

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБЪЕКТА В МЕЗОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

А.Е. Баринов¹, И.И. Прокопов², В.И. Тамбовцев³

Определяется область радиопрозрачности для столкновительного ионизированного газа. Анализируются основные радиочастотные параметры возмущённой среды в безразмерных координатах. Работа связана с решением проблемы обеспечения радиосвязи с аппаратами, движущимися в мезосфере с гиперзвуковой скоростью.

Ключевые слова: мезосфера, ионизированный газ, частота столкновений, плазменная частота, фазово-частотная характеристика, частотная характеристика поглощения, критические частоты, скин-слой.

Введение

При движении аппаратов в мезосфере со скоростями, превышающими скорость звука более чем в шесть раз, образующая вокруг аппарата ударная волна начинает проявлять свойства ионизированного газа и газовой плазмы [1]. При этом возникают сбои радиообмена в диапазонах частот, используемых в системах спутниковой навигации, радиолокации и радиосвязи [2]. Это делает проблематичным оперативное управление гиперзвуковым аппаратом и затрудняет установление причин отказов функционирования технических устройств. Проблема существует с первых дней пилотируемой космонавтики. Для разработки методов и аппаратуры, позволяющих обеспечить бесперебойную радиосвязь, необходимо изучить функции затухания и фазы, которые показывают, как и с какими потерями радиоволны распространяются в исследуемой среде [3]. Интерес представляет исследование и радиоотражательных свойств возмущённой среды. Работа предопределяет появление ракетопланов (без окислителя) для полётов в мезосфере Земли.

Распространение волны через исследуемую среду

При вхождении в мезосферу Земли спускаемых аппаратов или при движении гиперзвуковых аппаратов вокруг них образуется плазменная оболочка. Толщина фронта ударной волны имеет порядок длины свободного пробега молекул, что позволяет в расчётах фронт заменить поверхностью разрыва. За фронтом газ образует по направлению Z слоистую структуру, но в центральной части газ относительно однородный. Разогрев газа приводит к его ионизации и, как следствие, отрицательно сказывается на радиообмене [2].

Газовая плазма отличается от столкновительного ионизированного газа наличием коллективных электродинамических процессов. В частности, возникают электронные плазменные колебания, развитию которых препятствуют, в основном, столкновения электронов, как наиболее подвижных частиц. Распространение радиоволн связано с этими процессами.

Итак, основными радиофизическими характеристиками исследуемой среды являются частота столкновений электронов ν_e и плазменная частота ω_p (в системе СИ):

$$\nu_e = \frac{u_e}{\lambda} \text{ и } \omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

¹ Баринов Андрей Евгеньевич – аспирант, старший преподаватель, Южно-Уральский Государственный Университет.
E-mail: barinov_ae@bk.ru

² Прокопов Игорь Игоревич – доцент, кафедра Инфокоммуникационные технологии, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: prokopov174@mail.ru

³ Тамбовцев Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра Инфокоммуникационные технологии, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: tamboval@mail.ru

Рассмотрим два принципиально различных состояния [4].

А. Неплазменное состояние столкновительного ионизованного газа – СИГ при $2\pi\nu_e > \omega_p$ (здесь ω_p – расчётный параметр). На толщине скин-слоя δ поглощение происходит практически без отражения. Заметим, что диапазон перехода к радиопрозрачности здесь чётко не определен.

В. Плазменное состояние столкновительного ионизованного газа – СГП, если $2\pi\nu_e < \omega_p$. Среда становится радиопрозрачной при $\omega \approx \omega_p$. Отражение наблюдается при частоте ω ниже ω_p при $\omega > 2\pi\nu_e$ – это позволяет определить частотную границу перехода к радиопрозрачности.

Для фазовой функции $-\beta$ и функции затухания $-\alpha$ известны частотные зависимости [5]:

$$\beta^2 = \frac{\omega}{2c^2(\nu_e^2 + \omega^2)} \left(\sqrt{\omega^2(\nu_e^2 + \omega^2 - \omega_p^2)^2 + \nu_e^2 \omega_p^4} + \omega(\nu_e^2 + \omega^2 - \omega_p^2) \right), \quad (2)$$

$$\alpha^2 = \frac{\omega}{2c^2(\nu_e^2 + \omega^2)} \left(\sqrt{\omega^2(\nu_e^2 + \omega^2 - \omega_p^2)^2 + \nu_e^2 \omega_p^4} - \omega(\nu_e^2 + \omega^2 - \omega_p^2) \right). \quad (3)$$

Исследуем данные выражения графоаналитическим методом. Исследование функций данным методом позволит наглядно увидеть изменение их значений в зависимости от частоты проходящей электромагнитной волны. Очевидно, что данные функции представляют собой достаточно сложные для точного построения графиков нелинейные зависимости. Для построения графиков данных функций используется система компьютерной алгебры MathCAD [6].

