

Радиозатменное зондирование атмосферы Земли: принципы и современное состояние

Горбунов М.Е.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Пыжевский пер. 3, gorbunov@ifaran.ru.

Принцип радиозатменного зондирования атмосферы Земли состоит в измерении сигналов систем спутниковой навигации, проходящих через атмосферу Земли, приемниками, установленными на низкоорбитальных спутниках. Этот метод обладает следующими достоинствами: 1) всепогодность, 2) нечувствительность к облачности, 3) глобальное покрытие, 4) относительно низкая стоимость, 5) отсутствие калибровок, 6) когерентные измерения амплитуды и фазы. Последнее открывает широчайшие возможности для применения методов, в основе которых лежит принцип синтезированной апертуры. Это позволяет достигать высокого разрешения, не ограниченного размером зоны Френеля. Первый радиозатменный эксперимент проводился в 1976 году при помощи станций Аполлон и Союз. Тем не менее, именно использование сигналов системы GPS, отличающихся высокой стабильностью частоты позволило добиться точности, требуемой для зондирования атмосферы Земли. Первый радиозатменный эксперимент с использованием системы GPS проводился в 1995–1997 годах (США). Успех этого эксперимента привел к запуску многочисленных спутников, оснащенных приемниками сигналов систем спутниковой навигации. Можно отметить эксперименты CHAMP (2000–2006), COSMIC (2006–2019), COSMIC-2 (2019) и другие. Данные этих экспериментов усваиваются всеми ведущими мировыми центрами прогноза погоды. В работе рассмотрены основные принципы радиозатменного зондирования и математические методы интерпретации данных. Методы основаны на применении теории интегральных операторов Фурье и квантовых плотностей Вигнера и Кирквуда.

The principle of the radio occultation sounding of the Earth's atmosphere consists in the measuring of the signals of the global navigation satellite systems passing through the Earth's atmosphere and acquired by space-borne receivers located onboard low-Earth orbiters. This technique has the advantages: 1) all-weather capability; 2) insensitivity to clouds; 3) global coverage; 4) relatively low costs; 5) no necessity for calibrations; 6) coherent measurements of amplitude and phase. The latter open wide opportunities for the application of the methods based on the synthesized aperture principle. This allows achieving a high resolution not limited by the Fresnel zone size. The first radio occultation experiment was conducted in 1976 during the Apollo/Soyuz mission. Nevertheless, it was the use of GPS signals, characterized by a high stability of the frequency that made it possible to achieve the accuracy required in sounding the Earth's atmosphere. The first radio occultation experiment with the use of GPS was conducted in 1995–1997 in USA. The success of this experiment resulted in numerous launches of satellites equipped by specialized receivers of signals of global navigation satellite systems. In particular these are the following experiments: CHAMP (2000–2006), COSMIC (2006–2019), COSMIC-2 (2019) and others. The data of these experiments are assimilated by all the leading weather prediction centers of the world. In this presentation, we discuss the basic principles of the radio occultation sounding and mathematical methods of the data interpretation. The methods are based on the theory of Fourier integral operators and quantum densities of Wigner and Kirkwood.

Принцип радиозатменного зондирования планетных атмосфер был выдвинут еще в 1960-е годы [1]. К 1967 году относятся первые работы по радиозатменному зондированию ионосферы и атмосферы Венеры [2] и атмосферы Марса [3]. Теоретическое рассмотрение задачи восстановления вертикального профиля показателя преломления в сферически-слоистой атмосфере из измерений доплеровского сдвига частоты было дано в работах 1968 года [4].

Радиозатменные исследования планетных атмосфер продолжались в 1970-е годы [5–8]. В этих экспериментах передатчик располагался на искусственных спутниках исследуемых планет, а приемник на Земле. При исследовании колец Сатурна был впервые применен дифракционный метод обратного распространения [9].

Первая попытка определения параметров атмосферы Земли радиозатменным методом относится к 1976 году [10]. В дальнейшем радиозатменное зондирование атмосферы Земли стало предметом ряда, как теоретических, так и экспериментальных работ. В этих работах использовались линии связи в дециметровом диапазоне между двумя искусственными спутниками Земли. Важное отличие атмосферы Земли от планетных атмосфер заключается в том, что к точности восстановления ее параметров предъявляются гораздо более жесткие требования. Кроме того, об атмосфере Земли и так имеется большой объем информации, поставляемой как спутниковыми, так и наземными системами контактного и дистанционного, активного и пассивного, лимбового и надирного зондирования. Чтобы радиозатменный метод мог успешно конкурировать с прочими методами зондирования, необходима была высокая стабильность частоты передатчика. Идея использования для этой цели спутников системы глобального позиционирования GPS была впервые выдвинута А. С. Гурвичем и Т. Г. Красильниковой, а также группой исследователей из Jet Propulsion Laboratory (JPL) [21,22].

