

СТРУКТУРА ГРУПП СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ В СПЕКТРАХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НОЧНОЙ СТОРОНЫ МАГНИТОСФЕРЫ

STRUCTURE OF GROUPS OF EIGENFREQUENCIES IN SPECTRA OF GEOMAGNETIC PULSATIONS IN THE NIGHTSIDE MAGNETOSPHERE

А.Р. Поляков

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, polar@iszf.irk.ru*

A.R. Polyakov

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

Аннотация. С помощью новой техники метода корреляционной функции флуктуаций амплитуды и фазы (КФАФ) обработаны записи флуктуаций компонент геомагнитного поля в обсерваториях Монды и Борок для ряда часовых интервалов ночной стороны магнитосферы. Метод позволяет детектировать группы эквидистантных частот в спектре исходного сигнала и измерять разность двух соседних частот в каждой группе.

Показано, что как и для флуктуаций дневной стороны [Поляков, 2018], группы эквидистантных частот в составе широкополосных спектров этих флуктуаций определяются собственными частотами 2D-резонатора альфвеновских волн. Установлена экспериментальная зависимость некоторой комбинации параметров этого резонатора от местного времени. Совпадение структурных элементов в конечных продуктах обработки компонент север—юг (СЮ) и восток—запад (ВЗ) альфвеновских флуктуаций практически для всех часовых интервалов убедительно свидетельствует о достоверности результатов техники КФАФ при обработке любых широкополосных сигналов.

Ключевые слова: техника обработки сигналов; корреляционная функция; собственные частоты.

Abstract. Using a new method of correlation function for amplitude and phase fluctuations (APCF), records of geomagnetic field component fluctuations (observatories Mondy and Borok) have been processed for a number of hour zones of the nightside magnetosphere. This method is meant to detect groups of equidistant frequencies inside the spectrum of source signal and also to measure a difference between two neighbor frequencies in each of these groups.

The groups of equidistant frequencies in broadband spectra of these fluctuations are shown to depend on eigenfrequencies of the 2D Alfvén wave resonator, just as for dayside fluctuations [Polyakov, 2018]. An empirical relation has been found between a combination of parameters of this resonator and local time. The similarity between structural elements in the final products of processing of Alfvén fluctuation N-S and E-W components for almost all hour zones clearly indicates the reliability of the results of the APCF method in processing any broadband signals.

Keywords: signal processing technique, correlation function, eigenfrequencies.

ВВЕДЕНИЕ

Главным результатом цикла работ [Поляков, 2010, 2014, 2015, 2018] следует считать создание нового оригинального метода обработки сигналов и соответствующей ему компьютерной программы. Метод основан на анализе особым образом сконструированной корреляционной функции флуктуаций амплитуды и фазы (КФАФ) и предназначен для детектирования групп эквидистантных частот в широкополосном спектре исходного сигнала.

Подробно техника КФАФ описана в работах [Поляков, 2015, 2018]. Здесь мы только перечислим ее основные положения. На начальном этапе исходный сигнал преобразуется в малую добавку к синусоиде заданной частоты. Для такого сигнала на каждом временном шаге i определяются отклонения амплитуды $n_i(\Theta_i)$ и фазы $\gamma_i(\Theta_i)$ от амплитуды и фазы идеальной синусоиды, Θ_i — фаза этой синусоиды.

На следующем этапе определяются кросс- и автокорреляционные функции флуктуаций амплитуды и фазы и по ним вычисляется функция

$$G(\tau) = \frac{[\overline{\gamma(\Theta)\gamma(\Theta-\tau)}][\overline{n(\Theta)n(\Theta-\tau)}] - [\overline{\gamma(\Theta)n(\Theta-\tau)}][\overline{n(\Theta)\gamma(\Theta-\tau)}]}{[\overline{\gamma(\Theta)\gamma(\Theta-\tau)}][\overline{n(\Theta)n(\Theta-\tau)}] + [\overline{\gamma(\Theta)n(\Theta-\tau)}][\overline{n(\Theta)\gamma(\Theta-\tau)}]}$$

