

Амплитудный метод диагностики частоты соударений в ионосфере Земли методом бихарактеристик

А.С. Крюковский¹, Е.В. Михалёва¹, Д.В. Растягаев¹

¹ АНО ВО «Российский новый университет»
105005, г. Москва, ул. Радио, 22
E-mail: Kryukovsky56@yandex.ru

Создан амплитудный метод восстановления эффективной частоты соударений электронов на основе данных об ослаблении радиосигнала при наклонном зондировании ионосферы Земли. Для определения расходимости радиосигнала применена расширенная бихарактеристическая система Лукина. Выполнен численный эксперимент. Рассмотрены возможности экстраполяции полученных результатов при восстановлении частотного профиля. Получено удовлетворительно совпадение исходных значений эффективной частоты соударений и расчётных значений.

Ключевые слова: ионосфера, эффективна частоты соударений, наклонное зондирование, лучи, бихарактеристики, радиосигнал, амплитуда, расходимость.

Amplitude method for diagnosing the frequency of collisions in the Earth's ionosphere using the bicharacteristics method

A.S. Kryukovsky¹, E.V. Mikhaleva¹, D.V. Rastyagaev¹

¹ Russian New University.

An amplitude method has been created for reconstructing the effective frequency of electron collisions based on data on the attenuation of the radio signal during oblique sounding of the Earth's ionosphere. To determine the divergence of the radio signal, the extended Lukin bicharacteristic system was used. A numerical experiment was performed. The possibilities of extrapolating the obtained results when reconstructing the frequency profile are considered. A satisfactory agreement between the initial values of the effective collision frequency and the calculated values was obtained.

Keywords: ionosphere, effective collision frequencies, oblique sounding, rays, bicharacteristics, radio signal, amplitude, divergence.

Введение

Необходимость диагностики и контроля параметров ионосферной плазмы определяется влиянием ионосферы Земли на функционирование радиосистем различного назначения: радиолокации, радиосвязи и радионавигации, актуальной задачей является диагностика и контроль ионосферы. Также актуальность исследований связана с осуществлением мониторинга экстремальных явлений в атмосфере Земли [1-3].

При расчете характеристик распространения радиоволн на ионосферных трассах помимо распределения электронной концентрации в пространстве и времени, а также величины и направления магнитного поля Земли, важную роль играет эффективная частота соударений электронов с нейтральными молекулами [4], от которой зависит поглощение электромагнитных волн, особенно в нижних слоях ионосферной плазмы – слоях E и D.

Существуют разные способы определения эффективной частоты соударений. Например, могут быть использованы ракетные измерения плотности и температуры в

нижних слоях ионосферы, что позволяет рассчитать эффективную частоты соударений электронов. В последнее время развивается метод определения эффективной частоты столкновения в области нижней ионосферы по данным анализа радиозатменных измерений [5].

Наиболее естественные подходы к определению эффективной частоты соударений связаны с измерением поглощения радиоволн при прохождении ионосферных слоёв. В монографии [6] отмечены пять способов измерения поглощения: импульсный метод, риометрический метод, метод непрерывного излучения, минимальной частоты и метод развёртывания по частоте [7, 8]. В настоящей работе, разрабатывая амплитудный подход, мы опираемся на возникшую относительно недавно возможность прямого измерения излучения антенной системы с помощью беспилотных летательных аппаратов [9]. Математическое моделирование распространения радиоволн в возмущенной ионосферной плазме [10], привязанное непосредственно к оперативным данным наклонного и вертикального зондирования [11-13], является перспективным методом решения данной задачи.

В работах [14-16] рассматривались случаи, когда методом получения данных об ионосфере Земли было вертикальное зондирование. В этой работе мы обобщим полученные результаты [14-16] на случай наклонного (а точнее, слабонаклонного) зондирования ионосферы. Актуальность такого подхода связана с активными проводящимися в настоящее время экспериментами по мониторингу ионосферы Земли на слабонаклонных трассах [11].

Бихарактеристическая система и лучевые траектории

Главным отличием слабонаклонного подхода к построению амплитудного метода восстановления эффективной частоты соударений электронов является необходимость решения задачи “пристрелки”, то есть определения всех лучей, пришедших из передатчика в приёмник. Она решается методом бихарактеристик Гамильтона-Лукина [17-19]. В данном разделе ограничимся изотропным случаем. Тогда система бихарактеристик, в которой \vec{r} – координаты луча, ω – круговая частота, \vec{k} – волновой вектор, t – время, ε – эффективная диэлектрическая проницаемость, несколько упрощается:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{2\vec{k}c^2}{\partial(\varepsilon\omega^2)/\partial\omega}, \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{\omega^2\partial\varepsilon/\partial\vec{r}}{\partial(\varepsilon\omega^2)/\partial\omega}, \quad (1)$$

однако упростить начальные условия как для случая вертикального зондирования не получится:

$$\begin{aligned} k_x(0) &= \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_0}\cos\alpha\cos\beta, & k_y(0) &= \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_0}\cos\alpha\sin\beta, \\ k_z(0) &= \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_0}\sin\alpha, & x(0) &= y(0) = z(0), & \varepsilon_0 &= \varepsilon(0). \end{aligned} \quad (2)$$

