

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН ПО ФАЗОВОМУ СДВИГУ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.А. Власов, А.С. Леонович, Д.А. Козлов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
a.vlasov@iszf.irk.ru

DETERMINING TRANSVERSE STRUCTURE OF MONOCHROMATIC ALFVÉN WAVES BY THE PHASE SHIFT BETWEEN COMPONENTS OF THEIR ELECTROMAGNETIC FIELD

A.A. Vlasov, A.S. Leonovich, D.A. Kozlov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
a.vlasov@iszf.irk.ru

Аннотация. В неоднородной магнитосферной плазме альфвеновские волны имеют очень мелкомасштабную радиальную (поперек магнитных оболочек) структуру. Эта структура определяется типом альфвеновской волны. При наблюдениях альфвеновских волн на борту космических аппаратов трудно разделить локальные колебания волнового поля от тех, которые связаны с пересечением космическим аппаратом мелкомасштабной поперечной структуры волны. В настоящей работе для определения типа альфвеновских волн, наблюдаемых на борту космического аппарата, предложен новый метод фазовых портретов, основанный на данных о колебаниях поперечных компонентах электромагнитного поля волны. Показано, что сдвиг фаз между колебаниями этих двух компонент определяется мелкомасштабной радиальной структурой волны. Фазовый портрет альфвеновской волны представляет собой два связанных графика: радиального распределения поперечных компонент ее электрического (или магнитного) поля и радиального распределения сдвига фаз между этими компонентами. В настоящей работе представлены теоретически рассчитанные фазовые портреты основных типов ультранизкочастотных альфвеновских волн, наблюдаемых в магнитосферной плазме.

Ключевые слова: альфвеновские волны, МГД, фазовые портреты, магнитосферная плазма.

Abstract. In an inhomogeneous magnetospheric plasma, the Alfvén waves have a very small-scale radial (across magnetic shells) structure. This structure is determined by the type of the Alfvén wave. When observing Alfvén waves onboard spacecraft, it is difficult to separate local oscillations in the wave field from those associated with the spacecraft crossing the fine-scale transverse wave structure. In the present work, a new method of phase portraits, based on data on oscillations of transverse components of the electromagnetic wave field, is proposed to determine the type of Alfvén waves observed onboard a spacecraft. It is shown that the phase shift between the oscillations of these two components is determined by the small-scale radial structure of the wave. Phase portrait of Alfvén wave represents two connected graphs: radial distribution of transverse components of its electric (or magnetic) field and radial distribution of phase shift between these components. This paper presents theoretically calculated phase portraits of the main types of ultra-low frequency Alfvén waves observed in the magnetospheric plasma.

Keywords: Alfvén waves, MHD, phase portraits, magnetospheric plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования магнитосферных МГД-колебаний (геомагнитных пульсаций) имеют долгую историю [Dungey, Southwood, 1970; Piliipenko, 1990]. Эти исследования основывались на наблюдениях электромагнитных колебаний, регистрируемых на сетях высокочувствительных наземных магнитометров. Метод позволяет изучать магнитосферные колебания только по их косвенным проявлениям, поскольку волновое поле исходного сигнала претерпевает значительную трансформацию при проникновении из магнитосферы на поверхность Земли. С началом запусков в околоземное космическое пространство космических аппаратов появилась возможность исследовать магнитосферные МГД-колебания непосредственно в магнитосфере без искажающего влияния ионосферы и атмосферы [Takahashi, McPherson, 1982; Anderson et al., 1990].

Однако и в этом случае имеются определенные сложности. Альфвеновские волны в магнитосфере имеют весьма разнообразную поперечную структуру. Как правило, при проведении спутниковых наблюдений трудно определить, к какому типу относятся регистрируемые альфвеновские волны. Нескольких пространственно разнесенных спутников для этого недо-

статочно. В работе [Leonovich et al., 2021] была предложена методика, позволяющая определить радиальную структуру поля монохроматической альфвеновской волны по наблюдаемому фазовому сдвигу между поперечными компонентами колебаний их электромагнитного поля. С ее помощью были построены фазовые портреты кинетических альфвеновских волн, локализованных вблизи диссипативного слоя, в котором происходит полное поглощение их энергии электронами фоновой плазмы. В данной работе представлено дальнейшее развитие этой методики, которая позволяет определить радиальную структуру наблюдаемых в магнитосфере Земли альфвеновских волн различных типов.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН

Рассмотрим поле монохроматических МГД-волн. Если наблюдаемые колебания являются широкополосными, с помощью узкополосного фильтра в них всегда можно выделить достаточно узкую частотную полосу, в которой их можно считать почти монохроматическими. Если на спутнике, движущемся в магнитосфере, наблюдаются какие-либо МГД-колебания, возникает вопрос об их природе.

Самый простой способ определения типа наблюдаемых МГД-колебаний — это наличие/отсутствие каких-либо компонент их поля. Так, колебания продольной компоненты электрического поля связаны только с альфвеновскими волнами, а колебания продольной компоненты магнитного поля — только с магнитозвуковыми (БМЗ и ММЗ) волнами.

Для определения типа наблюдаемых МГД-колебаний можно использовать также их поляризационные характеристики. Например, определить тип наблюдаемой МГД-волны можно по отношениям амплитуд колебаний различных компонент их электромагнитного поля. Если в наблюдаемых колебаниях амплитуда поперечной компоненты магнитного поля много больше амплитуды продольной компоненты, в них доминирует поле альфвеновской волны. Если же амплитуды этих компонент сопоставимы друг с другом, это указывает на то, что в данной области доминирует поле БМЗ-волны.

Еще одним признаком магнитозвуковых волн является наличие в них возмущения газокINETического давления плазмы и давления магнитного поля. В отличие от магнитозвуковых волн в альфвеновских волнах давление плазмы и магнитного поля практически не возмущаются.

Предположим, что по вышеперечисленным признакам удалось определить, что наблюдаемые на космическом аппарате геомагнитные пульсации представляют собой альфвеновскую волну. Однако, как упоминалось выше, эти волны имеют весьма разнообразную поперечную структуру. Для определения этой структуры мы предлагаем метод построения фазовых портретов, т. е. определение фазового сдвига между колебаниями поперечных компонент электрического или магнитного поля наблюдаемых на спутнике альфвеновских волн. Если представить (в общем случае комплекснозначные) функции B_ϕ и B_r в виде

$$B_\phi = |B_\phi| e^{i\phi_\phi}, B_r = |B_r| e^{i\phi_r} \quad (1)$$

и аналогичные выражения для электрических компонент поля E_ϕ и E_r , фазовый сдвиг между ними $\tilde{\Delta}\Phi = \Phi_\phi - \Phi_r$ определяется как

$$\tan \tilde{\Delta}\Phi = \frac{\text{Im}(B_\phi / B_r)}{\text{Re}(B_\phi / B_r)} = \frac{\text{Im}(E_r / E_\phi)}{\text{Re}(E_r / E_\phi)}, \quad (2)$$

где B_ϕ и E_ϕ — азимутальные компоненты, E_ϕ и E_r — радиальные компоненты магнитного и электрического поля соответственно. Отметим, что, поскольку рассматриваемые нами альфвеновские волны крайне мелкомасштабны поперек магнитных оболочек, их структуру можно представить в виде разложения в ряд по гармоникам вида

$$\begin{aligned} B_\phi & i\nabla_r U(r) H(r, l) e^{(im\phi - i\omega t)}, \\ B_r & \sim mU(r) H(r, l) e^{im\phi - i\omega t}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $m=0, 1, 2, 3, \dots$ — азимутальное волновое число; ω — частота волны; t — время, функция $U(r)$ описывает мелкомасштабную радиальную (по координате r) структуру альфвеновской волны, а функция $H(r, l)$ — ее крупномасштабную