Черта сверху означает усреднение по Θ , τ — сдвиг фазы Θ . Как оказалось, корреляционная функция $G(\tau)$ имеет одно интересное свойство. В перечисленных выше работах при обработке смоделированных сигналов волн различных типов в 1D- и 2D-резонаторах, а также сигналов, просто сконструированных в виде суммы синусоид различной частоты, было показано, что, если в спектре исходного сигнала присутствует группа эквидистантных частот, в структуре функции G появляются пики, периодически следующие друг за другом вдоль оси τ . По положению первого пика τ_1 мы можем косвенно измерить [Поляков, 2018] разность двух соседних частот Δf этой эквидистантной группы в спектре исходного сигнала.

На последнем этапе обработки выявляются все последовательности периодических пиков функции

$G(\tau)$, и для каждой из них измеряется разность Δf . Конечным продуктом обработки исходного сигнала является гистограмма значений этих разностей.

Для традиционного спектра Фурье принято считать, что наличие в его структуре статистически значимого пика означает, что в составе сигнала присутствуют квазимонохроматические колебания на частоте этого пика. В спектре метода КФАФ (гистограмма) каждый пик соответствует не одному, а целой группе колебаний, частоты которых представляют собой эквидистантную последовательность. Положение пика на оси Δf определяет разность двух соседних частот, которая является общей характеристикой всей группы. Техника КФАФ не позволяет определять отдельные частоты, невозможно даже установить, в какой части частотного диапазона они располагаются, и сколько частот содержит каждая группа. В то же время оказалось, что, если в составе группы отсутствует одна или несколько частот подряд, это незначительно меняет соответствующие периодические пики функции $G(\tau)$. Метод КФАФ может успешно детектировать даже такие неполноценные частотные группы.

Для природных широкополосных колебаний группами эквидистантных частот в спектре следует считать собственные частоты резонаторов для тех номеров гармоник, при которых они становятся эквидистантными. В магнитосфере Земли имеется множество таких резонаторов разных типов волн [Leonovich, Mazur, 2001; Zhu, Kivelson, 1989; Lee, Lysak, 1994; Ruohoniemi et al., 1991; Samson, Hargold, 1992; Takahashi et al., 2010]. Каждая 1D стоячая волна резонатора образует одну эквидистантную частотную группу и соответствует одному пику на гистограмме Δf . В работе [Поляков, 2018] метод КФАФ и соответствующая компьютерная программа впервые были использованы для обработки природных сигналов, которые представляют собой короткопериодические флуктуации геомагнитного поля (КПК), регистрируемые на поверхности Земли. Оказалось, что во всех случаях гистограммы Δf состоят из большого количества пиков, которые периодически следуют друг за другом вдоль горизонтальной оси. Было качественно показано, что такое поведение пиков полностью укладывается в схему структуры собственных частот 2D стоячей альфвеновской волны, если в дисперсионном соотношении учесть малую поперечную добавку. В этой работе мы продолжим опыты обработки дискретных записей флуктуаций геомагнитного поля, только не на дневной [Поляков, 2018], а на ночной стороне магнитосферы. Главной особенностью здесь следует считать сравнение гистограмм Δf компонент СЮ и ВЗ, поскольку это должно позволить нам прояснить такую важную проблему метода КФАФ, как реальность и достоверность конечного продукта обработки. На гистограммах Δf мы должны видеть не какие-то беспорядочные произвольные или ложные пики, а именно те, которые соответствуют группам собственных частот в спектре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Как было отмечено выше, для обработки методом КФАФ использовались данные КПК, которые

регистрировались аналогичными индукционными магнитометрами с рабочим диапазоном частот от 1 мГц до 10 Гц в обсерваториях Монды ($\Phi=46.7^\circ$, $\Lambda=173.6^\circ$, $L=2.1$) и Борок ($\Phi=53.9^\circ$, $\Lambda=114.3^\circ$, $L=2.9$), где Φ и Λ — исправленные геомагнитные широта и долгота; L — номер магнитной оболочки.

Данные представлены в дискретном виде, шаг по времени составляет 0.1 с. В компьютерной программе КФАФ перед началом обработки исходного сигнала мы должны задать интервал частот, в пределах которого будет производиться детектирование эквидистантных групп собственных частот. В данном случае этот интервал имеет границы от 0.2 до 2.2 Гц и соответствует высокочастотной составляющей КПК-диапазона.