Результат вычислений приведен на рис. 1, где показано 45 лучей. Источник излучения расположен в начале координат, а приёмник правее – на расстоянии 100 км. Электронная концентрация ионосферы N определяется формулами:

$$\begin{aligned} N(z) &\approx 7.025426 \times 10^4 \exp\left[\frac{1}{2}(1 - \exp\theta_1 + \theta_1)\right] + \\ &+ 5.6182804 \times 10^5 \exp\left[\frac{1}{2}(1 - \exp\theta_2 + \theta_2)\right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta_1 = \frac{1}{40}(196 - z), \quad \theta_2 = \frac{1}{55}(263 - z), \quad (4)$$

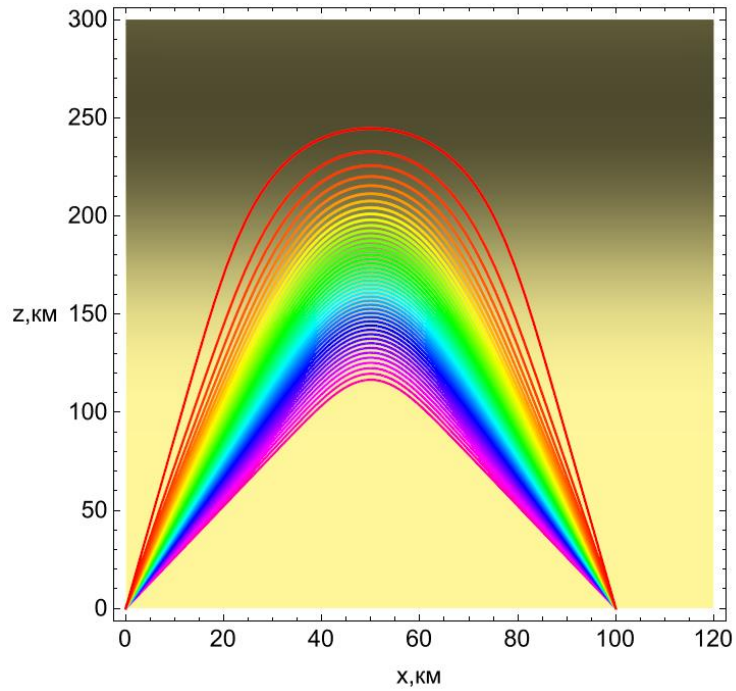


Рис. 1. Траектории лучей, соединяющих источник и приёмник на разных частотах; фиолетовый нижний луч – частота 1 МГц; красный верхний луч – частота 6.993 МГц

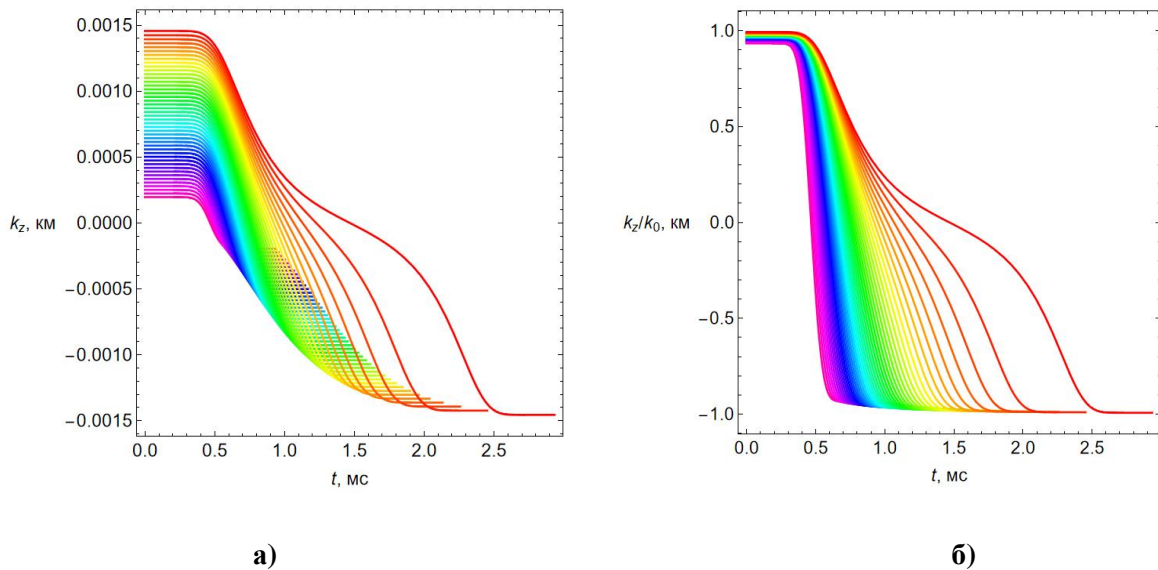


Рис. 2. Зависимость вертикальной компоненты волнового вектора от времени; а – абсолютные значения, б – относительные значения.

