

УДК 523.2 : 523.164.8

РЕФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ ПО ДАННЫМ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

А. Г. Павельев, А. И. Кучерявенков, О. Е. Милехин

Представлены результаты измерения угла рефракции и коэффициента обобщенной сферической расходимости радиоволн при отражении от поверхности Венеры. Измерения проводились на длине волны $\lambda = 32 \text{ см}$ методом бистатической радиолокации с использованием спутников «Венера-9» и «Венера-10». Как угол рефракции, так и обобщенный коэффициент сферической расходимости определялись в эксперименте из измерений зависимости разности частот прямого и отраженного сигналов от времени с использованием траекторных данных о положении спутников. Результаты измерений согласуются с теорией распространения радиоволн в атмосфере Венеры.

Вывод на околопланетную орбиту искусственных спутников «Венера-9 и -10» позволил осуществить первые эксперименты бистатической радиолокации Венеры [1]. Основной целью этих экспериментов явилось изучение свойств рельефа и измерение плотности грунта планеты. Однако помимо этой цели в ходе выполнения экспериментов бистатической радиолокации были получены новые данные об условиях рефракции радиоволн во всей толще атмосферы Венеры. Возможности измерений рефракционных эффектов возникли благодаря тому, что бистатическая радиолокация осуществлялась непосредственно перед заходом спутников в зону радиотени планеты. Ввиду этого угол скольжения при отражении радиоволн от поверхности Венеры был небольшим и рефракционные эффекты проявлялись наиболее сильно.

Ранее измерения рефракции в атмосфере Венеры производились при радиопросвещивании с помощью американских аппаратов типа «Маринер» [2], а также советских спутников «Венера-9 и -10» [3]. В этих экспериментах исследовалась часть атмосферы, расположенная выше уровня критической рефракции. Информация о величине рефракции в слоях атмосферы, находящихся ниже указанного уровня, в экспериментах [2, 3] не была получена. Необходимо отметить также, что периодически повторяемые эксперименты локации Венеры с Земли не дают сведений о величине рефракции, так как основная часть отражаемой в направлении на Землю мощности создается небольшой областью поверхности планеты, для которой угол скольжения близок к 90° . Вместе с тем, информация об условиях радиосвязи в атмосфере Венеры и, в частности, о величине рефракционных эффектов представляет определенный интерес для расчета трасс радиосвязи, проходящих вблизи поверхности планеты [4].

Цель данной статьи состоит в изложении методики и результатов первых экспериментальных измерений рефракции радиоволн в атмосфере Венеры с помощью бистатической радиолокации.

1. Описание схемы измерений рефракционных эффектов в атмосфере Венеры. На рис. 1 представлена схема эксперимента. Точками T и T' обозначены положение спутника и подспутниковой точки, точка D является точкой зеркального отражения от сферической поверхности плане-

ты, линией AA' показан видимый со спутника горизонт Венеры. В точке 3 находится наземный пункт. Лучевые траектории 1 и 2 соответствуют трассам распространения прямой и отраженной волн. Прямая волна не испытывает влияния атмосферы и поверхности планеты. Вследствие различия углов между касательными к лучам 1 и 2 в точке T и вектор-

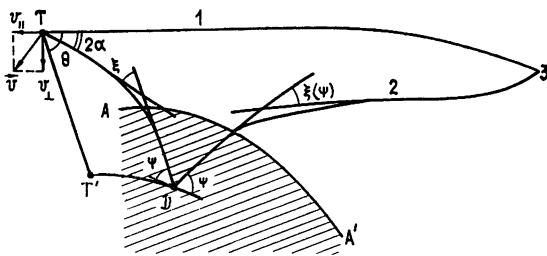


Рис. 1 Схема измерений в эксперименте бистатической радиолокации.