Весь временной массив для каждой станции был разбит на семь отдельных часовых интервалов от 20–21 LT 10.04.2000 до 02–03 LT 11.04.2000. Для каждого интервала обрабатывались записи компонент СЮ и ВЗ.

В качестве конечного результата обработки методом КФАФ мы получаем гистограмму значений Δf . Одна из них (обсерватория Монды) показана для примера на рис. 1, б. Здесь же указаны компонента магнитного поля и местное время часового интервала. По вертикальной оси n — число реальных измерений Δf во всем заданном диапазоне значений, n_0 — полное число всех попыток этих измерений. Отношение n/n_0 может служить оценкой вероятности наблюдения каждого из значений Δf на графике. Величины f и Δf приводятся в безразмерном виде, умноженными на временной шаг исходного сигнала ($f \rightarrow f\Delta t$).

На этой гистограмме мы видим последовательность множества четких, обособленных друг от друга пиков. Линия, соединяющая основания этих пиков плавно спадает до нуля по вертикальной оси от начала до конца диапазона значений Δf . Поскольку нас интересует структура и расположение только самих пиков, целесообразно будет избавиться от медленных и слишком мелкомасштабных флуктуаций. Для этого

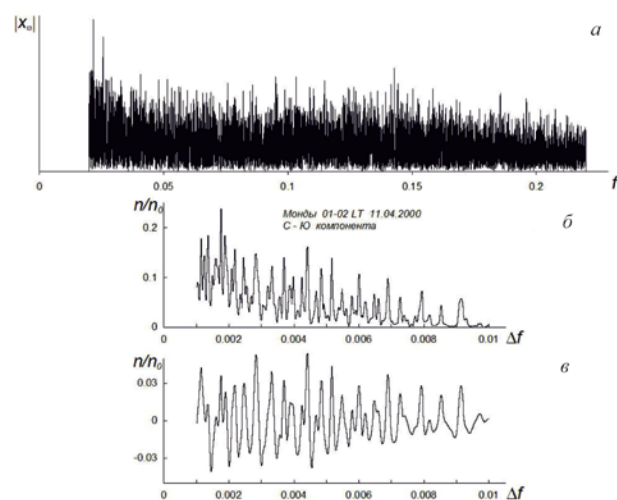


Рис. 1. Пример гистограммы значений Δf — конечного продукта техники обработки КФАФ для компоненты С-Ю флуктуаций геомагнитного поля (б); традиционный спектр Фурье (а); гистограмма Δf после полосовой фильтрации (е)

используем процедуру полосовой фильтрации со специально подобранными граничными частотами. Отфильтрованная таким образом гистограмма показана на панели *в*. Очевидно, что пики на ней более наглядны и удобнее для анализа, чем на панели *б*.

В спектре групп эквидистантных собственных частот (панель *в*) мы можем насчитать 16 пиков с разными значениями Δf , начиная от пика с $\Delta f \approx 0.0018$ до пика с $\Delta f \approx 0.007$, которые следуют друг за другом вдоль горизонтальной оси через почти одинаковые интервалы. Аналогичная особенность этих пиков была выявлена в [Поляков, 2018] для флуктуаций геомагнитного поля на дневной стороне магнитосферы. В этой работе было качественно показано, что такая структура пиков должна быть обусловлена собственными частотами 2D стоячей альфвеновской волны, если учесть малую поперечную дисперсию [Леонович, Мазур, 1987]. Собственные частоты при этом определяются двумя целыми числами: n — номером гармоники вдоль магнитного поля и m — номером гармоники вдоль поперечной радиальной координаты. Каждому n соответствует группа эквидистантных частот с разными m . Разность двух соседних частот в такой группе определяется соотношением

$$\Delta f_n = \frac{\Omega_n}{2\pi} \frac{S\pi}{l_x}, \quad (1)$$

где Ω_n — частота продольных колебаний магнитного поля (field line resonance); S — ларморовский радиус фоновых протонов, l_x — размер резонатора вдоль радиальной координаты.