В 1995 году в США был проведен первый эксперимент GPS/MET (GPS Meteorology) по радиозатменному зондированию атмосферы Земли при помощи сигналов системы GPS, принимавшихся на спутнике Microlab-1. Эксперимент показал хорошие результаты [23]. Анализ данных выявил эффекты многолучевого распространения, которые существенно затрудняли интерпретацию данных наблюдений в тропосфере. Для учета этих эффектов был предложен и применен метод обратного распространения [24]. В дальнейшем данные эксперимента GPS/MET были также использованы для анализа ионосферы [26].

Успех эксперимента GPS/MET позволил продолжить эксперименты по радиозатменному зондированию атмосферы Земли. Следующий эксперимент стартовал в 2000 году, когда на борту спутника CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) был установлен приемник сигналов GPS. В этом эксперименте зондирование выполнялось уже на регулярной основе. Анализ данных эксперимента CHAMP привел к дальнейшему развитию методов обработки радиозатменных данных [27–30], в частности, автором данной монографии был разработан метод канонических преобразований [27]. В дальнейшем этот подход получил развитие [31], в результате которого были сформулированы принципы восстановления лучевой структуры волнового поля, позволяющие фактически сводить дифракционную обратную задачу к геометрической.

Существенным недостатком приемников, использованных в экспериментах GPS/MET и CHAMP, являлась реализованная в них система фазовой автоподстройки. Эта система неустойчиво работала в условиях сильных флуктуаций фазы и амплитуды сигнала, характерных для измерений в нижних 4 км в тропиках. Это приводило к отрицательным систематическим ошибкам измерения фазы. В силу того, что эта ошибка падала с высотой, она приводила также к отрицательной ошибке определения угла рефракции и, следовательно, индекса рефракции.

Эксперимент COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) с улучшенной моделью приемника, работающего в режиме открытой петли, и включающий систему из 6 низкоорбитальных спутников, обсуждался, начиная с 2000 года [32]. Сам эксперимент стартовал в 2006 году [33]. Система COSMIC поставляла ежедневно до 3000 глобально распределенных зондирований атмосферы. Большой

объем данных измерений позволил выполнить большое количество различных исследований, как нейтральной атмосферы, так и ионосферы [34]. В настоящее время ресурс системы COSMIC почти исчерпан. В тестовой фазе находится система COSMIC-2, включающей 12 спутников, данные которой станут общедоступны в конце текущего года [40].