ром скорости \mathbf{v} доплеровские частоты сигналов прямой и отраженной волн не совпадают, что создает возможность раздельного выявления указанных сигналов при обработке. Разность частот прямого и отраженного сигналов $F(t)$ связана с величиной угла 2α между направлением на Землю и направлением касательной к лучевой траектории 2 в точке T (рис. 1):

$$\alpha = \operatorname{arctg} \lambda F / [v_{\perp}^2 + (v_{\perp}^2 + 2\lambda F v_{\parallel} - \lambda^2 F^2)^{0.5}], \quad (1)$$

где λ — длина радиоволны, v_{\perp} , v_{\parallel} — компоненты спутника \mathbf{v} , параллельные плоскости $TT'D$. Компонента v_{\perp} перпендикулярна, а компонента v_{\parallel} параллельна направлению на Землю. Из (1) следует, что знание функции $F(t)$ позволяет с помощью значений v_{\perp} , v_{\parallel} найти функцию $\alpha(t)$. На рис. 1 показаны также угол скольжения радиоволн в точке $D\phi$ и угол рефракции $\xi(\psi)$. В случае сферически симметричной атмосферы выполняется закон Снелля:

$$p = n(a) a \cos \psi = R \sin(\theta - 2\alpha), \quad (2)$$

где $n(a)$ — показатель преломления атмосферы в точке D , a — радиус планеты, R — расстояние спутник — центр планеты, θ — угол с вершиной в точке T между направлениями $T3$ и TT' , p — прицельное расстояние, соответствующее лучу TD . Соотношение (2) позволяет определить угол скольжения ψ , если известны величины a и $n(a)$. Так как лучи 1 и 2 после выхода луча 2 из атмосферы практически параллельны, то, учитывая равенство угла падения и отражения в точке D , получим

$$\xi(\psi) = \psi - \alpha. \quad (3)$$

Таким образом, измеренный по разности доплеровских частот угол α позволяет определить как угол ψ из (2), так и угол $\xi(\psi)$ из (3). Естественно, что дополнительным источником информации при этом являются траекторные данные.

Имеется и другой важный для измерения свойств атмосферы параметр, который можно определить, зная функцию $F(t)$. Этот параметр связан с коэффициентом отражения от поверхности планеты. По определению, коэффициент отражения радиоволн от поверхности планеты η^2 для случая изотропной диаграммы антенны, установленной на спутнике, есть

$$\eta^2 = P_0 / P_n = \sigma / 4\pi R_0^2, \quad (4)$$

где P_0 , P_n — соответственно мощность отраженного и прямого сигналов на входе приемника, σ — эффективный поперечник рассеяния радиоволн поверхностью планеты, R_0 — расстояние (по прямой линии) TD . Согласно теории рассеяния радиоволн поверхностью планеты, окруженной плотной атмосферой [5, 6], коэффициент отражения связан с рефракционным ослаблением на трассах TD X_1^2 и на трассе $D3$ X_2^2 соотношением

$$\eta^2 = X_1^2 X_2^2 B_{\text{сф}}^2 V^2(\psi), \quad (5)$$

где $B_{\text{сф}}^2$ — коэффициент сферической расходимости радиоволны при отражении от поверхности планеты, $V(\psi)$ — коэффициент отражения плоской волны, падающей под углом скольжения ψ к плоской границе раздела атмосфера — грунт планеты. Коэффициент $V(\psi)$ зависит от поляризации, облучающей поверхность волны. В случае, если поляризация облучающей волны горизонтальная или вертикальная, коэффициент $V(\psi)$ совпадает с известным коэффициентом Френеля. Выражения для величин X_1^2 , X_2^2 , $B_{\text{сф}}^2$ были получены ранее в [5, 6]. Произведение этих величин — фактор B^2 :

$$B^2 = X_1^2 X_2^2 B_{\text{сф}}^2, \quad (6)$$

можно выразить как функцию углов ξ и ψ :

$$B^2 = \frac{\sin \psi \cos \psi [q^{-1} \sin 2(\psi - \xi) + \cos(\psi - 2\xi)]^{-1}}{2q^{-1} + \sin \psi - (2q^{-1} + \sin \psi) d\xi/d\psi}; \quad (7)$$

$$q = n(a)/R_d, \quad R_d = (R^2 - p^2)^{0.5} - na \sin \psi. \quad (8)$$

При $\xi = 0$, $n(a) = 1$ выражение (7) переходит в известный коэффициент сферической расходимости при отражении от планеты без атмосферы [7]:

$$B_0^2 = a^2 \sin \psi (a + 2R_{d0} \sin \psi)^{-1} (2R_{d0} + a \sin \psi)^{-1}, \quad (9)$$