Соотношение (1) как нельзя лучше подходит для интерпретации упомянутых выше пиков на рис. 1, *в*. При этом каждому из пиков соответствует свой номер n (таких пиков может быть сколь угодно много, в данном случае их насчитывается 16) и располагаться вдоль оси Δf они должны эквидистантно как собственные частоты Ω_n при больших номерах гармоник.

Для сравнения с гистограммой на рис. 1, *а* представлен традиционный спектр Фурье в заданном при обработке диапазоне частот. Заметно, что в его составе отсутствуют ярко выраженные пики на каких-то отдельных частотах. Принято считать, что такой спектр подобен спектру случайного шума и не содержит полезной информации. В то же время спектр метода КФАФ (см. рис. 1, *в*) показывает, что в составе спектра Фурье должны входить пики на частотах, как минимум, 16-ти эквидистантных групп с разными значениями Δf . Если каждая группа содержит 10 частот (это минимальная оценка [Поляков, 2018]), всего таких пиков будет 160. Располагаясь в пределах одного и того же частотного диапазона, это множество пиков создает такую, на первый взгляд, беспорядочную структуру спектра, которую мы видим на рис. 1, *а*.

Перейдем к сравнению гистограмм Δf компонент флуктуаций геомагнитного поля. На рис. 2 показаны такие гистограммы для двух часовых интервалов обсерватории Монды (рис. 2, *а*) и обсерватории Борок (рис. 2, *б*). В каждом случае сверху расположена гистограмма компоненты СЮ, а под ней — гистограмма компоненты ВЗ.

На гистограмме СЮ левой панели рис. 2, *а* хорошо заметна последовательность десяти отчетливых пиков, примерно одинаковых по высоте. Взаимное расположение вдоль горизонтальной оси для них можно считать приблизительно эквидистантным. Очевидно, эти пики, так же как в случае, представленном на рис. 1, *в*, обусловлены разностями соседних собственных частот 2D альфвеновской волны (1). На гистограмме ВЗ мы видим также последовательность пиков, хотя и не столь наглядную, как на гистограмме СЮ, поскольку пики в этом случае значительно отличаются по высоте.

Для того чтобы сравнить положения пиков на оси Δf для гистограмм СЮ и ВЗ, на левой панели рис. 2, *а* проведены вертикальные линии, каждая из которых проходит через максимум пика на гистограмме СЮ. Для первых трех линий слева отчетливо видно, что положение нижних концов почти идеально совпадает с положением вершин соответствующих пиков гистограммы ВЗ. На четвертой линии вершина пика заметно отклоняется, но даже в этом случае такое отклонение составляет всего 7 % от значения Δf , при котором линия пересекает горизонтальную ось. Следующий справа пик гистограммы СЮ (отмечен вертикальной стрелкой) не имеет своего аналога на гистограмме ВЗ. Однако он оказывается настолько сближенным с соседним пиком справа, что, возможно, их следует считать одним пиком со сложной раздвоенной структурой. Все остальные пики гистограммы СЮ в серии, отмеченной вертикальными линиями, имеют положение, совпадающее, с почти идеальной точностью (отклонение не превышает 5 %), с положением соответствующих пиков на гистограмме ВЗ.

На правой панели рис. 2, *а* для другого часового интервала наблюдается аналогичная картина. По нижним концам вертикальных линий мы видим, что положения пиков отмеченной серии гистограммы СЮ на оси Δf с большой точностью совпадает с положением соответствующих пиков гистограммы ВЗ. Исключение составляет единственный пик (отмечен стрелкой) из 11 пиков всей серии, который не имеет аналогичного пика на нижней гистограмме.

Для обсерватории Борок (см. рис. 2, *б*) связь пиков гистограмм Δf с собственными частотами 2D альфвеновских волн (1) наиболее наглядно проявляется в компоненте ВЗ. Особенно это заметно на графиках правой панели. На гистограмме ВЗ мы видим, что большинство отмеченных вертикальными линиями пиков почти не содержат мелкомасштабных флуктуаций и располагаются вдоль оси Δf почти эквидистантно. На гистограмме СЮ правой панели таких флуктуаций (помех) значительно больше. Однако вертикальные линии как на правой, так и на левой панелях (рис. 2, *б*) убедительно показывают, что положения основных пиков гистограмм СЮ и ВЗ совпадают почти идеально, — так же, как на рис. 2, *а*.