а эффективная диэлектрическая проницаемость среды рассчитывается как:

$$\varepsilon = 1 - X, \quad X = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 = \frac{4\pi e^2 N(z)}{m_e \omega^2}. \quad (5)$$

На рис. 2 показаны зависимости вертикальной компоненты волнового вектора от группового времени. Видно, что до входа в ионосферу вертикальная компонента остаётся постоянной, а потом начинает убывать и меняет знак.

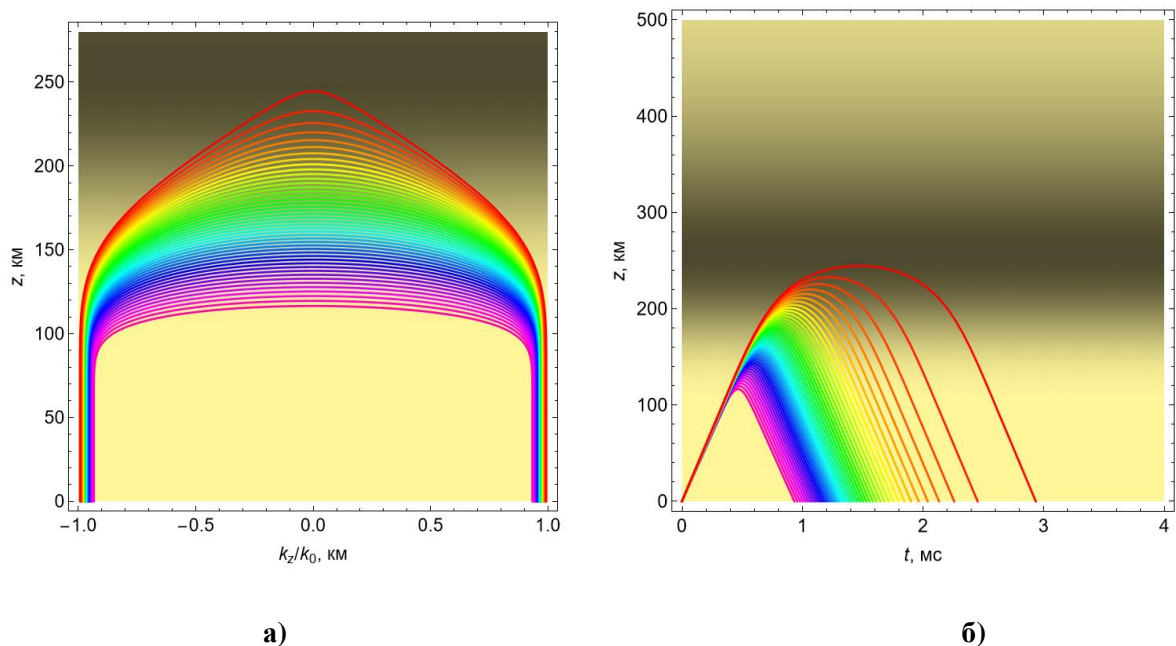


Рис. 3. Лучевые характеристики; а – зависимость вертикальной компоненты волнового вектора от высоты; б – зависимости высоты лучей от группового времени.

На рис. 3 а показаны зависимости волнового вектора (в относительных единицах) от высоты. На этом рисунке (в отличие от рис. 1) лучи движутся слева на право. Частота самого верхнего (красного) луча такова, что небольшое её увеличение приведёт к просачиванию волны сквозь ионосферный слой. На рис. 3 б приведены зависимости высоты лучей от группового времени. Видно, что хотя все лучи приходят на поверхность Земли в одну точку, приходят они в разное время.

Лучевые характеристики в точке приёма сигнала

На основе бихарактеристической системы можно установить зависимость высоты отражения луча $z_m=z(t_m)$ от времени прихода луча в точку отражения t_m . Эта зависимость показана на рис. 4.

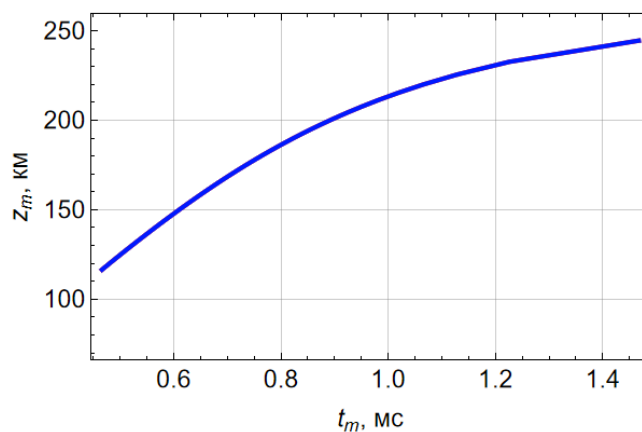


Рис. 4. Зависимость высоты отражения луча от времени прихода луча в точку отражения.

На рис. 5 приведена зависимость высоты отражения луча от частоты. Высота отражения с частотой плавно растет: сначала медленно, а после точки перегиба всё быстрее, стремясь к максимуму ионосферного слоя.