$$R_{d0} = (R^2 - a^2 \cos^2 \psi)^{0.5} - a \sin \psi.$$

Ввиду этого обстоятельства фактор B^2 можно назвать обобщенным коэффициентом сферической расходимости радиоволн при отражении от поверхности планеты, окруженной атмосферой. В этом коэффициенте учитываются как рефракционное ослабление радиоволн при распространении в атмосфере, так и эффект расхождения лучей при отражении. Этот коэффициент позволяет переписать (5) в более компактной форме:

$$\eta^2 = B^2 V^2(\psi). \quad (10)$$

Коэффициент B^2 зависит от условий рефракции в атмосфере, а также от взаимного положения спутника и планеты, а величина $V^2(\psi)$ зависит только от свойств грунта планеты. Из (10) видно, что определение B^2 необходимо при нахождении $V^2(\psi)$ по измеренной в эксперименте с помощью выражения (4) зависимости $\eta^2(t)$. Ниже будет показано, что функция $B^2(t)$ может быть определена с помощью траекторных данных и функции $F(t)$. Для этого преобразуем (7). Учитывая соотношения (2), (3), (8), получим

$$\sin \theta = [R_d \sin 2(\psi - \xi) + na \cos(\psi - 2\xi)]/R. \quad (11)$$

Дифференцируя (2) по p при $R = \text{const}$, находим

$$(R^2 - p^2)^{0.5} \frac{\partial \theta}{\partial p} = - \left[2q^{-1} + \sin \psi - 2(q^{-1} + \sin \psi) \frac{d\xi}{d\psi} \right]. \quad (12)$$

Из (11), (12), (7), используя (2), получим

$$B^2 = -\operatorname{tg}(\theta - 2\alpha)/R \gamma \sin \theta, \quad \gamma = \partial R / \partial \theta. \quad (13)$$

Дифференцируя функцию $\theta(t)$ по времени, определяем $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = [\dot{\theta} - \dot{R}(\partial \theta / \partial R)] / \dot{p}, \quad (14)$$

где точкой обозначено дифференцирование по t . Производную \dot{p} можно найти из (2) и подставить в (14):

$$\dot{\gamma} = \frac{[\dot{\theta}R \cos(\theta - 2\alpha) - R \sin(\theta - 2\alpha)] [R \cos(\theta - 2\alpha)]^{-1}}{\dot{R} \sin(\theta - 2\alpha) + \dot{\theta}R \cos(\theta - 2\alpha) - 2\alpha R \cos(\theta - 2\alpha)}. \quad (15)$$

Выразим производные \dot{R} , $\dot{\theta}$ через компоненты v_{\perp} , v_{\parallel} . Положительные направления отсчета величин v_{\parallel} , v_{\perp} показаны стрелками на рис. 1. После линейных алгебраических преобразований находим:

$$R \dot{\theta} = -v_{\parallel} \sin \theta - v_{\perp} \cos \theta, \quad R = v_{\parallel} \cos \theta - v_{\perp} \sin \theta. \quad (16)$$

Подставив (16) в (15) и затем (15) в (13), получим

$$B^2 = -\frac{\sin(\theta - 2\alpha)}{\sin \theta} \left[\frac{2R \cos(\theta - 2\alpha) d\alpha}{(v_{\parallel} \sin 2\alpha + v_{\perp} \cos 2\alpha) dt} + 1 \right]. \quad (17)$$

Из экспериментальных данных следует, что первое слагаемое в квадратных скобках (17) всегда отрицательно и по модулю больше единицы, это обеспечивает выполнение условия $B^2 > 0$. Формула (17) дает возможность по известным параметрам траектории спутника θ , R , v_{\perp} , v_{\parallel} , а также по найденной из измерений разности частот функции $\alpha(t)$ определить обобщенный коэффициент сферической расходимости B^2 . Затем, используя измерения коэффициента отражения η^2 , можно найти функцию $V^2(\psi)$, связанную простым соотношением с параметрами грунта планеты.