Построение модельных зависимостей для СИГ

Для исследования (2) и (3) приведём частоты к относительному виду. Данная операция позволит удобно оценивать и воспринимать более широкий диапазон частот. Итак, в правых частях уравнений (2) и (3) введём относительные частоты:

$$\nu_r = \frac{\omega}{2\pi\nu_e} - \omega \text{ относительно } \nu_e; \quad \nu_{rp} = \frac{\omega_p}{2\pi\nu_e} - \omega_p \text{ относительно } \nu_e. \quad (4)$$

Сохраним в левых частях (2) и (3) безразмерную форму записи в виде

$$\beta_A^2 = \beta^2 \frac{c^2}{\nu_e^2}; \quad \alpha_A^2 = \alpha^2 \frac{c^2}{\nu_e^2}. \quad (5)$$

После выполнения подстановок для построения модельных зависимостей получаем:

$$\beta_A^2 = \frac{2\pi^2\nu_r^2}{\omega(1+4\pi^2\nu_r^2)} \left(\sqrt{\omega^2(1+4\pi^2(\nu_r^2 - \nu_{rp}^2))^2 + 16\pi^4\nu_{rp}^4\nu_e^2} + \omega(1+4\pi^2(\nu_r^2 - \nu_{rp}^2)) \right), \quad (6)$$

$$\alpha_A^2 = \frac{2\pi^2\nu_r^2}{\omega(1+4\pi^2\nu_r^2)} \left(\sqrt{\omega^2(1+4\pi^2(\nu_r^2 - \nu_{rp}^2))^2 + 16\pi^4\nu_{rp}^4\nu_e^2} - \omega(1+4\pi^2(\nu_r^2 - \nu_{rp}^2)) \right). \quad (7)$$

Модельные зависимости для СИГ представлены на рис. 1, а и на рис. 1, б для случаев: 1) $\nu_{rp} = 1/30$; 2) $\nu_{rp} = 1/20$; 3) $\nu_{rp} = 1/10$; 4) $\nu_{rp} = 1/2\pi$.

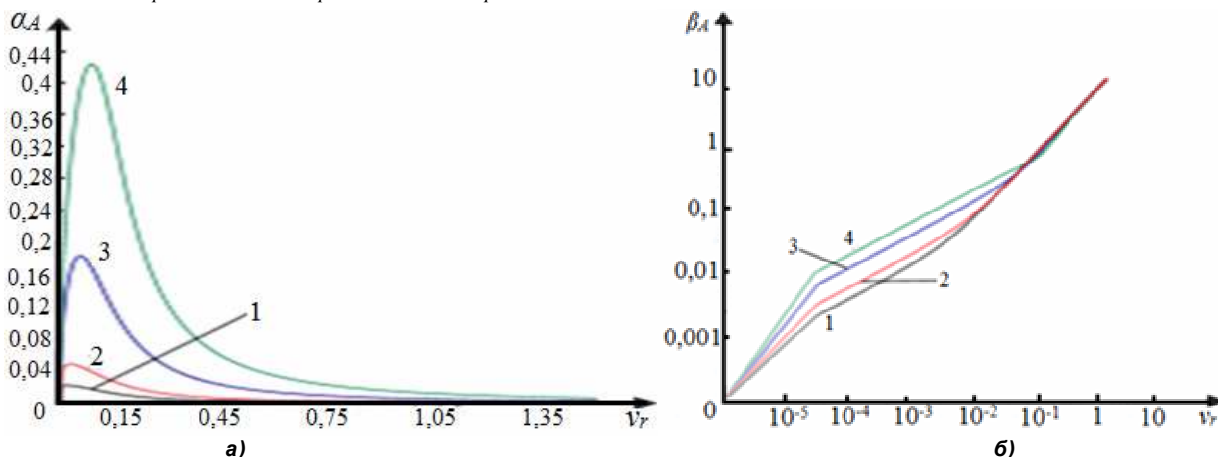


Рис. 1. а) зависимости функций затухания в СИГ от относительной частоты; б) зависимости фазовых функций в СИГ от относительной частоты.

