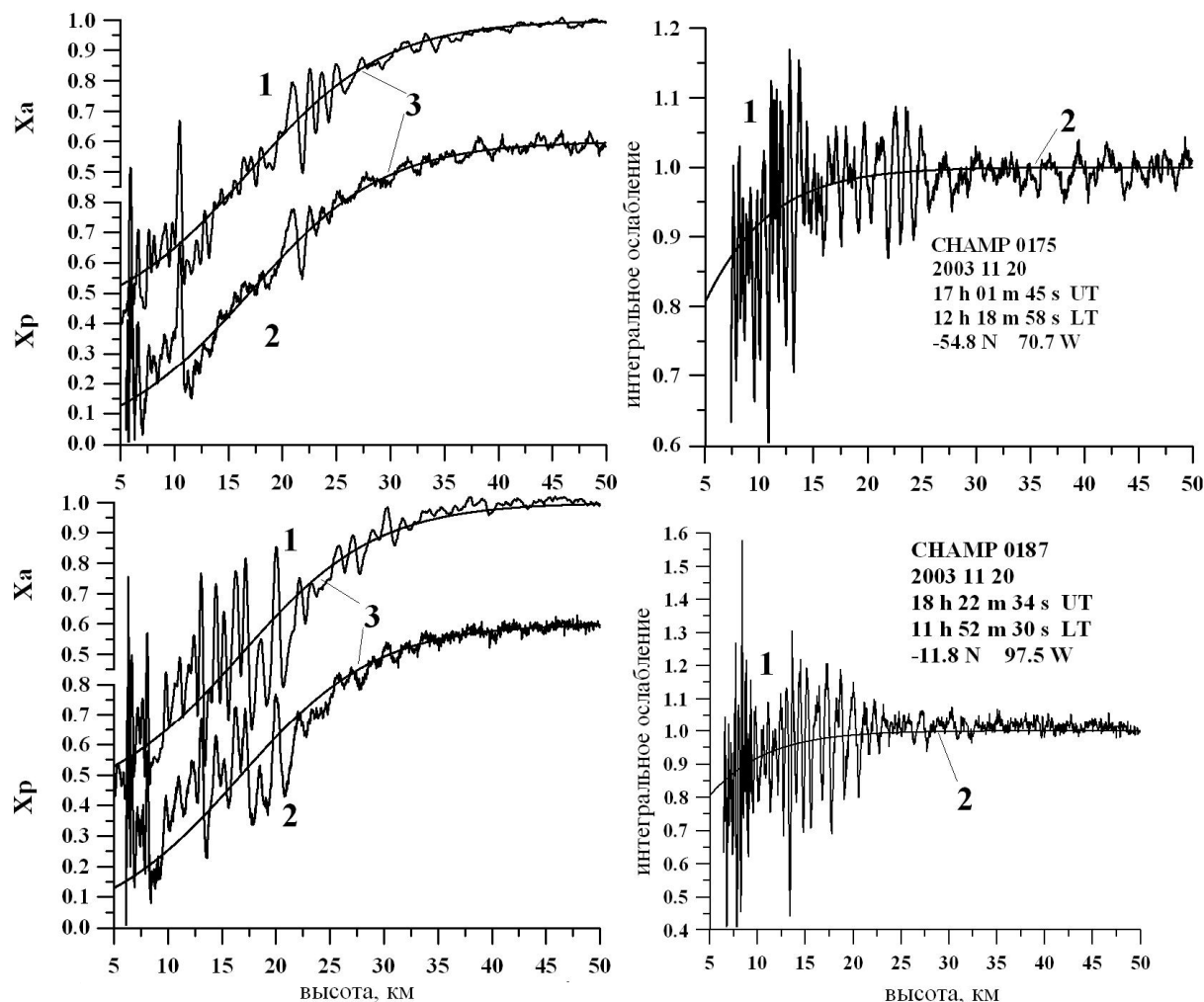


Рис. 2. Рефракционное ослабление $X_p(t)$ и ослабление $X_a(t)$, найденные из фазовых и амплитудных данных (слева).