Очевидно, что группы эквидистантных частот в спектрах геомагнитных флуктуаций, регистрируемых на земной поверхности, должны определяться в основном собственными частотами альфвеновских волн. В этих волнах частотный состав спектров должен быть одинаковым для компонент СЮ и ВЗ.

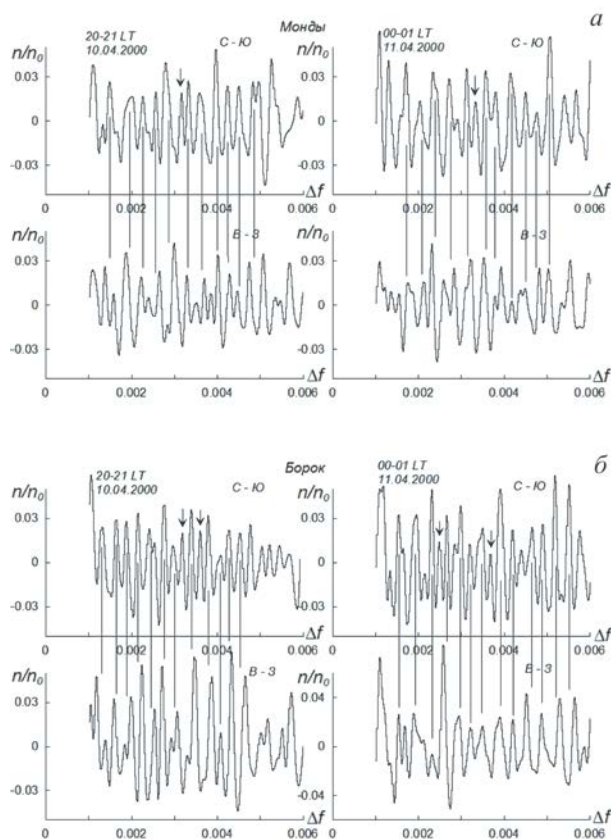


Рис. 2. Сравнение положений пиков гистограмм Δf компонент СЮ и ВЗ для некоторых часовых интервалов обсерваторий Монды и Борок

Совпадение положений пиков на оси Δf для гистограмм разных компонент на рис. 2 это убедительно подтверждает. В то же время записи флуктуаций разных компонент для техники обработки КФАФ представляют собой независимые друг от друга сигналы. При этом на рис. 2 мы видим, что во всех представленных случаях структура пиков конечного продукта обработки одного из сигналов иногда с точностью до мелких деталей совпадает со структурой пиков гистограммы другого сигнала. Эти совпадения представляют собой очень важный результат для дальнейшего развития метода детектирования эквидистантных частотных групп КФАФ и его использования для обработки широкополосных сигналов. Теперь мы можем с уверенностью считать, что этот метод и соответствующая компьютерная программа позволяют получать объективную и достоверную информацию о наличии эквидистантных частотных групп в спектре (детектирование групп) и с приемлемой точностью определять параметры Δf для каждой группы. В начале работы над проектом это не казалось очевидным. Предполагалось, что помехи в составе флуктуаций геомагнитного поля могут также образовывать эквидистантные частотные группы в спектре. Конечная гистограмма метода КФАФ при этом должна содержать множество шумовых беспорядочных пиков, которые сильно искажат общую картину. Однако на реальных гистограммах (рис. 2) вклад таких пиков сводится к минимуму, в большинстве случаев мы видим только эквидистантные пики собственных частот 2D магнитосферных стоячих альфвеновских волн.