Полезно с общей точки зрения рассмотреть полученные результаты. Угол рефракции ξ и угол скольжения ψ являются по существу «внутренними» характеристиками атмосферы. Параметры α , p , а также B^2 можно назвать «внешними» характеристиками, так как они соответствуют покинувшим атмосферу радиоволнам. Знание внешних параметров, например, функции $\alpha(p)$, позволяет определить зависимость угла рефракции от угла скольжения $\xi(\psi)$ при условии, что известна величина показателя преломления на границе раздела атмосфера — поверхность. Наоборот, знание зависимости $\xi(\psi)$ дает возможность найти $\alpha(p)$. Измерение величины B^2 , кроме того, позволяет определить производную $d\alpha/dp$ и, следовательно, производную $d\xi/d\psi$. Согласно (7) имеем

$$B^2 = -p / \{R \sin \theta [1 + 2(R^2 - p^2)^{0.5} d\alpha / dp]\}. \quad (18)$$

Из (18) следует, что

$$\frac{d\alpha}{dp} = - \left(1 + \frac{p}{B^2 R \sin \theta} \right) / 2\sqrt{R^2 - p^2}. \quad (19)$$

Соотношение (18) определяет B^2 как функцию прицельного расстояния p , а выражение (19) связывает производную $d\alpha/dp$ с измеренной функцией $B^2(t)$.

2. Анализ численных результатов. На рис. 2 дана полученная по экспериментальным данным сглаженная зависимость $\alpha(p)$. Сглаживание проводилось путем построения аппроксимирующего экспериментальные значения $\alpha(p)$ полинома с использованием метода наименьших квадратов. По горизонтальной оси на рис. 2 отложены значения p в километрах, по вертикальной оси — α в градусах. Кривые 1, 2 на рис. 2 получены для одного сеанса бистатической радиолокации по дан-

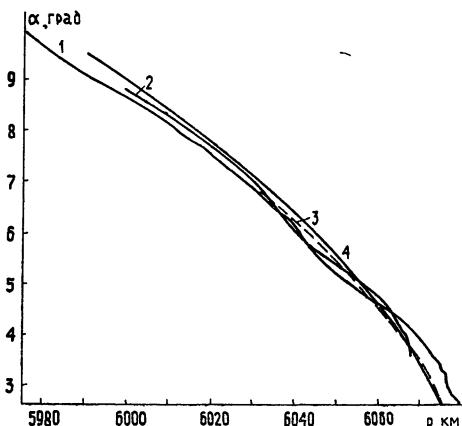


Рис. 2.

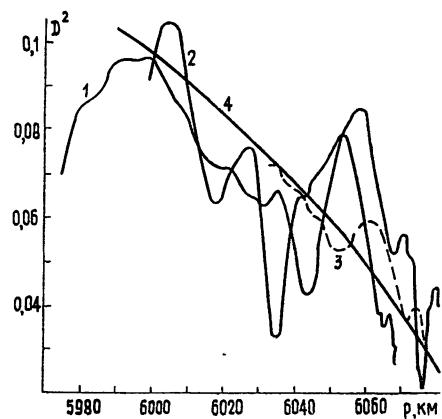


Рис. 3.

Рис. 2. Зависимость $\alpha(p)$ по данным бистатической локации атмосферы Венеры
Рис. 3. Зависимость обобщенного коэффициента сферической расходности от прицельного расстояния при высоте спутника над планетой, равной 1500 км.

ным двух далеко разнесенных наземных пунктов. Кривая 3 соответствует другому сеансу бистатической радиолокации, проведенному на 4 дня раньше. Отличия между кривыми 1—3 невелики, что указывает на достаточно высокую точность измерений, а также на определенную стабильность условий рефракции в атмосфере Венеры. Кривая 4 на рис. 2 является теоретической, построенной для стандартного профиля показателя преломления, полученного по модели атмосферы Венеры [8]. Кривая 4 на рис. 2 достаточно хорошо согласуется с экспериментальными кривыми 1—3. Наибольшие отклонения имеются при значениях $p = 6070 \div 6080$ км, для которых погрешность измерений была выше.