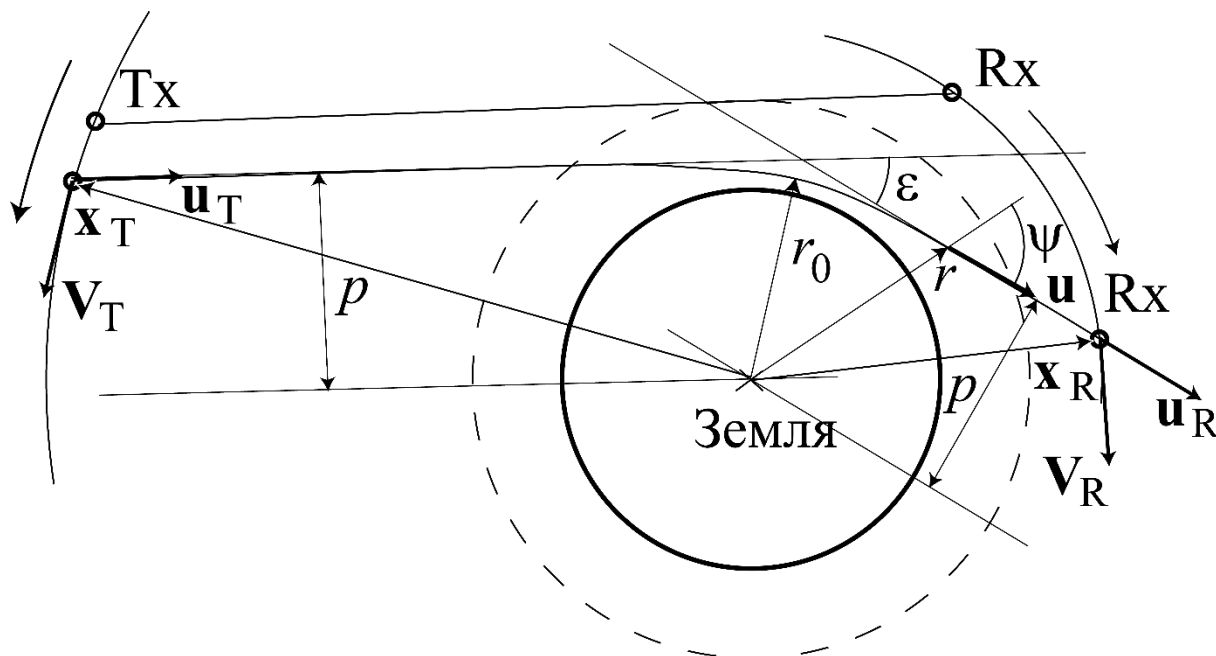


Рис. 1. Геометрия радиозатменного эксперимента.

В формулировках обратных задач зондирования атмосферы, мы будем пользоваться зависимостью угла рефракции ε от прицельного параметра p (рис. 1). Для сферически-слоистой среды профиль угла рефракции связан с профилем показателя преломления $n(r)$:

$$\varepsilon(p) = -2 \int_{r_0}^{\infty} \frac{pn'_r dr}{n\sqrt{n^2 r^2 - p^2}},$$

где высота перигея луча r_0 определяется из уравнения $n(r_0)r_0 = p$. Связь профиля показателя преломления $n(r)$ с профилем угла рефракции $\varepsilon(p)$ носит нелинейный характер. Однако если перейти к рефракционному радиусу x при помощи нелинейной замены координат $x = n(r)r$ то эта связь становится линейной относительно $\ln n$:

$$\varepsilon(p) = -2 \int_p^{\infty} \frac{d \ln n}{dx} \frac{p dx}{\sqrt{x^2 - p^2}},$$

Все нелинейные эффекты описываются зависимостью $x(r)$.

В радиозатменных экспериментах прямые измерения угла рефракции не проводятся, так как это сопряжено с техническими трудностями. Вместо этого измеряется доплеровская частота принимаемых радиосигналов. Если передатчик, например, на спутнике системы GPS излучает сигнал с частотой ω_T , а приемник, установленный на низкоорбитальном спутнике, принимает сигнал с частотой ω_R , то между ними имеется следующее соотношение:

$$\omega_R = \omega_T \left(1 + \frac{\mathbf{V}_T \cdot \mathbf{u}_T - \mathbf{V}_R \cdot \mathbf{u}_R}{c} \right),$$

где c – скорость света в вакууме, \mathbf{V}_R и \mathbf{V}_T – скорости низкоорбитального спутника и спутника системы GPS, \mathbf{u}_R и \mathbf{u}_T – направления луча у приемника и у передатчика. Доплеровская частота, измеряемая в течение радиозахода, преобразуется в фазовую задержку (или набег оптического пути), определяемую следующим образом:

$$\Delta\Psi(t) = \frac{\lambda}{2\pi} \int_0^t \left(\omega_R^{(0)}(t') - \omega_R(t') \right) dt', \quad \omega_R^{(0)} = \omega_T \left(1 + \frac{\mathbf{V}_T \cdot \mathbf{u}^{(0)} - \mathbf{V}_R \cdot \mathbf{u}^{(0)}}{c} \right),$$

где $\mathbf{u}^{(0)}$ – единичный вектор направления передатчик-приемник, $\omega_R^{(0)}(t)$ – вакуумная доплеровская частота, которая была бы измерена в отсутствие атмосферы. Таким образом, фазовая задержка $\Delta\Psi(t)$ целиком связана с эффектом атмосферы. Из фазовой задержки вычислим относительный доплеровский сдвиг частоты:

$$d = \frac{\omega_R - \omega_T}{\omega_T} = d^{(0)} - \frac{1}{c} \frac{d\Delta\Psi(t)}{dt},$$

где $d^{(0)}$ – вакуумный относительный доплеровский сдвиг. Чтобы определить угол рефракции для сферически-слоистой атмосферы, можно пользоваться приведенными выше соотношениями, дополненными законом Снеллиуса в векторной форме:

$$\frac{\mathbf{V}_T \cdot \mathbf{u}_T - \mathbf{V}_R \cdot \mathbf{u}_R}{c} = d, \quad \mathbf{x}_R \times \mathbf{u}_R = \mathbf{x}_T \times \mathbf{u}_T,$$

