УДК: 537.87 DOI: 10.26907/rwp29.2025.528-531

РЕЖИМЫ КАНАЛИРОВАНИЯ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ С ДВУМЯ УЗКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ С ПОНИЖЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫТЯНУТЫМИ ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ: ТЕОРИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

И.А. Елясина, И.Ю. Зудин, Т.М. Заборонкова, М.Е. Гущин

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: i.petrova@ipfran.ru

Аннотация. Исследовано распространение свистовых волн в магнитоактивной плазме в присутствии неоднородностей, ориентированных вдоль магнитного поля. Поперечный масштаб неоднородностей существенно меньше длины волны квазипродольных вистлеров. В рамках строгого электродинамического подхода найдены собственные моды, локализованные в системе из двух неоднородностей пониженной концентрации плазмы. Показано, что характер мод определяется как параметрами плазмы в каждой из неоднородностей, так и расстоянием между ними. В частности, определено, что волны могут быть локализованы внутри одной неоднородности или распространяться вдоль обеих неоднородностей в виде общих мод. Также проведено численное моделирование с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD), которое показало, что изменение формы границ неоднородностей от модельных (резких) к более реалистичным (плавным) не оказывает принципиального влияния на пространственную структуру мод системы неоднородностей.

Ключевые слова: вистлеры; распространение радиоволн; замагниченная плазма; неоднородности концентрации; собственные моды; метод FDTD

DUCTING REGIMES OF WHISTLER--MODE WAVES IN A MAGNETIZED PLASMA WITH TWO NARROW FIELD--ALIGNED ELECTRON DENSITY DEPLETIONS: THEORY AND NUMERICAL MODELING

I.A. Elyasina, I.Y. Zudin, T.M. Zaboronkova, M.E. Gushchin

Abstract. The propagation of whistler--mode waves in magnetized plasma is studied in the presence of field--aligned density irregularities. The transverse scale of these irregularities is assumed to be much smaller than the wavelength of quasi--longitudinal whistlers. Within the framework of a rigorous electro-dynamic approach, eigenmodes localized in a system of two plasma depletions are derived. It is shown that the properties of the modes are governed both by the plasma parameters within each irregularity and by the separation between them. In particular, it is found that the waves can be confined within a single irregularity or can extend along both regions, forming coupled modes. Numerical simulations using the finite-difference in time-domain (FDTD) method show that transition from idealized (sharp) to more realistic (smooth) irregularity boundaries does not significantly affect the spatial structure of the modes of irregularities.

Keywords: whistlers; radio wave propagation; magnetized plasma; density irregularities; eigenmodes; FDTD method

Введение

Интерес к свистовым волнам (вистлерам) связан с возможностью их использования для диагностики околоземной плазмы [1]. Также вистлеры могут эффективно взаимодействовать с энергичными электронами и использоваться для контроля популяции энергичных частиц [2, 3]. Описание распространения низкочастотных электромагнитных волн в околоземной плазме может быть осложнено присутствием разнообразных систем неоднородностей с пониженной или повышенной электронной концентрацией, которые оказывают существенное влияние на волновые процессы и могут возникать как естественным путем, так и в результате искусственных воздействий на ионосферу за счёт развития искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ)[4–6].

Ранние теоретические исследования, посвященные взаимодействию вистлеров с узкими плазменными неоднородностями, были нацелены на анализ эффектов рассеяния [7] и не

учитывали волноводные явления. Последние изучались, фактически, только методами численного моделирования [8–10] и сопоставлялись с аналитическими решениями задачи о распространении излучения вдоль отдельных неоднородностей.

Целью данной работы является аналитическое решение задачи о распространении вистлеров в волноводном режиме в системе из двух двумерных (плоских) неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы с резкими границами, которая может рассматриваться как элемент ИИТ, и изучение свойств таких мод. Это позволит проверить сделанные ранее в работах [8–10] выводы о режимах распространения излучения вдоль систем неоднородностей с учётом возможного взаимодействия мод отдельных неоднородностей. Кроме того, сопоставляются свойства волн, направляемых неоднородностями с резкими и плавными (размытыми) границами.

Постановка задачи и основные результаты

В рассматриваемой двумерной задаче плазма полагается холодной и бесстолкновительной. Магнитное поле B_0 направлено вдоль оси Oz декартовой системы координат, концентрация плазмы при этом является кусочно-заданной функцией координаты x:

$$N(x)=\begin{cases} N^{(1)}, d \le x \le d+2a \\ N^{(2)}, -d-2b \le x \le -d \\ N^{(0)}, \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \quad (1)$$