Краткие сообщения

Для анализа изменения глубины проникновения электромагнитной волны в среду воспользуемся определением зависимости глубины скин-слоя δ от частоты, как обратной зависимости от функции затухания [4], – здесь это касается выражения (7). Для СИГ с исследуемыми параметрами (см. рис. 1) частотные зависимости для δ представлены на рис. 2.

Анализ представленных здесь частотных зависимостей показывает, что действительно для СИГ необходимо доопределить значение частоты или частотный диапазон перехода к радиопрозрачности (см. А). Однако, на рис. 1, б на фазовых частотных зависимостях можно отметить особую частотную область, где графики сливаются в линию одинакового наклона. Окончательно это происходит при единичной относительной частоте.

При передаче информации по радиоканалу как физическому носителю сигнала для сохранения формы последнего необходимо условием является высокая степень линейности сквозной частотной характеристики канала для рабочей полосы частот. Расчёты показывают, что для всех представленных в статье частотных характеристик коэффициенты корреляций составили 0,96...0,98 на участках 1...1,5 относительных частот.

Построение модельных зависимостей для СГП

В правых частях уравнений (2) и (3) введём относительные частоты:

$$v_r = \frac{\omega}{\omega_p} - \omega \text{ относительно } \omega_p, \quad v_{re} = \frac{v_e}{\omega_p} - v_e \text{ относительно } \omega_p. \quad (8)$$

Тогда

$$\alpha_B^2 = \frac{v_r}{2(v_{re}^2 + v_r^2)} \left(\sqrt{v_r^2(v_{re}^2 + v_r^2 - 1)^2 + v_{re}^2} - v_r(v_{re}^2 + v_r^2 - 1) \right), \quad (9)$$

$$\beta_B^2 = \frac{v_r}{2(v_{re}^2 + v_r^2)} \left(\sqrt{v_r^2(v_{re}^2 + v_r^2 - 1)^2 + v_{re}^2} + v_r(v_{re}^2 + v_r^2 - 1) \right), \quad (10)$$

где

$$\beta_B^2 = \beta^2 \frac{c^2}{\omega_p^2}; \quad \alpha_B^2 = \alpha^2 \frac{c^2}{\omega_p^2}. \quad (11)$$

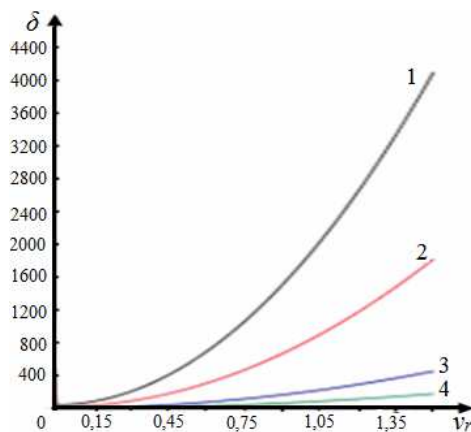


Рис. 2. Зависимости глубины скин-слоя от v_r – относительной частоты для СИГ

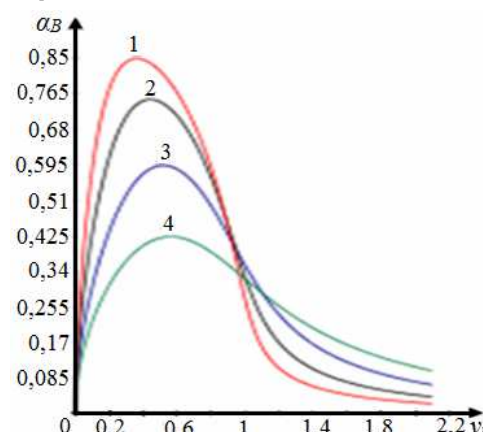


Рис. 3. Зависимости функций затухания от v_r – относительной частоты для СГП

Модельные зависимости для СГП представлены на рис. 3, рис. 4, а и рис. 4, б для заданных параметров: 1) $v_{re} = 1/\sqrt{30}$, 2) $1/\sqrt{10}$, 3) $1/\sqrt{3}$, 4) 1.