где \mathbf{x}_R и \mathbf{x}_T – координатные вектора спутников. Этих соотношений вместе с условием, что \mathbf{u}_R и \mathbf{u}_T являются единичными векторами, достаточно для нахождения этих векторов по измеренной доплеровской частоте и баллистическим данным спутников. В этом случае угол рефракции ε определяется как угол между \mathbf{u}_R и \mathbf{u}_T , а прицельный параметр $p = |\mathbf{x}_R \times \mathbf{u}_R| = |\mathbf{x}_R \times \mathbf{u}_R|$.

Профиль показателя преломления определяется путем решения интегрального уравнения Абея и равен:

$$n(x) = \exp \left(\frac{1}{\pi} \int_x^\infty \frac{\varepsilon(p) dp}{\sqrt{p^2 - x^2}} \right).$$

Восстановленные профили $n(r)$ используются для определения температуры T . При этом используются уравнение состояния и уравнение статики:

$$P = R_d(1 + c_q q) \rho T, \\ \frac{dP(z)}{dz} = -g(z) \rho(z),$$

где P – давление, $c_q = \frac{R_v}{R_d} - 1$, R_d – газовая постоянная для сухого воздуха, R_v – газовая постоянная для водяного пара, q – удельная влажность, ρ – плотность воздуха, $g(z)$ – ускорение силы тяжести на высоте z .

На высотах более 7–12 км влажность атмосферы становится пренебрежимо малой. Если ионосферный вклад в угол рефракции исключен, то восстановленный показатель преломления целиком относится к нейтральной атмосфере. Тогда можно определить плотность:

$$\rho(z) = \frac{N(z)}{C_1 R_d}$$

Интегрируя затем уравнение статики, получаем давление $P(z)$, и из уравнения состояния с $q = 0$ находим температуру $T(z)$. В нижней тропосфере нужно определять две неизвестных величины: температуру $T(z)$ и удельное влагосодержание $q(z)$. Одного только профиля показателя преломления $n(z)$ для этого уже недостаточно. Методы определения метеопараметров в этом случае более сложны и в данной работе не рассматриваются.

Рассмотренные выше геометрикооптические соотношения, лежащие в основе радиозатменного зондирования атмосферы, играют важнейшую роль в решении обратной задач. Тем не менее, геометрикооптической техники недостаточно для успешного восстановления показателя преломления. Связано это с ее ограничениями: 1) геометрическая оптика не учитывает эффектов дифракции и 2) геометрикооптические соотношения между фазой и углом рефракции неприменимы в случае многолучевого распространения.

Ключевым понятием в этом случае является лучевое многообразие. Его структурой связана с решением задачи распространения волн в атмосфере. Построение асимптотического решения волновой задачи на основе ее геометрикооптического решения (лучевого многообразия) аналогично построению квазиклассическому решению квантовой задачи динамики частицы на основе множества ее классических траекторий. Такая процедура называется квантованием. Мы будем рассматривать обратную процедуру восстановления структуры лучевого многообразия на основе имеющегося волнового поля. Такую процедуру можно назвать деквантованием.

Применительно к обратной задаче радиозатменного зондирования процедура деквантования состоит из следующих шагов.

1. Построение фазового пространства, связанного с измеряемым сигналом. Координатами в этом пространстве являются координаты точки наблюдения, а импульсами величины, связанные с направлениями наблюдаемых лучей. С точки зрения измерений, каждое возможное направление луча соответствует определенной доплеровской частоте, а весь сигнал в случае многолучевого распространения является суперпозицией элементарных сигналов с плавном меняющейся мгновенной частотой и амплитудой. Это фазовое пространство является пространством геометрикооптических лучей.
2. Построение канонического преобразования фазового пространства. Требование к этому преобразованию заключается в том, что проекция лучевого многообразия на новую координатную ось должно быть однозначным.
3. Построение интегрального оператора Фурье, реализующего это преобразование.
4. Вычисление волнового поля в новом представлении, вычисление нового импульса путем дифференцирования фазы, вычисление прицельных параметров p и углов рефракции ε лучей.