где $N^{(0)}$ – фоновая концентрация плазмы, $N^{(1)}$ и $2a$ – концентрация плазмы и ширина первой неоднородности, $N^{(2)}$ и $2b$ – концентрация плазмы и ширина второй неоднородности, $2d$ – расстояние между ними. Собственные моды данной системы в каждом из дактов и в фоновой плазме мы ищем в виде двумерных мод свободного пространства, затухающих в поперечном направлении при удалении от системы неоднородностей. «Сшивание» решений на границах неоднородностей с использованием граничных условий приводит к линейной системе из 16 уравнений на 16 неизвестных – комплексных амплитуд:

$$\hat{L}\vec{A}=0 \quad (2)$$

Система (2) решалась методом минимизации функционала невязки. На рис.1a приведены решения уравнения $\det\hat{L}=0$ при типичных параметрах внешней вечерней ионосферы средних широт $N^{(0)}=2.4\times10^4$ см$^{-3}$, $N^{(1)}=N^{(2)}=0.8N^{(0)}$, $B_0=0.44$ Гс и частоте излучения f = 18 кГц, соответствующей частоте передатчика в активных экспериментах [6]. Ширины дактов фиксированы: $2a$=100 м, $2b$ = 140 м. Видно, что зависимость продольной нормированной постоянной распространения $p(d)$ немонотонна и на достаточно большом расстоянии $2d$>500 м выходит на постоянные значения, которые совпадают с решениями, полученными ранее для уединённых дактов плотности [10].

Если дакты расположены на значительном расстоянии друг от друга, например, $2d$=2000 м, у каждой из собственных мод поле локализовано внутри одного из дактов плотности (см. рис. 1 b). Таким образом, свойства мод близки к свойствам волны, направляемой отдельной неоднородностью.

Из рис. 1a видно, что при меньшем расстоянии, например, $2d$ =130 м, количество собственных мод уменьшается. В этом случае масштаб локализации оказывается сопоставим с расстоянием между дактами, и в системе наблюдаются общие моды, энергия которых распределена между неоднородностями (см. рис. 1c).

Для случая двух близко расположенных неоднородностей $\delta >> 2d$, где δ – масштаб локализации волн) поле локализуется в системе дактов как в одной неоднородности. Таким образом, при переходе от системы из двух далеко расположенных дактов $2d >> \delta$ к системе с расстоянием между дактами меньше или порядка масштаба локализации поля $2d \lesssim \delta$ моды отдельных дактов могут переходить в общие моды обеих неоднородностей.

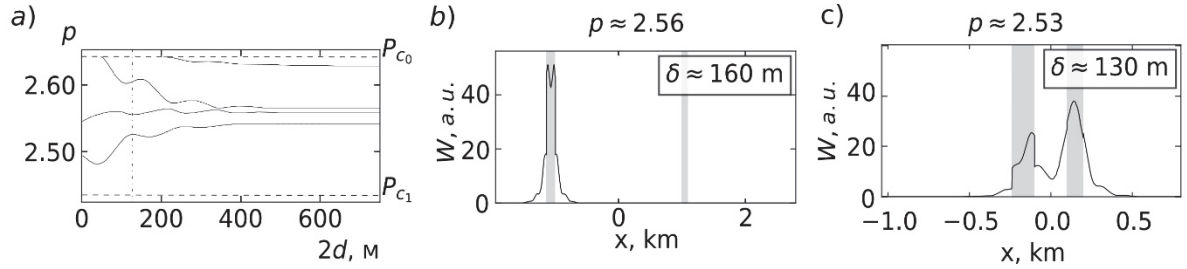

Рис. 1. a) Зависимость продольной постоянной распространения $p = k / k_0$ от расстояния между дактами *2d*. Штрихпунктирной линией выделено расстояние *2d* =130 м, пунктирными – диапазон допустимых значений продольной постоянной распространения $\left[P_{c_1}, P_{c_0}\right]$ [11]. b) Плотность электромагнитной энергии моды, локализованной в одном из дактов плотности *2d*=2000 м с масштабом локализации $\delta << 2d$. c) Плотность электромагнитной энергии общей моды, полученной при *2d* =130 м, с масштабом локализации $\delta \sim 2d$. Серым цветом выделены дакты плотности

Численное моделирование распространения свистовых волн вдоль пары неоднородностей пониженной плотности, проведённое с помощью метода FDTD, показывает качественное и приемлемое количественное соответствие амплитуд электромагнитных полей волн, локализованных в системе дактов с резкими и плавными границами (см. рис. 2). Аналогичный результат был получен аналитически для одного дакта в работе [12], где было показано, что переход к плавному профилю плотности не приводит к появлению в структуре поля принципиально новых особенностей, если ширина переходной области порядка или меньше плазменного масштаба c/ω_p, где c – скорость света, ω_p – фоновая плазменная частота.