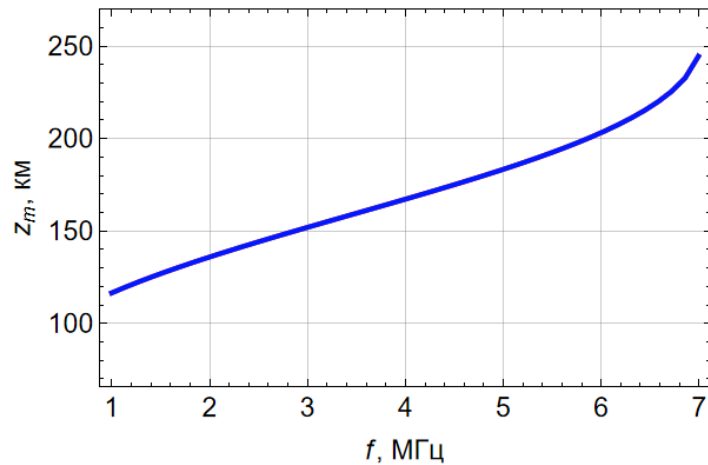


Рис. 5. Зависимость высоты отражения луча от частоты.

На рис. 6 показана зависимость времени прихода луча t_m в точку отражения от рабочей частоты f . Поскольку траектории слабонаклонные, и горизонтальными градиентами можно пренебречь, то данный рисунок – это ионограмма наклонного зондирования.

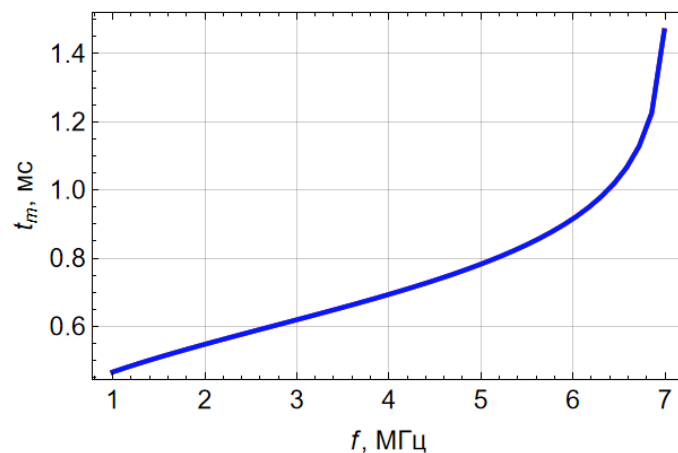


Рис. 6. Зависимость времени прихода луча t_m в точку отражения от рабочей частоты f .

Амплитудные характеристики в точке приёма сигнала

Рассмотрим теперь амплитудные характеристики радиосигналов. Амплитуда радиосигнала A определяется как

$$A = E_0 D \exp[-\psi] , \quad (6)$$

где E_0 – амплитуда поля вне ионосферы на некотором расстоянии r_0 от источника излучения, ψ – поглощение, а D – лучевая расходимость. Расходимость D находится как соотношение якобианов

$$D = \sqrt{\left| \frac{J_0}{J} \right|}, \quad \hat{J} = \begin{vmatrix} x'_t & y'_t & z'_t \\ x'_\zeta & y'_\zeta & z'_\zeta \\ x'_\eta & y'_\eta & z'_\eta \end{vmatrix}, \quad \hat{J}_0 = \hat{J}|_{r=r_0}. \quad (7)$$

Однако существенно упростить формулу (7) уже не получится. Первая строчка в якобиане находится из решения бихарактеристической системы Гамильтона-Лукина, а две другие – из решения расширенной бихарактеристической системы с начальными условиями [20,21].

На рис. 7 показано ослабление радиосигнала за счет расходимости лучевого потока, вычисленное по формуле:

$$A_m = -20 \lg \sqrt{\left| \frac{J_0}{J} \right|}. \quad (8)$$

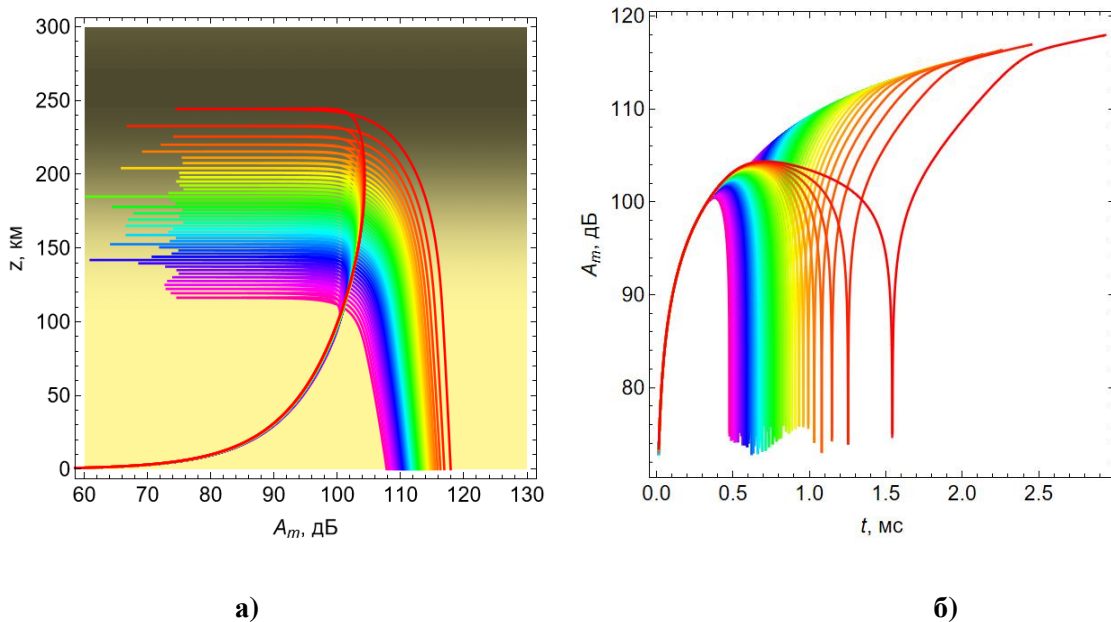


Рис. 7. Амплитудное ослабление радиосигнала A_m вдоль лучей: а – зависимость от высоты z , б – зависимость от группового времени t .

Видно, что ослабление для всех частот сначала резко увеличивается, потом (для каждого луча на своей высоте) возникает каустика (ослабление уменьшается за счет каустической фокусировки), а затем ослабление опять увеличивается и на земле составляет от 108 до 118 дБ (рис. 7 а). Из рис. 7 б следует, что для каждой частоты каустики возникают при определенном значении группового времени и это значение увеличивается с ростом частоты.

На рис. 8 показаны зависимости корня из отношения якобианов D и ослабления A_m от частоты f , вычисленные в точке приёма.

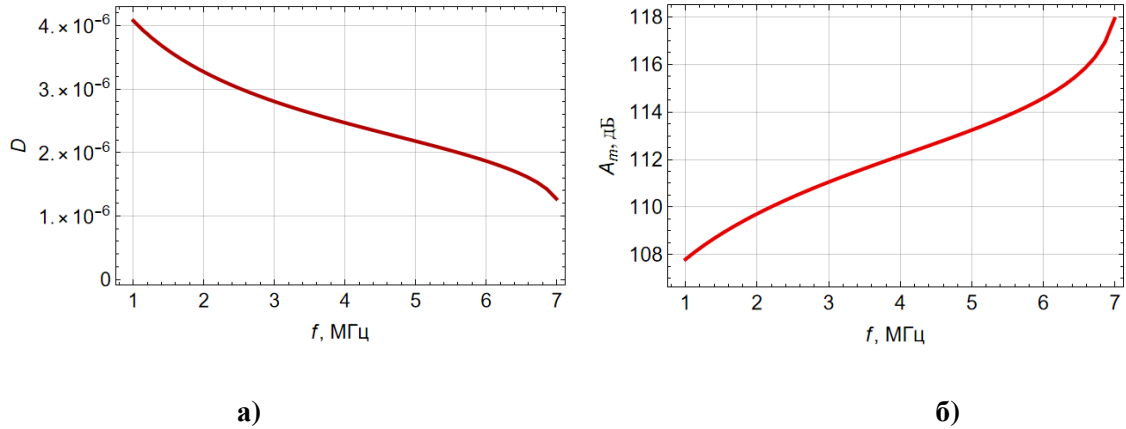


Рис. 8. Расходимость в точке приёма; зависимость от частоты f : а – корня из отношения якобианов D , б – ослабления радиосигнала A_m .

С ростом частота величина D убывает, а ослабление нарастает.

Предположим, что эффективная частота соударений ν_e электронов известна и определяется формулой:

$$\nu_e = 10^{-h_e}, \quad h_e \approx -2,144 + 16,425 \exp(-z/85) + 0,024z, \quad (9)$$

где высота z выражена км. График зависимости десятичного логарифма эффективной частоты соударений ($\lg \nu_e$) от высоты z приведен на рис. 9.