Мы рассматриваем комплексное поле $u(t) = A(t) \exp(ik\Psi(t))$, записанное вдоль траектории наблюдения. Мы вводим фазовое пространство с координатами (t, η) , где импульс $\eta = -\Delta\omega/k$, $\Delta\omega$ – доплеровский сдвиг частоты. Это определение основано на

временной зависимости поля $u(t) = A(t) \exp(ik\Psi(t) - i\omega t)$. Производящая функция преобразования $(t, \eta) \rightarrow (p, \xi)$ имеет вид:

$$S_2(p, t) = -p\theta - \sqrt{r_G^2 - p^2} + p \arccos \frac{p}{r_G} - \sqrt{r_L^2 - p^2} + p \arccos \frac{p}{r_L}.$$

Импульс в представлении лучевых координат равен углу рефракции с отрицательным знаком:

$$\xi(p, t) = -\theta(t) + \arccos \frac{p}{r_G(t)} + \arccos \frac{p}{r_L(t)} = -\varepsilon(p, t).$$

Эта величина равна тому углу рефракции, который был бы у луча с прицельным параметром p при условии, что этот луч наблюдается в момент времени t . Таким образом, для обработки данных измерений волнового поля можно применить оператор с полученной фазовой функцией, при помощи которого мы вычисляем преобразованное поле

$$\hat{\Phi}_2 u(p) = \int a(p, t) \exp(ikS_2(p, t)) u(t) dt = A'(p) \exp(ik\Psi'(p)),$$

где амплитудная функция $a(p, t)$ определяется из требования сохранения энергии и равна:

$$a_2(p, t) = \left(\sqrt{r_L^2 - p^2} \sqrt{r_G^2 - p^2} \left\{ \frac{r_L r_G}{p} \sin \theta \right\}_{3D} \right)^{1/2} \left(\dot{\theta} - \frac{\dot{r}_G}{r_G} \frac{p}{\sqrt{r_G^2 - p^2}} - \frac{\dot{r}_L}{r_L} \frac{p}{\sqrt{r_L^2 - p^2}} \right).$$

Производная его эйконала $\Psi'(p)$ с отрицательным знаком равна фактическому углу рефракции $\varepsilon(p) = \varepsilon(p, t_s(p))$. Для круговой геометрии ($r_G = const$, $r_L = const$, $\dot{\theta} = const$) фазовая функция равна $S_2(p, y) = -p\theta + F(p)$, и оператор сводится к преобразованию Фурье.

Другой подход к обработке радиозатменных данных использует квантовую (лучевую) плотность Вигнера:

$$W(t, \xi) = \frac{k}{2\pi} \int \exp(-ik\xi s) u\left(t + \frac{s}{2}\right) \bar{u}\left(t - \frac{s}{2}\right) ds.$$

Плотность Вигнера обладает следующими свойствами:

1. Значения плотности Вигнера всегда действительны.
2. Значение плотности Вигнера не обязательно положительно. Поэтому ее называют псевдо-плотностью.

3. Плотность Вигнера, как правило, принимает положительные значения в окрестности лучевого многообразия, а в остальной области фазового пространства присутствует осциллирующая компонента («квантовые осцилляции»). В классическом пределе ($k \rightarrow \infty$) положительная компонента стремится к δ -образному микроканоническому распределению, сконцентрированному на лучевом многообразии, при этом частота «квантовых осцилляций» стремится к бесконечности. Таким образом, «квантовые осцилляции» стремятся к 0 в смысле теории обобщенных функций.

4. Плотность Вигнера содержит полную информацию о волновом поле.

5. Если $u_0(t) = \exp(iat + ibt^2/2)$, т.е. мгновенная частота меняется со временем линейно $\xi = a + bt$, плотность Вигнера оказывается равной $\delta(\xi - (a + bt))$. Если задана суперпозиция двух сигналов $u_0(t) = \exp(ia_1t) + \exp(ia_2t)$, плотность Вигнера будет равна $\delta(\xi - a_1) + \delta(\xi - a_2) + 2 \cos((a_1 - a_2)t)$, где последний (перекрестный) член представляет собой «квантовые осцилляции». Плотность Вигнера в случае бесконечной апертуры может точно восстановить линейный тренд мгновенной частоты. Соотношение неопределенностей определяет период «квантовых осцилляций»: во втором примере $\Delta t \Delta a \sim 2\pi$, тогда как две δ -функции корректно воспроизводятся плотностью Вигнера.