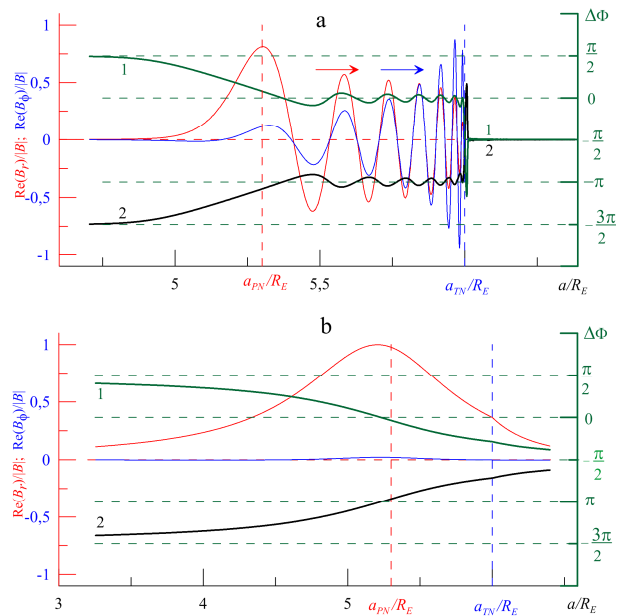
структуру вдоль силовых линий фонового магнитного поля (l — длина силовой линии). При этом, как видно, сдвиг фаз

$$\tilde{\Delta}\Phi \approx -\arctan \frac{\text{Re}[\nabla_r U(r)/U]}{\text{Im}[\nabla_r U(r)/U]} \quad (4)$$

однозначно связан с мелкомасштабной радиальной структурой альфвеновской волны и не зависит ни от времени, ни от ее структуры вдоль магнитных силовых линий и в азимутальном направлении. Имея теоретические фазовые портреты мелкомасштабных альфвеновских волн различных типов (рисунок), можно сравнить их с фазовыми портретами колебаний, наблюдаемых на спутнике, пересекающем область их локализации, и определить тип наблюдаемых альфвеновских волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод исследования мелкомасштабной радиальной структуры монохроматических альфвеновских волн с помощью построения их фазовых портретов. Для этого требуется построить график радиальной зависимости сдвига фаз (фазовый портрет) между колебаниями радиальной и азимутальной компонент магнитного (или электрического) поля альфвеновской волны, наблюдаемой на спутнике, пересекающем область ее локализации. Этот фазовый портрет можно сравнить с заранее рассчитанными теоретическими шаблонами и определить, к какому типу относятся наблюдаемые на космическом аппарате альфвеновские колебания и какова их мелкомасштабная радиальная структура.



Пример построения фазового портрета для основной гармоники стоячих альфвеновских волн с предельно большим азимутальным волновым числом $m=500$. Красная и синяя линии — радиальные (поперек магнитных оболочек) структуры соответственно радиальной B_r и азимутальной B_ϕ компонент магнитного поля волны; черная линия — разность фаз между этими компонентами для слабозатухающих ($|\gamma| \ll \omega$, $\gamma < 0$) колебаний; зеленая линия — разность фаз для аналогичных слабонеустойчивых ($0 < \gamma < \omega$) колебаний

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Anderson B.J., Engebretson M.J., Rounds S.P., et al. A statistical study of Pc3-5 pulsations observed by the AMPTE/CCE Magnetic Fields Experiment. 1. Occurrence distributions. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95, no. A7. P. 10495–10523. DOI: [10.1029/JA095iA07p10495](https://doi.org/10.1029/JA095iA07p10495).

Dungey J.W., Southwood D.J. Ultra-low frequency waves in the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 1970. Vol. 10. P. 672–688. DOI: [10.1007/BF00171551](https://doi.org/10.1007/BF00171551).

Leonovich A.S., Kozlov D.A., Vlasov A.A. Kinetic Alfvén waves near a dissipative layer. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, e2021JA029580. DOI: [10.1029/2021JA029580](https://doi.org/10.1029/2021JA029580).

Pilipenko V.A. ULF waves on the ground and in space. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1990. Vol. 52, iss. 12. P. 1193–1209. DOI: [10.1016/0021-9169\(90\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(90)90087-4).

Takahashi K., McPherron R.L. Harmonic structure of Pc3-4 pulsations. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, no. A3. P. 1504–1516. DOI: [10.1029/JA087iA03p01504](https://doi.org/10.1029/JA087iA03p01504).