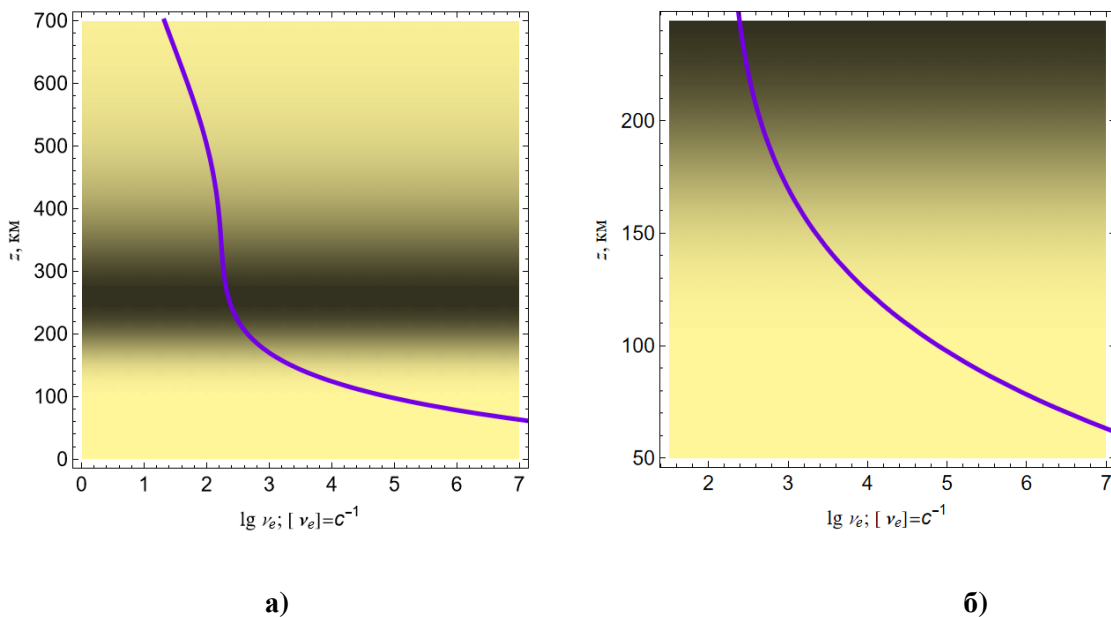


Рис. 9. Зависимость эффективной частоты соударений от высоты; а – $z \in [60 \text{ км}, 700 \text{ км}]$, б – $z \in [50 \text{ км}, 250 \text{ км}]$.

Эффективная частота соударений электронов быстро спадает с высотой несмотря на рост электронной концентрации, поскольку уменьшается плотность нейтралов (рис. 9 а). Поэтому существенным для задач радиосвязи являются значения эффективной частоты соударений в нижней ионосфере (рис. 9 б), определить которые и позволяет амплитудный метод.

Воспользовавшись формулой (см. [14, 22]):

$$\psi = -\frac{\omega}{2} \int_0^t \varepsilon_2 dt, \quad (10)$$

в которой

$$\varepsilon_2 \cong -X \frac{Z}{1+Z^2}, \quad (11)$$

а

$$Z = \frac{v_e}{\omega}. \quad (12)$$

На рис. 10 а показана зависимость поглощения (в Неперах) от частоты в точке приёма, а на рис. 10 б зависимость амплитуды радиосигнала.

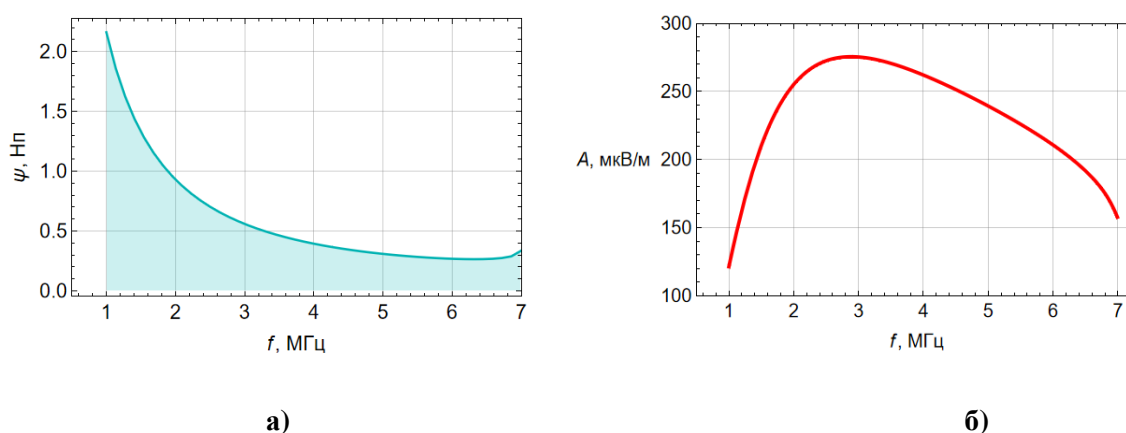


Рис. 10. Зависимость от рабочей частоты: соударений от высоты; а – поглощения, б – амплитуды.

Поглощение с ростом частоты преимущественно падает, а амплитуда имеет максимум в окрестности 2,5 МГц, из-за конкуренции двух факторов: расходимость растет с частотой, а поглощение уменьшается.

Восстановление эффективной частоты соударений

Проведем численный эксперимент. Будем считать, что известна амплитуда сигнала (рис. 10 б), величина E_0 и расходимость (рис. 8). Необходимо восстановить эффективную частоту соударений электронов. Поглощение легко находится из (6) (см. рис. 10 а)

$$\psi = -\ln \frac{A}{DE_0}. \quad (13)$$

С другой стороны, поглощение вычисляется по формуле (10), только теперь эффективная частота соударений, входящая в ε_2 , считается неизвестной. Поэтому, сопоставляя (13) и (10), получаем интегральное уравнение:

$$\frac{\omega}{2} \int_0^t \varepsilon_2 dt = \ln \frac{A}{DE_0}, \quad (14)$$

в котором будем считать, что (см. [14, 22])

$$\varepsilon_2 \approx -XZ. \quad (15)$$

Применяя алгоритм, описанный нами в [14, 22], восстанавливаем эффективную частоту соударений электронов, но уже по данным наклонного зондирования.