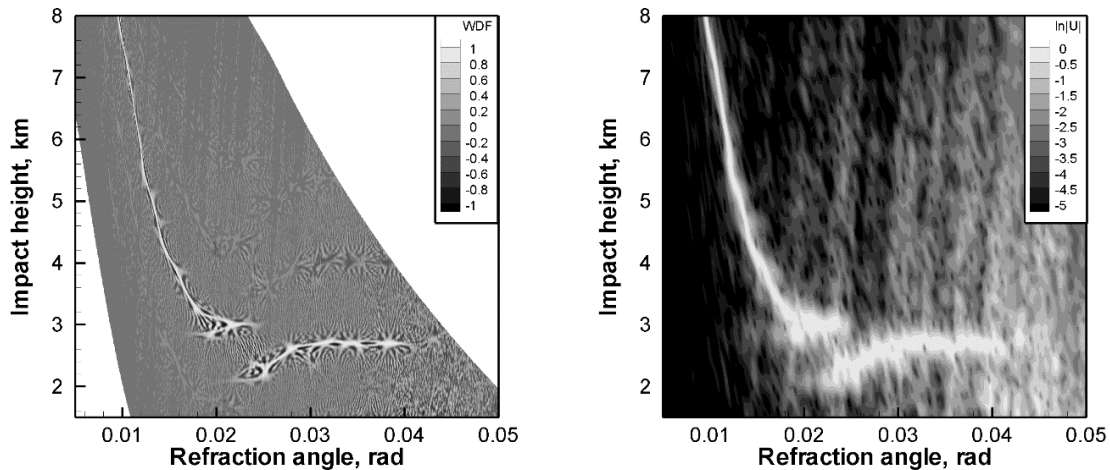


Рис. 2. Радиозаход COSMIC, UTC 0:00, 15 декабря 2008 г., 48,51° N 33,04° E. Слева: Плотность Вигнера сигнала в канале L1. Справа спектрограмма сигнала в канале L1.

На рис. 2 приведен пример функции Вигнера для реальных наблюдений. Для сравнения приводится также спектрограмма, получаемая вычислением спектров в скользящих апертурах. Плотность Вигнера дает более детальную информацию о структуре измеренного сигнала.

Методы анализа радиозатменных данных, основанные на интегральных операторах Фурье и квантовых (лучевых) плотностях в настоящее время широко применяются и развиваются. Они очень эффективны в случае обработки сигналов, измеренных в многолучевых областях, и позволяют разделять. Кроме этого, вертикальное разрешение этих методов не ограничивается размером зоны Френеля, составляющей для стандартной геометрии радиозатменных наблюдений сотни метров. Применение указанных методов позволяет достигать существенно более высокого разрешения, составляющего десятки метров. Квантовые плотности являются очень удобным средством визуализации измеренных сигналов, дающим полную картину распределения энергии в фазовой временно-частотной плоскости. Для этих методов разработаны эффективные реализации, основанные на быстром преобразовании Фурье. Это делает возможным применение этих методов в оперативном режиме. Детальное рассмотрение и обоснование этих методов дается в монографии [41].

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 20-05-00189 А).

Литература

1. Fjeldbo, G., and V. R. Eshleman, 1965: The Bistatic Radar-Occultation Method for the Study of Planetary Atmospheres. *J. Geophys. Res.*, 70(13), 3217-3225,

doi:10.1029/JZ070i013p03217.