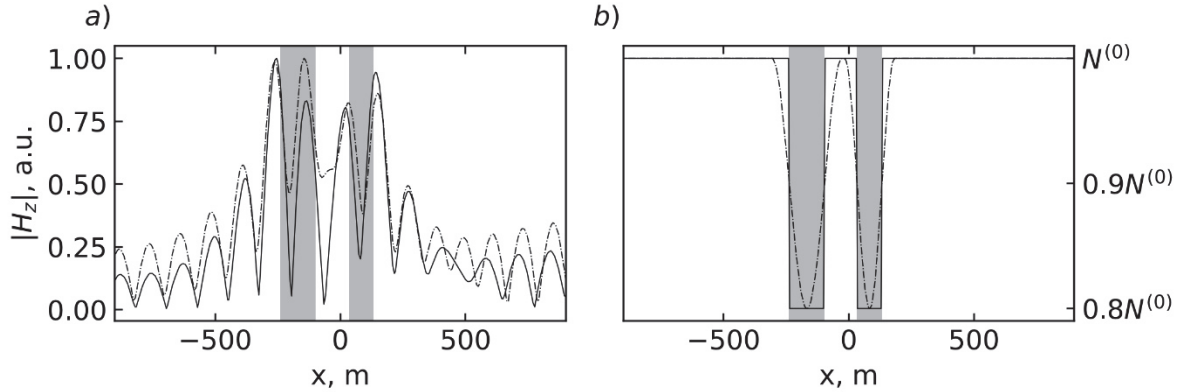

Рис. 2. Поперечное распределение амплитуды продольной компоненты напряжённости волнового магнитного поля в системе с резкими (сплошные линии) и плавными (штрихпунктирные линии) границами дактов на расстоянии z_0 ≈200км от источника излучения. b) Соответствующие профили дактов. Параметры моделирования те же, что и на рис. 1

Заключение

Задача о собственных модах системы неоднородностей, состоящей из двух дактов пониженной плотности с резкими границами, решена в рамках строгого электродинамического подхода. Этот подход к решению задачи о распространении вистлеров вдоль неоднородностей подтверждает гипотезу о существовании нескольких видов мод, сформулированную ранее на основании FDTD-моделирования в работах [8–10]. Полученные результаты могут быть применены и к описанию дактов с более реалистичным (гладким) профилем.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24 – 12 – 00459).

Список литературы

1. Helliwell R.A., Katsufrakis L.P. VLF wave injection into the magnetosphere from Siple Station, Antarctica // Journal of Geophysical Research. – 1974. – Vol. 79. – No. 16. – P. 2511–2518.
2. Abel B., Thorne R.M. Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere: 1. Dominant physical processes // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Vol. 103. – No. A2. – P. 2385–2396.
3. First Direct Observations of Propagation of Discrete Chorus Elements From the Equatorial Source to Higher Latitudes, Using the Van Allen Probes and Arase Satellites / C. Colpitts, Y. Miyoshi, Y. Kasahara et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2020. – Vol. 125. – No. 10. – P. 2511–2518.
4. Whistler propagation in ionospheric density ducts: Simulations and DEMETER observations / J.R. Woodro, A.V. Streltsov, A. Vartanyan, G.M. Milikh // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2013. – Vol. 118. – No. 11. – P. 7011–7018.
5. Density ducts formed by heating the Earth's ionosphere with high{power HF radio waves / V.L. Frolov, V.O. Rapoport, G.P. Komrakov et al. // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 2008. – Vol. 88. – P. 790–794.
6. VLF electromagnetic _eld structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility / V.O. Rapoport, V.L. Frolov, S.V. Polyakov et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2010. – Vol. 115. – No. A10. – P. A10322.
7. Interaction between VLF waves and the turbulent ionosphere / E.E. Titova, V.I. Di, V.E. Iurov et al. // Geophysical Research Letters. – 1984. – Vol. 11. – No. 4. – P. 323–326.
8. Numerical simulation of whistler waves in magnetized plasma with small-scale irregularities / I.Yu. Zudin, N.A. Aidakina, M.E. Gushchin et al. // Plasma Physics Reports. – 2017. – Vol. 43. – No. 12. – P. 1179–1188.
9. Whistler waves' propagation in plasmas with systems of small-scale density irregularities: numerical simulations and theory / I.Yu. Zudin, T.M. Zaboronkova, M.E. Gushchin et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124. – No. 6. – P. 4739–4760.
10. Properties of whistler waves' ducting in plasmas with systems of small-scale density depletions / I.Yu. Zudin, T.M. Zaboronkova, M.E. Gushchin et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics – 2023. – Vol. 128. – No. 10. – P. e2023JA031616.
11. Kondrat'ev I.G., Kudrin A.V., Zaboronkova T.M. Electrodynamics of density ducts in magnetized plasmas. – Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1999.
12. Es'kin V.A., Zaboronkova T.M., Kudrin A.V. Whistler waves guided by ducts with enhanced density in a collisional magnetoplasma // Radiophys Quantum. – 2008. – Vol. 51. – No. 1. – P. 28–44.