На рис. 11 показан результат восстановления высотной зависимости эффективной частоты соударений электронов (фиолетовая линия). Серая широкая линия – это исходный профиль эффективной частоты соударений. Видно, что результат восстановления обеспечивает приемлемую точность, особенно на высотах более 100 км. Если по данным, полученным путем восстановления, методом наименьших квадратов построить аппроксимации:

$$\lg \nu_e \approx 0.1731 + \frac{487.069}{z}, \quad (16)$$

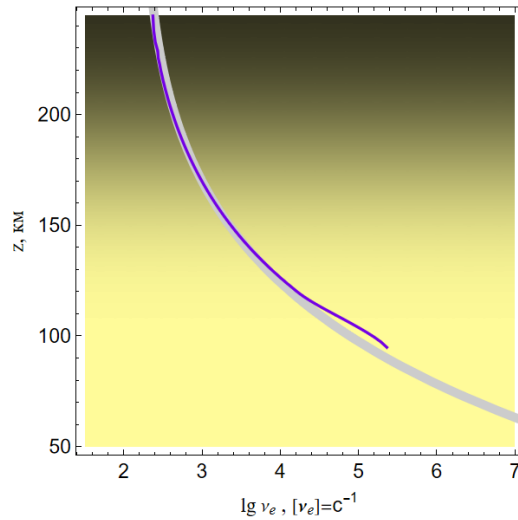


Рис. 11. Сопоставление исходной и восстановленной зависимостей эффективной частоты соударений от высоты.

или

$$\lg \nu_e \approx 2.64094 - \frac{483.933}{z} + \frac{119511}{z^2} - \frac{4.60491 \times 10^6}{z^3}, \quad (4.4.17)$$

то видим, что они хорошо ложатся на серую широкую кривую (рис. 12).

Красной пунктирной линией показана кривая, полученная по формуле (16), а синей линией показаны – кривая, полученная по формуле (17).

Сравнивая рис. 12 и рис. 11, видим, что аппроксимационные выражения позволяют получить оценки эффективной частоты соударений на высотах ниже, чем те, которые получены при непосредственном вычислении.

Более того, как следует из рис. 13, аппроксимационная формула неплохо работает и при больших высотах (до 450 км) и начинает существенно отличаться на высотах за пределами главного максимума ионосферного слоя.

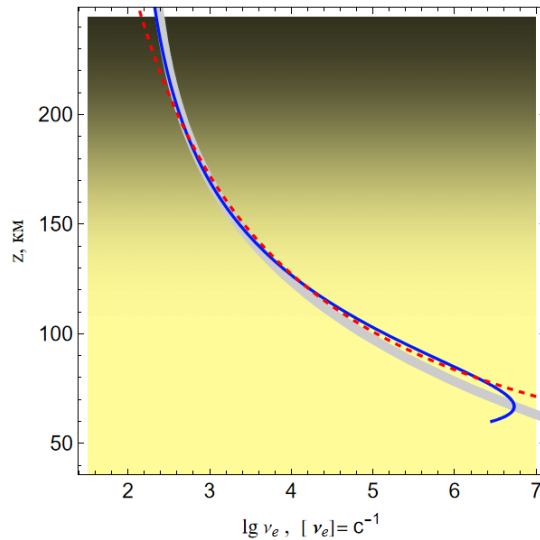


Рис. 12. Сопоставление исходной эффективной частоты соударений и аппроксимаций, полученных по восстановленным данным.

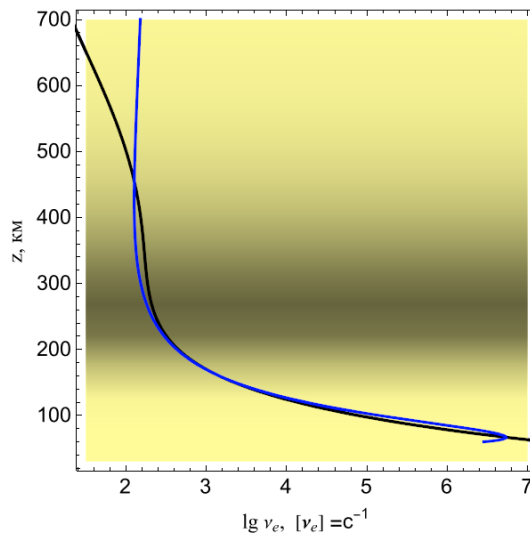


Рис. 13. Сопоставление исходной эффективной частоты соударений (чёрная линия) и аппроксимации, полученной по формуле (17) (синяя линия).