2. Mariner Stanford Group, 1967: Venus: Ionosphere and Atmosphere as Measured by Dual-Frequency Radio Occultation of Mariner V. *Science*, 158(3809), 1678-1683, doi:10.1126/science.158.3809.1678.
3. Kliore, A., and D. A. Tito, 1967: Radio occultation investigations of the atmosphere of Mars. *J. Spacecraft Rockets*, 4(5), 578-582, doi:10.2514-3.28912.
4. Phinney, R. A., and D. L. Anderson, 1968: On the Radio Occultation method for studying planetary atmospheres. *J. Geophys. Res.*, 73(5), 1819-1827, doi:10.1029/JA073i005p01819.
5. Kliore, A., G. Fjeldbo, B. Seidel, 1970: First Results of the Mariner-6 Radio Occultation Measurement of the Lower Atmosphere of Mars. *Radio Sci.*, 5(2), 373-379, doi:10.1029/RS005i002p00373.
6. Kolosov, M. A., and Coauthors, 1976: Radio occultation measurements of Venus atmosphere by means of satellites Venera-9 and Venera-10. *Radiotekhnika I Elektronika*, 21(8), 1585-1594.
7. Kolosov, M. A., O. I. Yakovlev, A. I. Efimov, A. G. Pavelyev, and S. S. Matyugov, 1979: Radio occultation of the Venusian atmosphere and bistatic radiolocation of the surface of Venus using the Venera-9 and Venera-10 satellites. *Radio Sci.*, 14(1), 163-173, doi:10.1029/RS014i001p00163.
8. Kliore, A. J., and Coauthors, 1980: Vertical Structure of the Ionosphere and Upper Neutral Atmosphere of Saturn from the Pioneer Radio Occultation. *Science*, 207(4429), 446-449, doi:10.1126/science.207.4429.446.
9. Marouf, E. A., G. L. Tyler and P. A. Rosen, 1986: Profiling Saturn's rings by radio occultation. *Icarus*, 68(1), 120-166, doi:10.1016/0019-1035(86)90078-3.
10. Rangaswamy, S., 1976: Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS-F radio occultation data. *Geophys. Res. Lett.*, 3(8), 483-486, doi:10.1029/GL003i008p00483.
11. Калашников И. Э., Яковлев О. И. О возможности исследования атмосферы Земли методом радиопросвечивания. – *Космические исследования*, 1978, Т. 16, № 6. – с. 943–948.
12. Калашников М. Э., Яковлев О. И. Об определении параметров атмосферы Земли методом радиопросвечивания. – В сб. *Труды пятого всесоюзного совещания по радиометеорологии*. – М.: Гидрометиздат, 1981. – с. 184.
13. Калашников И. Э., Матюгов С. С., Павельев А. Г., Яковлев О. И. Анализ особенностей метода радиопросвечивания атмосферы Земли. – В кн. *Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве*. – М.: Наука. 1986. – с. 208.
14. Елисеев С. Д., Яковлев О. И. Радиопросвечивание атмосферы Земли в диапазоне миллиметровых радиоволн. – *Известия вузов. Радиофизика*, 1986, Т. 32, № 1. – с. 3–10.
15. Яковлев О. И., Гришмановский В. А., Елисеев С. Д., Кучерявенков А. И., Матюгов С. С. Радиопросвечивание атмосферы Земли с помощью двух спутников. – *Доклады АН*, 1990, Т. 315. № 1. – с. 101–103.
16. Яковлев О. И., Вилков И. А., Гришмановский В. А., Елисеев С. Д., Кучерявенков А. И., Ломаева В. В., Матюгов С. С., Молотов Е. П. Рефракционное ослабление при радиопросвечивании атмосферы Земли на трассе спутник–спутник. – *Радиотехника и электроника* 1992. Т. 37. № 1. – с. 42–48.
17. Вилков И. А., Матюгов С. С., Яковлев О. И. Флуктуации амплитуды при радиопросвечивании атмосферы Земли на трассе спутник–спутник. – *Радиотехника и электроника*, 1993, Т. 38, № 5. – с. 795–803.
18. Yakovlev O. I., Matyugov S. S., Vilkov L. A. Attenuation and scintillation of radio waves Earth atmosphere in radio occultation experiments on the satellite-to-satellite link. – *Radio Science*, 1995, Vol. 30, № 3. – p. 591–602.
19. Яковлев О.И., Вилков И.А., Захаров А.И., Кучерявенкова И.Л., Кучеряевнков А.И.,

Матюгов С.С. Изменение частоты, запаздывание и рефракция радиоволн в затменных экспериментах на трассе спутник–спутник. – Радиотехника и электроника 1995, Т. 40, № 9. – с. 1337–1345.

20. Яковлев О. И., Матюгов С. С., Вилков И. А., Захаров А. И., Кучерявенкова И. Л. Флуктуации фазы и частоты радиоволн в затменных экспериментах на трассе спутник–спутник. – Радиотехника и электроника 1996. Т. 41. № 9. – с. 1088–1093.

21. Гурвич А. С. и Красильникова Т. Г., Навигационные спутники для радиозондирования атмосферы Земли. – Исследования Земли из космоса, 1987, Т. 7, № 6. – с. 1124–1131.

22. Melbourne W. G., Yunck T. p., Young L. E., Hager B. H., Lindal G. F., C. H. Liu and Born G. H. GPS geoscience instrument for EOS and Space Station. – JPL Proposal to NASA AO OSSA-1-88. – JPL, 1988.

23. Ware R., Exner M., Feng D., Gorbunov M., Hardy K., Herman B., Kuo Y.-H., Meehan T., Melbourne W., Rocken C., Schreiner W., Sokolovskiy S., Solheim F., Zou X., Anthes R., Businger S., and Trenberth K. GPS sounding of the atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary results. – Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, No. 77. – p. 19–40.