Анализ представленных здесь частотных функций показывает, что действительно значение частоты перехода к радиопрозрачности для СГП определяется выражением: $\omega > 2\pi v_e$ (см. В), что соответствует относительной частоте $v_r = \omega/\omega_p$ равной 1. Необходимо заметить, что на низких частотах (меньше 0,5 относительной частоты) функции затухания уменьшаются, т.к. длины волн превышают расчётные значения скин-слоя [2].

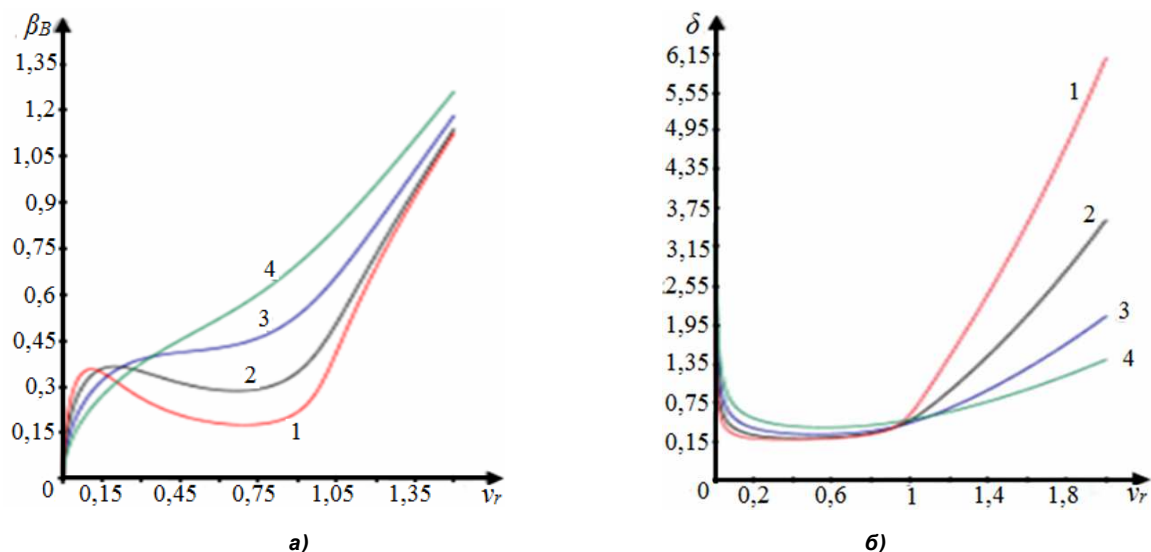


Рис. 4. а) Зависимости фазовой функции в СГП от относительной частоты; б) зависимости глубины скин-слоя в СГП от относительной частоты

Выводы

Анализируя полученные зависимости, можно отметить, что для СИГ, среда становится прозрачна для радиоволн уже при значении их частоты незначительно превышающем частоту электрон-атомных столкновений (в 1,5–2 раза), что выражается в линейности фазовой зависимости и стремящейся к нулю постоянной затухания. Для СГП прозрачность среды наступает с превышением частоты радиоволн значения плазменной частоты, и также выражается в линейности зависимости фазовой постоянной и стремящейся к нулю постоянной затухания. Известно [2, 7], что для СГП критическая частота достигает значения 10 ГГц на высоте 70 км.

Переход от безразмерных к абсолютным параметрам не требует каких-либо дополнительных математических преобразований и сводится лишь к умножению. Для поиска оптимальной частоты, зная параметры среды (ν_e и ω_p) и толщину плазменного слоя, находится минимальная относительная частота для осуществления радиосвязи. По зависимостям для фазовых функций определяется их линейность для полосы частотного диапазона канала связи.