На гистограммах компонент СЮ и ВЗ, показанных на рис. 2 для некоторых часовых интервалов, большинство пиков (отмечены вертикальными линиями) располагаются вдоль горизонтальной оси приблизительно на одинаковом расстоянии друг от друга. Вертикальные линии, как доски забора, выглядят почти эквидистантно. По положениям этих линий мы можем определить среднее значение для разности Δf_{n+1} и Δf_n положений двух соседних пиков. Обозначим эту разность $\delta\Delta f$. Такие $\delta\Delta f$ были измерены для всех обработанных часовых интервалов записи флуктуаций геомагнитного поля обсерваторий Монды и Борок. На рис. 3 представлены зависимости этих измерений от местного времени для обеих обсерваторий. Разность $\delta\Delta f$ приведена не в безразмерных единицах, а в герцах. Видно, что эта разность на ночной стороне магнитосферы почти не меняется в пределах большого интервала азимутальной координаты от 20 до 3 LT. Среднее для всего интервала $\delta\Delta f \approx 3.2$ мГц. Только в часовом интервале 1–2 LT наблюдается незначительное повышение до $\delta\Delta f \approx 3.5$ мГц.

Согласно (1), качественное соотношение для $\delta\Delta f$ имеет вид

$$\delta\Delta f = \Delta f_{n+1} - \Delta f_n = \frac{\Delta\Omega}{2\pi} \frac{S\pi}{l_x}, \quad (2)$$

где $\Delta\Omega = \Omega_{n+1} - \Omega_n$ при таких номерах гармоник, когда частоты Ω_n становятся эквидистантными. Из него следует, что измеряемая характеристика $\delta\Delta f$ определяется тремя параметрами правой части (2). Отмеченное выше увеличение до $\delta\Delta f \approx 3.5$ мГц, скорее всего, связано с небольшим уменьшением радиального размера резонатора l_x в секторе 1–2 LT.

На рис. 3 отчетливо видно, что все изменения кривой, помеченной точками (обсерватория Монды), полностью соответствуют изменениям линии, помеченной крестиками (обсерватория Борок). Максимальное различие значений $\delta\Delta f$ этих кривых составляет всего 5%. При этом необходимо учитывать, что исходные для обработки сигналы наблюдаются в разных точках земной поверхности (обсерватории Монды и Борок), в которых флуктуации геомагнитного поля регистрируются разными приборами в условиях разного влияния природных и антропоген-

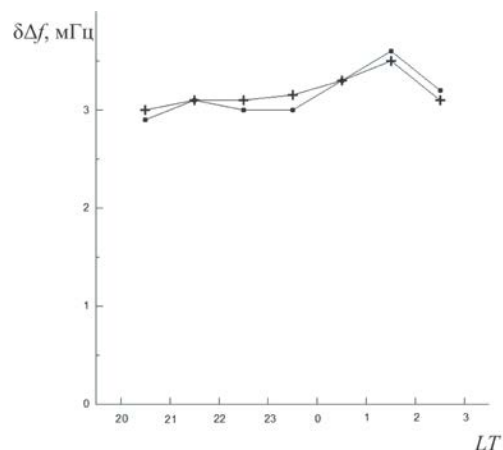


Рис. 3. Зависимость средней разности положений соседних пиков $\delta\Delta f$ от местного времени (точки — обсерватория Монды, крестики — обсерватория Борок)

ных помех. Несмотря на это, на рис. 3 мы видим почти абсолютное совпадение значений $\delta\Delta f$ в обеих обсерваториях. Это совпадение является еще одним убедительным свидетельством подлинности и достоверности результатов новой техники обработки КФАФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сделать следующие выводы.

1. Анализ гистограмм значений Δf , полученных с помощью новой техники обработки сигналов КФАФ, показывает, что для ночной стороны магнитосферы во всех случаях характерно такое же периодическое чередование последовательности пиков вдоль оси Δf , как у пиков гистограмм на дневной стороне магнитосферы [Поляков, 2018]. Положение пика с номером n на горизонтальной оси Δf_n определяется (1) как разность двух соседних частот в эквидистантной группе, множество которых образуют собственные частоты 2D стоячих альфвеновских волн.