Выводы

На основе данных об ослаблении радиосигнала при наклонном зондировании ионосферы Земли создан амплитудный метод восстановления эффективной частоты соударений электронов. Для вычисления лучевых траекторий и волновых векторов применен метод бихарактеристик Гамильтона-Лукина, а для определения расходимости радиосигнала использована расширенная бихарактеристическая система Лукина. Решена задача «пристрелки», построены зависимости вертикальной компоненты волнового вектора от высоты вдоль лучей. В точке приёма найдены зависимости высоты отражения луча от времени прихода луча в точку отражения, высоты отражения луча от частоты и времени прихода луча в точку отражения от рабочей частоты, а также расходимости, поглощения и амплитуды радиосигнала от частоты. Показано, что частотная зависимость амплитуды имеет максимум.

При выполнении численного эксперимента получено удовлетворительное совпадение исходных значений эффективной частоты соударений и расчётных значений.

Рассмотрены возможности экстраполяции полученных результатов при восстановлении частотного профиля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-12-00299-П.

Литература

1. Иванов Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений. Монография. Йошкар-Ола: Марийский гос. технический ун-т. 2006. 266 с.
2. Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.
3. Andreeva, E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., Kryukovskii A.S., Lukin D.S., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the Sura heating facility // *Radio Sci.* 2016. V. 51. № 6. PP. 638–644,
4. Danilkin N.P., Denisenko P.F., Barabashov B.G., Vertogradov G.G. Electron collision frequency and HF-waves attenuation in the ionosphere // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy.* 2005. V. 5. № 3. P. GI3009.
5. Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Kirillovich, I.A. et al. Determination of the Effective Collision Frequency of Electrons in the E and D Regions of the High-Latitude Ionosphere from Analysis of Radio Occultation Measurements. *Cosmic Res.* 2023. V. 61. P. 464–470.
6. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
7. Denisenko P.F., Noranovich D.A. Errors in determining the vertical profile of the effective electron collision frequency from A1-method data // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2000. T. 40. № 2. С. 184–189.
8. Denisenko P.F., Beloff N., Noranovich D.A., Gough M.P Errors of ionospheric parameter diagnostics by vertical sounding method. // *Radio Science.* 2001. T. 36. № 5. С. 1103–1110.
9. Лебедев В.П., Подлесный А.В., Цедрик М.В., Куркин В.И. Измерение диаграммы направленности КВ антенн методом облета с привлечением беспилотного летательного аппарата DJMATRICE 100 // В сборнике: Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2022. С. 538–545.
10. Крюковский А.С., Куркин В.И., Ларюнин О.А., Лукин Д.С., Подлесный А.В., Растягаев Д.В., Черняк Я.М. Численное моделирование амплитудных карт для скорректированной модели IRI-2012 с плавными возмущениями ионосферы // *Радиотехника и электроника.* 2016. T. 61. № 8. С. 794–799.
11. Cedrik M., Podlesnyi A., Kurkin V. The Different Scale TIDs Diagnostics Based on Chirp-signals Amplitude Measurements Data in Vertical and Near-Vertical Ionosphere Sounding // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia, 2020, P. 260-262.
12. Podlesnyi A., Kurkin V., Cedrik M. Ionosond-MS ionosonde receiving antenna system // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia, 2020, P. 263-265.
13. Ryabova M.I., Ivanov D.V., Chernov A.A., Ovchinnikov V.V. Experimental Study of Phase-Frequency Responses of HF Radio Channels with the Use of SDR Ionosonde // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, P. 1-4.
14. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалёва Е.В., Растягаев Д.В. Развитие метода восстановления эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме // *Радиотехника и электроника.* 2022. T. 67. № 2. С. 117–129.
15. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V., Rastyagaev D.V. Application of the bi-characteristic method for reconstructing the effective frequency of electron collisions in the

ionosphere // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "Russian Open Scientific Conference "Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction", MPRSRWPD 2021" 2021. P. 012001.

16. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V., Popchenko O.V., Rastyagaev D.V. Diagnostics of the Effective Frequency of Electronic Collisions in the Ionosphere Based on Analysis of the Amplitude Characteristics of Continuous Linear Frequency Modulated Radio Signals // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), IEEE, Moscow, Russia, 2020, P. 211-215.

17. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. // Космические исследования, 1967. Т. 5. Вып. 4. С. 593–600.

18. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Бова Ю.И. Моделирование поля в окрестности каустик обыкновенной и необыкновенной волн при ионосферном распространении. // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 12. С. 1160–1169.

19. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Моделирование распространения частотно-модулированного излучения в анизотропной ионосферной плазме // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22. № 5. С. 4–11.

20. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде. // РЭ. 1969. Т. 14. №. 9. С.1673–1677.

21. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. // Радиотехника и электроника, М.: Наука. 2012. Т.57. № 9. С. 1028–1034.

22. Kryukovsky A.S., Mikhaleva E.V., Lukin D.S., Rastyagaev D.V. Mathematical simulation of the reconstruction of the effective electron collision frequency based on the amplitude data of the ordinary and extraordinary waves // 8th All-Russian Microwave Conference. 2022. P. 334-336.