Литература

1. Wolverson, M. Piercing the Plasma: Ideas to Beat the Communications Blackout of Reentry / M. Wolverson // Scientific American. – New York: Scientific American, 2009. – № 12. – P. 28–29.
2. Шевяков, И.А. О радиопрозрачности плазменной оболочки гиперзвукового летательного аппарата / И.А. Шевяков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 80–84.
3. Грудинская, Г.П. Распространение радиоволн. Учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов, 2-е изд. / Г.П. Грудинская. – М.: ВШ, 1975. – 280 с.
4. Шевяков, И.А. Радиофизические свойства столкновительной плазмы газового разряда / И.А. Шевяков, В.И. Тамбовцев, А.А. Кучуркин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 100–106.
5. Голант, В.Е. СВЧ методы исследования плазмы / В.Е. Голант. – М.: Наука, 1968. – 328 с.
6. Баринов, А.Е. Моделирование прозрачности плазменного слоя в системе Mathcad / А.Е. Баринов, И.А. Шевяков, И.И. Прокопов // Труды 56-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. – МФТИ, 2013. – С. 172–173.
7. Тамбовцев, В.И. Оценка затухания радиосигнала при прохождении ударной волны гиперзвукового аппарата / В.И. Тамбовцев, И.А. Шевяков // Труды 56-й научной конференции МФТИ. Радиотехника и кибернетика. – МФТИ, 2013. – С. 188–190.

Поступила в редакцию 24 января 2014 г.

MODELING OF RADIO FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PLASMA FORMATIONS FOR HYPERSONIC OBJECT IN MESOSPHERE OF THE EARTH

A.E. Barinov¹, I.I. Prokopov², V.I. Tambovtsev³

The area of radiotransparency for collisional ionized gas is defined. Basic RF parameters of perturbed environment are analyzed in nondimensional coordinates. The article considers the problem of radio coverage with vehicles moving in mesosphere at hypersonic speed.

Keywords: mesosphere, ionized gas, collision frequency, plasma frequency, phase-frequency characteristic, frequency response of absorption, critical frequency, skin layer.

References

1. Wolverton M. Piercing the Plasma: Ideas to Beat the Communications Blackout of Reentry. *Scientific American*. New York: Scientific American. 2009. no. 12. pp. 28–29.
2. Shevyakov I.A. O radioprozrachnosti plazmennoy obolochki giperzvukovogo letatel'nogo apparata (Radio Transparency of Plasma Shell for Hypersonic Aircraft). *Vestnik YuUrGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika»*. 2014. Vol. 6, no. 2. pp. 80–84. (in Russ.).
3. Grudinskaya G.P. *Rasprostraneniye radiovoln. Uchebnoye posobie dlya radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov* (Radio Wave Propagation. Study Guide for Radio Engineering Specialists of Higher Educational Institutions). Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1975. 280 p. (in Russ.).
4. Shevyakov I.A., Tambovtsev V.I., Kuchurkin A.A. Radiofizicheskie svoystva stolknovitel'noy plazmy gazovogo razryada (Radio physical properties of collisional plasma in gas discharge). *Vestnik YuUrGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika»*. 2013. Vol. 5, no. 1. pp. 100–106. (in Russ.).
5. Golant V.E. *SVCh metody issledovaniya plazmy* (Super high frequency methods of plasma analysis). Moscow, Nauka Publ., 1968. 328 p.
6. Barinov A.E., Shevyakov I.A., Prokopov I.I. Modelirovaniye prozrachnosti plazmennogo sloya v sisteme Mathcad (Simulation of the plasma layer transparency in the system Mathcad). *Trudy 56-y nauchnoy konferentsii MFTI. Radiotekhnika i kibernetika* (Proceedings of the 56th scientific conference of MIPT. Radio Engineering and Cybernetics). MFTI, 2013. pp. 172–173. (in Russ.).
7. Tambovtsev V.I., Shevyakov I.A. Otsenka zatukhaniya radiosignala pri prokhozhdenii udarnoy volny giperzvukovogo apparata (Radio Signal Fading Evaluation in Passing a Hypersonic Shock Wave Device) *Trudy 56-y nauchnoy konferentsii MFTI. Radiotekhnika i kibernetika* (Proceedings of the 56th scientific conference of MIPT. Radio Engineering and Cybernetics). MFTI, 2013. pp. 188–190. (in Russ.).

Received 24 January 2014

¹ Barinov Andrey Evgenievich is Post-graduate Student, Senior Lecturer, South Ural State University.
E-mail: barinov_ae@bk.ru

² Prokopov Igor Igorevich is Associate Professor, Information and Communication Technologies Department, South Ural State University.
E-mail: tamboval@mail.ru

³ Tambovtsev Vladimir Ivanovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Information and Communication Technologies Department, South Ural State University.
E-mail: tamboval@mail.ru