Интегральное поглощение радиоволн, определенное из отношения X_a/X_p (справа).

согласуются с этим выводом. Ниже высоты 8 км анализ экспериментальных данных указывает на дополнительное ослабление по сравнению с теоретической зависимостью (рис. 2). Это может быть связано с влиянием эффекта поглощения в облаках и водяном паре ниже 8 км. Предварительные результаты измерений поглощения указывают на хорошее соответствие величинам поглощения, описанным в работе [6]. Величина поглощения в атмосфере, измеренного в ходе бистатической радиолокации морской поверхности на длине волны 32 см [7], совпадает с экспериментальной величиной интегрального ослабления, указанной на рис. 2 (правая панель). Как следует из рис. 2, сравнение рефракционных ослаблений, восстановленных из амплитудных и фазовых вариаций, необходимо для выявления слоистых структур в атмосфере. Это сравнение необходимо также для выявления систематических ошибок в амплитудном канале спутниковых радиоголограмм.

Теоретический и экспериментальный анализ радиоголограмм, зарегистрированных в ходе работы CHAMP, FORMOSAT-3 и других низко-орбитальных спутниковых миссий выявил важную связь между вариациями ускорения фазы, производной от доплеровской частоты по времени и интенсивностью радиозатменного сигнала. Обнаруженная связь дает возможность пересчитать ускорение фазы (или производную по времени от доплеровской частоты) в рефракционное ослабление. Это важно для оценки интегрального ослабления радиоволн на транс-ионосферных трассах связи спутник-спутник. Эта зависимость важна также для измерений водяного пара и малых атмосферных газовых составляющих в будущих радиозатменных миссиях ввиду исключения трудности с удалением эффекта рефракционного ослабления из амплитудных данных. Преимущества метода ускорение фазы/интенсивность проверены путем анализа радиозатменных данных CHAMP и FORMOSAT-3. Ранее нами было

показано также, что совместный анализ вариаций ускорения фазы и интенсивности позволяет проводить оценку положения, высоты и наклона слоистых неоднородностей в нижней ионосфере. Рассмотренный метод совместного анализа амплитудных и фазовых вариаций радиоволн на спутниковых трассах может найти применение для изучения плазменных структур в ионосфере, а также слоистых и волновых структур в атмосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-02-17071-а). Авторы признательны Центру геофизических исследований (Потсдам, Германия) и Национальной космической организации Тайваня за представление данных спутниковых миссий CHAMP и FORMOSAT-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakovlev O.I. Space Radio Science. Taylor and Francis, London 2003.
2. Гурвич А.С., Красильникова Т.Г. Об использовании навигационных спутников для радиопросвечивания атмосферы Земли Космические исследования. 1987. Т. 25, № 6. С. 89-95.
3. Melbourne W.G. Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Monograph 6 Deep space communications and navigation series 2004.
4. Liou, Y.-A., Pavelyev, A.G. 2006 Geophys Res Lett 33(23):L23102 1-5
5. Pavelyev, A.G., Liou YA, Wickert J, Schmidt T, Pavelyev AA, Liu SF 2007 J Geophys Res 112, A06326, doi:10.1029/2006JA011625 1-14
6. Кисляков А.Г., Станкевич К.С. 1967 Поглощение радиоволн в атмосфере. Известия ВУЗ-ов. Радиофизика 10(9-10):1244-1270
7. Павельев А.Г., Захаров А.И., Кучерявенков А.И., Молотов Е.П., Сидоренко А.И., Кучерявенкова И.Л., Павельев Д.А. 1997 Распространение радиоволн, отраженных от поверхности Земли при малых углах места на трассе низкоорбитальный спутник-геостационарный спутник. Радиотехника и электроника 42(1):51-57.