2. По гистограммам компонент СЮ и ВЗ каждого часового интервала измерены средние значения разности положений соседних пиков на горизонтальной оси $\delta\Delta f$. Зависимости этого параметра от местного времени для обсерваторий Монды и Борок (см. рис. 3) показывают, что его значения не меняются в пределах значительного по размеру азимутального сектора ночной магнитосферы. Среднее значение в этом секторе $\delta\Delta f = 3.2$ мГц. Показано, что разность $\delta\Delta f$ определяется комбинацией трех параметров резонатора 2D альфвеновских волн (2). Небольшие отклонения от среднего на рис. 3, скорее всего, связаны с изменением радиального размера резонатора l_x .

3. Сравнение гистограмм для флуктуаций компонент СЮ и ВЗ (см. рис. 2) показывает, что на каждой такой паре мы видим подобные пики, положение которых с высокой точностью совпадает на горизонтальной оси. Это подтверждает гипотезу о том, что данные пики происходят от групп собственных частот 2D альфвеновской волны. В то же время такое, в некоторых случаях почти идеальное, совпадение пиков по компонентам убедительно свидетельствует о том, что новая техника обработки КФАФ позволяет получать непротиворечивую и достоверную информацию об эквидистантных частотных группах в спектрах широкополосных сигналов. Этот важный для данной работы результат подтверждается также совпадением изменений зависимостей $\delta\Delta f$ от LT (см. рис. 3) для обсерваторий Монды и Борок, поскольку исходные для обработки сигналы регистрировались на большом расстоянии друг от друга в условиях с разными уровнями приборных и антропогенных помех.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Леонович А.С., Мазур В.А. Динамика мелкомасштабных альвеновских волн в магнитосферном резонаторе. *Физика плазмы*. 1987. Т. 13, вып. 7. С. 800–810.

Поляков А.Р. Новый метод обработки записей сейсмических колебаний, основанный на анализе корреляционных функций случайных флуктуаций амплитуды и фазы. Ч. 1–2. *Солнечно-земная физика*. 2010. Вып. 15. С. 44–57.

Поляков А.Р. Анализ структуры стоячих МГД-волн в магнитосфере методом корреляционных функций флуктуаций амплитуды и фазы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2014. Т. 54, № 6. С. 752–762. DOI: [10.7868/S0016794014060145](https://doi.org/10.7868/S0016794014060145).

Поляков А.Р. Связь пиков корреляционных функций флуктуаций амплитуды и фазы и собственных частот в спектре колебаний. *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 3. С. 62–71. DOI: [10.12737/10455](https://doi.org/10.12737/10455).

Поляков А.Р. Детектирование групп эквидистантных частот в спектрах геомагнитных пульсаций. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 43–53. DOI: [10.12737/szf-44201805](https://doi.org/10.12737/szf-44201805).

Lee D.-H., Lysak R.L. Numerical studies on ULF wave structures in the dipole model, in: Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves. *Geophys. Monograph Ser.* 1994. Vol. 81. P. 293–297.

Leonovich A.S., Mazur V.A. On the spectrum of magnetosonic eigenoscillations of an axisymmetric magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, no. A3. 3919.

Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Baker K.B. HF radar observations of Pc5 field line resonances in the midnight/early morning MLT sector. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, iss. A9. P. 15697–15710. DOI: [10.1029/91JA00795](https://doi.org/10.1029/91JA00795).

Samson J.C., Harrold B.G. Field line resonances associated with waveguides in the magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 19, iss. 5. P. 441–444. DOI: [10.1029/92gl00116](https://doi.org/10.1029/92gl00116).

Takahashi K., Bonnell J., Glassmeier K.-H., et al. Multipoint observation of fast mode waves trapped in the dayside plasmasphere. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, iss. A15. A12247. DOI: [10.1029/2010JA015956](https://doi.org/10.1029/2010JA015956).

Zhu X., Kivelson M.G. Global mode ULF pulsations in a magnetosphere with a nonmonotonic Alfvén velocity profile. *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94, iss. A2. P. 1479–1485. DOI: [10.1029/ja094ia02p01479](https://doi.org/10.1029/ja094ia02p01479).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Поляков А.Р. Структура групп собственных частот в спектрах геомагнитных пульсаций ночной стороны магнитосферы. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 49–53. DOI: [10.12737/szf-83202207](https://doi.org/10.12737/szf-83202207).