24. Gorbunov M. E. and Kornbluh L. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data. – Journal of Geophysical Research, 2001, Vol. 106, No. D15. – p. 17,161–17,169.

25. Gorbunov, M. E., A. S. Gurvich, and A. V. Shmakov, 2002: Back-propagation and radio-holographic methods for investigation of sporadic ionospheric E-layers from Microlab-1 data. Int. J. Remote Sens., 23(4), 675-685, doi:10.1080/01431160010030091.

26. Sokolovskiy, S., W. Schreiner, C. Rocken, and D. Hunt, 2002: Detection of high-altitude ionospheric irregularities with GPS/MET. Geophys. Res. Lett., 29, doi:10.1029/2001GL013398.

27. Gorbunov, M. E., 2002: Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere. Radio Sci., 37(5), 1076, doi:10.1029/2000RS002592.

28. Gorbunov, M. E., and L. Kornbluh, 2003: Analysis and validation of Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) radio occultation data. J. Geophys. Res., 108, 4584, doi:10.1029/2002JD003175.

29. Marquardt C., K. Schöellhammer, G. Beyerle, T. Schmidt, J. Wickert, and C. Reigber, 2003: Validation and Data Quality of CHAMP Radio Occultation Data. First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, C. Reigber, H. Lühr, P. Schwintzer, eds., Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 384-396.

30. Beyerle, G., J. Wickert, T. Schmidt, and C. Reigber, 2004: Atmospheric sounding by global navigation satellite system radio occultation: An analysis of the negative refractivity bias using CHAMP observations. J. Geophys. Res., 109, D01106, doi:10.1029/2003JD003922.

31. Gorbunov, M. E., and K. B. Lauritsen, 2004: Analysis of wave fields by Fourier integral operators and their application for radio occultations. Radio Sci., 39, RS4010, doi:10.1029/2003RS002971.

32. Rocken, C., Y.-H. Kuo, W. S. Schreiner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, and C. McCormick, 2000: COSMIC System Description. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 11(1), 157-186.

33. Wang, K.-Y., and S.-C. Lin, 2007: First continuous GPS soundings of temperature structure over Antarctic winter from FORMOSAT-3/COSMIC constellation. Geophys. Res. Lett., 34, L12805, doi:10.1029/2007GL030159.

34. Sokolovskiy, S., W. Schreiner, C. Rocken, and D. Hunt, 2009: Optimal Noise Filtering for the Ionospheric Correction of GPS Radio Occultation Signals. J. Atmos. Oceanic Technol., 26(7), 1398-1403, doi:10.1175/2009JTECHA1192.1.

35. Sokolovskiy, S., C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and J. Johnson, 2009: Postprocessing of L1 GPS radio occultation signals recorded in open-loop mode. Radio Sci., 44, RS2002,

doi:10.1029/2008RS003907.

36. Gorbunov, M.E., K. B. Lauritsen, and S. S. Leroy, 2010: Application of Wigner distribution function for analysis of radio occultations. *Radio Sci.*, 45, RS6011, doi:10.1029/2010RS004388.
37. Scherllin-Pirscher, B., A. K. Steiner, G. Kirchengast, Y.-H. Kuo, and U. Foelsche, 2011: Empirical analysis and modeling of errors of atmospheric profiles from GPS radio occultation. *Atmos. Meas. Tech.*, 4(9), 1875-1890, doi:10.5194/amt-4-1875-2011.
38. Gorbunov, M. E., K. B. Lauritsen, H.-H. Benzon, G. B. Larsen, S. Syndergaard, and M. B. Sørensen, 2011: Processing of GRAS/METOP radio occultation data recorded in closed-loop and raw-sampling modes. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1021-1026, doi:10.5194/amt-4-1021-2011.
39. Gorbunov, Michael E., A. V. Shmakov, Stephen S. Leroy, and Kent B. Lauritsen, 2011: COSMIC Radio Occultation Processing: Cross-Center Comparison and Validation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28, 737–751, doi:10.1175/2011JTECHA1489.1.
40. Sokolovskiy, S., Schreiner, W., Weiss, J., Zeng, Z., Hunt, D., and Braun, J.: Initial Assessment of COSMIC-2 Data in the Lower Troposphere, in: Joint 6th ROMSAF Data UserWorkshop and 7th IROWGWorkshop, 19–25 September 2019, Konventum, Elsinore, Denmark.
41. Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. М.: ГЕОС, 2019, 300 с. ISBN 978-5-89118-780-1. https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_2088668