Получение зависимости $B^2(p)$ является более сложной задачей, чем определение функции $\alpha(p)$. Это связано с тем, что в выражении (17) для $B^2(p)$ входит производная от измеряемой в эксперименте функции $\alpha(p)$. Производную $\alpha(t)$ можно найти путем сглаживания экспериментальных данных. Результаты определения функции $B^2(p)$ даны на рис. 3. По вертикальной оси на рис. 3 отложены значения $B^2(p)$, по горизонтальной оси — значения прицельного расстояния, выраженные в километрах. Кривые 1—3 на рис. 3 соответствуют тем же сеансам, что и кривые 1—3 на рис. 2. Кривая 4 является теоретической, построенной для стандартной зависимости показателя преломления при тех же значениях расстояния R , которое наблюдалось в обоих сеансах бистатической радиолокации. Из рис. 3 видно, что отличие экспериментальной зависимости $B^2(p)$ от теоретической больше, чем для функции $\alpha(p)$. Это связано с погрешностями при численном дифференцировании зависимости $\alpha(t)$. В целом ход кривой $B^2(p)$ согласуется с теоретической функцией $B^2(p)$. В интервалах $5990 \text{ км} \leq p \leq 6010 \text{ км}$, $6050 \text{ км} \leq p \leq 6070 \text{ км}$ экспериментальные значения $B^2(p)$ проходят выше теоретической кривой, а в диапазоне $6010 \text{ км} \leq p \leq 6040 \text{ км}$ не-

сколько ниже. Эти отличия могут быть связаны как с влиянием вариаций высоты отражающей области, так и с возможными отклонениями атмосферы от сферической симметрии. В целом найденная в экспериментах бистатической радиолокации функция $B^2(p)$ хорошо согласуется с теоретическими представлениями о величине рефракционного ослабления радиоволн в атмосфере Венеры [5, 6]. Ниже рассмотрим результаты измерения функции $\xi(\psi)$.

Порядок определения угла рефракции как функции угла скольжения состоял в следующем. По известной разности частот прямого и отраженного сигналов $F(t)$ находилось значение α (формула (1)). Затем по формуле (2) определялось соответствующее значение p . После этого вычислялся угол скольжения ψ :

$$\psi = \arccos p/a n(a). \quad (20)$$

При вычислениях принималось $a = 6050 \text{ км}$, $n(a) = 1,0164$. Далее из уравнения (3) отыскивалась величина ξ .

Результаты измерения угла рефракции в атмосфере Венеры по данным одного из сеансов бистатической радиолокации показаны на рис. 4. По вертикальной оси на рис. 4 отложены значения угла рефракции, по горизонтальной оси — значения угла скольжения, выраженные в градусах. Точками показаны экспериментальные значения. На рис. 4 проведена также теоретическая кривая, которой соответствует кривая 4 на рис. 2. Экспериментальные точки довольно хорошо согласуются с теоретической кривой. Разброс точек характеризует точность измерений. Она составляет примерно $\pm 0,2^\circ$, т. е. 2—4% от измеренного значения угла рефракции. Имеющийся разброс может быть также в некоторой части обусловлен изменением высоты рельефа, а также существованием нерегулярностей в атмосфере Венеры.

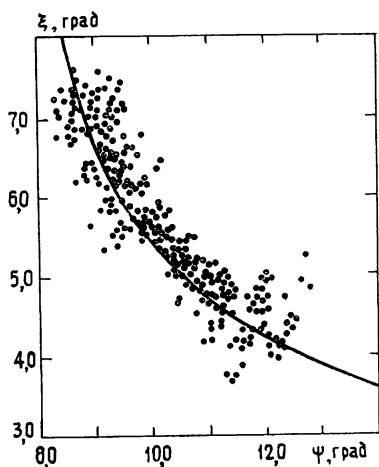


Рис. 4. Зависимость угла рефракции от угла скольжения по данным бистатической радиолокации Венеры.

Влияние последнего фактора можно оценить, используя данные работ [9, 10]. Согласно работе [9] дисперсия флуктуаций частоты σ_1^2 при прохождении радиоволнами пути L через турбулентную среду пропорциональна произведению $\sigma_2^2 \times v^2 L/\lambda^2$, где σ_2^2 — дисперсия флуктуаций диэлектрической проницаемости, $v = 2\pi/l$, l — характерный масштаб турбулентных неоднородностей, v — составляющая средней скорости перемещения лучевой траектории относительно турбулентных неоднородностей, перпендикулярная трассе распространения радиоволн. В работе [10] описан эксперимент радиопросвечивания атмосферы Венеры, в котором была измерена величина σ_1 . При $L \approx 2000 \text{ км}$, $\lambda = 32 \text{ см}$ значение σ_1 составило $0,2 \text{ Гц}$. При бистатической радиолокации длина пути, проходимого радиоволнами в турбулентной атмосфере, возрастает в 2—3 раза, а скорость перемещения лучевой траектории остается приблизительно такой же, как и при радиопросвечивании. В соответствии с этим погрешность, связанная с влиянием турбулентности атмосферы при измерениях разности частоты прямого и отраженного сигналов будет порядка $0,5$ — $0,8 \text{ Гц}$, что составляет $0,02$ — $0,1\%$ от величины абсолютной разности частот F , наблюдавшейся в эксперименте.

Изменение средней высоты отражающей области также влияет на величину разности частот. Оценки, проведенные нами для случая, соответствующего обсуждаемым в данной статье экспериментам, показывают, что уменьшение средней высоты отражающей области на 1 км вызывает увеличение F на 1,5 Гц. Таким образом, относительное влияние двух обсужденных факторов определяется свойствами атмосферы и рельефа исследуемых районов.

Первые измерения рефракционных эффектов, проведенные с помощью метода бистатической радиолокации на длине волны $\lambda = 32$ см, дали результаты, согласующиеся с ожидаемыми на основании существующей теории распространения радиоволн в плотной атмосфере Венеры [5, 6]. Величина обобщенного коэффициента сферической расходимости B^2 изменяется в пределах от 0,12 при $\phi = 16^\circ$ до 0,01—0,02 при $\phi = 9^\circ$. Введение понятия обобщенного коэффициента сферической расходимости целесообразно в связи с тем, что именно этот коэффициент находится из измерений зависимости разности частот отраженного и прямого сигналов от времени. Знание этого коэффициента позволяет исключить при измерениях коэффициента отражения от планеты фактор, связанный с влиянием атмосферы, что упрощает отыскание величины диэлектрической проницаемости и плотности грунта планеты.

Изложенные в данной статье результаты подтверждают обоснованность предложенной методики измерения рефракционных параметров и указывают на эффективность применения метода бистатической радиолокации для исследования атмосферы Венеры.

ЛИТЕРАТУРА

- Павельев А. Г., Колосов М. А., Яковлев О. И., Кучерявенков А. И., Матюгов С. С., Каевицер В. И., Калашников И. Э.—ДАН СССР, 1976, 230, № 5, с 1059
- Fjeldbo G., Kliore A., Eshleman V. R.—Astron. J., 1971, 76(2), p. 123.
- Kolosov M. A., Yakovlev O. I., Efimov A. I., Pavelyev A. G., Matyugov S. S.—Radio Sci., 1979, pt. 14, p. 1
- Яковлев О. И. Распространение радиоволн в солнечной системе — М.: Сов. радио, 1974.
- Павельев А. Г., Кучерявенков А. И.—Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 7, с. 1345.
- Павельев А. Г., Кучерявенков А. И.—Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 8, с. 1569.
- Павельев А. Г., Просин А. В. В кн.: Передача информации по радиоканалам, содержащим статистически неоднородные среды.—М.: Наука, 1976.
- Маров М. Я., Кузьмин А. Д. Физика планеты Венера.—М.: Наука, 1974
- Размансов В. М. Кандидатская диссертация, М., 1979.
- Тимофеева Т. С., Яковлев О. И., Ефимов А. И., Круглов Ю. М., Анцибор Н. М. Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн — М.: Наука, 1978, ч. 1, с. 248.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
2 апреля 1980 г.,
после доработки
1 сентября 1980 г.

REFRACTION EFFECTS IN THE VENUS ATMOSPHERE FROM DATA OF BISTATIC RADIOLOCATION

A G Pavelyev, A I Kucheryavenkov, O E Milekhin

The results of measurements of the refraction angle and the generalized coefficient of the spherical divergence of radio waves in the atmosphere of Venus are presented. Measurements were made at $\lambda = 32$ cm by the method of bistatic radiolocation using satellites «Venera-9» and «Venera-10». Both the refraction angle and the generalized coefficient of the spherical divergence are defined in the experiment from measurements of dependence of the Doppler frequencies of the direct and reflected signals on the time using the satellite trajectory data.