

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОИОННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ЛУЧЕЙ НА ДАЛЬНИХ КВ РАДИОЛИНИЯХ

В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.П. Лаптев

## RESEARCHING OF MAGNETOIONIC RAY SPLITTING ON LONG-RANGE HF RADIO CHANNELS

V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, M.P. Laptev

Развит метод кепстрального анализа на случай исследования магнитоионного расщепления лучей при наклонном зондировании ионосферы непрерывными сигналами с линейной частотной модуляцией, когда они не разрешаются по задержке. Предложена математическая модель, описывающая данный способ исследования. Разработанные алгоритмы реализованы в экспериментальной исследовательской установке и прошли апробацию на радиолиниях: Хабаровск–Йошкар-Ола и Inskip – Йошкар-Ола. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 04-05-65120; 05-02-17469; 05-07-90313).

The cepstral analysis method for researching into magnetoionic ray splitting during oblique-incidence sounding by means of continuous linear frequency modulation signal, when rays are not distinguished in time, was developed. The mathematical model, describing the researching method, was suggested. The algorithms developed have been realized in experimental research device and approved on the following radio channels: Habarovsk–Yoshkar-Ola and Inskip–Yoshkar-Ola. The work is done under support of RFBR (project 04-05-65120; 05-02-17469; 05-07-90313).

### Введение

Известно, что на декаметровых радиолиниях большой протяженности магнитоионные компоненты нижних лучей не разрешаются даже современными ЛЧМ-ионозондами из-за малой задержки между ними. Очевидно, что при определенных условиях разделение интерферирующих магнитоионных лучей возможно с применением метода кепстрального анализа.

### Цель работы

Теоретически обосновать возможность применения кепстрального анализа к разделению магнитоионных компонент лучей при наклонном зондировании ионосферы непрерывным сигналом с линейной частотной модуляцией. Разработать алгоритмы и программное обеспечение для реализации данного метода. Апробировать разработанный радиофизический метод в натурных экспериментах.

### Математическое моделирование

Общее выражение для ЛЧМ сигнала, излучаемого передатчиком ионозонда, может быть представлено в виде:

$$a_T(t) = a_0 \cos\left(2\pi\left(f_n t + 0,5 \dot{f} t^2\right) + \varphi_1\right), \quad (1)$$

где  $f = f_n + \dot{f}t$  – текущая частота;  $f \in [f_H, f_K]$ ,  $f_H$  и  $f_K$  – начальная и конечная частоты излучаемого сигнала соответственно;  $\dot{f} = df/dt$  – скорость изменения частоты,  $\varphi_1$  – начальная фаза сигнала.

После распространения диагностирующего ЛЧМ сигнала (1) в ионосферном стационарном радиоканале ( $\tau_{\Phi}(t) = \text{const}$ ) принимаемый ЛЧМ сигнал, попадая в приемник, обрабатывается методом сжатия в частотной области.

Низкочастотный сигнал  $A(t)$  разностной частоты, выделяемый ФНЧ, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} A(t) &= \sum_{j=1}^m \frac{|H_j(f)| \cdot a_0^2}{2} \cos(\varphi_{Rj} - \varphi_{Tj}) = \\ &= \sum_{j=1}^m \frac{|H_j(f)| \cdot a_0^2}{2} \cos\left(2\pi\left(f_n \tau_{\Phi j} - 0,5 \dot{f} \tau_{\Phi j}^2 + \dot{f} \tau_{\Phi j} t\right) + \Delta\varphi\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Сигнал разностной частоты для  $j$ -ой моды передаваемого ЛЧМ сигнала может быть записан без учета начальной фазы в виде:

$$A_j(t) = H_j \cos(2\pi \dot{f} \tau_j \cdot t) \quad (3)$$

В случае магнитоионного расщепления сигнал представляет из себя сумму двух компонент, обыкновенной и необыкновенной (*ordinary* и *extraordinary*). Тогда в точке приема будет получен сигнал:

$$A(t) = H_o \cos(2\pi \dot{f} \tau_o \cdot t) + H_x \cos(2\pi \dot{f} \tau_x \cdot t) \quad (4)$$

Модуль спектра суммы магнитоионных компонент можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} |S_o + S_x|^2 &= \left| r_o e^{i\phi_o} + r_x e^{i\phi_x} \right|^2 = \\ &= r_o^2 + r_x^2 + 2r_o r_x \cos(\phi_o - \phi_x) = \\ &(T_s \sin c((\omega_{o,x} - \omega) \frac{T_s}{2}))^2 \times \\ &\times (H_o^2 + H_x^2 + 2H_o H_x \cos(\Delta\omega(t_n + \frac{T_s}{2}))), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta\omega = 2\pi \Delta f = 2\pi \dot{f} \Delta\tau_{ep}$ , а  $\Delta\tau_{ep} = \tau_{epo} - \tau_{epx}$  – задержка между магнитоионными компонентами;  $\omega_o \approx \omega_x = \omega_{o,x}$  (т.е. задержки магнитоионных компонент близки)

Видно, что квадрат спектральной плотности суммы разностных сигналов магнитоионных компонент имеет пик на частоте  $\omega_{o,x}$ , а его амплитуда подвержена гармоническим колебаниям, частота которых зависит от задержки между магнитоионными

ми компонентами, а амплитуда от соотношения их амплитуд.

Кепстр разностного сигнала можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 C(q) = & \int_{f_n}^{f_n+f_3} \ln|S(f)|^2 \cdot \exp(i2\pi f q) df = (2\ln(T_3) + \\
 & + \ln(H_o^2 + H_x^2)) \times \exp(i2\pi q(f_n + \frac{f_3}{2})) \times \\
 & \times f_3 \cdot \sin c(2\pi q \frac{f_3}{2}) + (\frac{H_o H_x}{2 \cdot (H_o^2 + H_x^2)})^2 \times \\
 & \times (\exp(-i2\pi \Delta\tau_{ep} \Delta f) \exp(i2\pi(q - 2\Delta\tau_{ep})(f_n + \frac{f_3}{2})) \times \\
 & \times \frac{f_3}{2} \cdot \sin c(2\pi(q - 2\Delta\tau_{ep}) \frac{f_3}{2}) + \\
 & + 2 \exp(i2\pi(f_n + \frac{f_3}{2})) f_3 \sin c(2\pi q) \frac{f_3}{2}) + \dots
 \end{aligned} \tag{9}$$

Видно, что за задержку отвечает второе слагаемое в кепстре, имеющее максимум на сачтоте  $q = \Delta\tau$ . Амплитуда этого слагаемого зависит от величины отношения произведения к сумме квадратов амплитуд магнитоионных компонент. Поэтому данная сачтота отсутствует, если на приеме отсутствует хотя бы одна компонента.

При решении задачи определения задержек между магнитоионными компонентами важно уметь оценивать уровень пиков на сачтотах, соответствующих искомым задержкам. Кроме того, для получения оценок энергии обыкновенного и необыкновенного лучей нужно знать их амплитуды. Из анализа предложенной модели можно сделать вывод, что отношение амплитуд магнитоионных компонент  $H_x / H_o$  – влияет на уровень пиков кепстра. Была исследована зависимость амплитуды первого пика (на сачтоте отличной от 0 мкс) от отношения амплитуд магнитоионных компонент.

Поскольку кепстральная обработка чувствительна к влиянию помех, было проведено исследование с целью определения границ применимости данного метода к решению задачи определения малых задержек. В результате моделирования был сделан следующий вывод: при отношении сигнал/шум меньше 30 дБ полезные пики размываются шумом и кепстральная обработка становится затрудненной.

Натурный эксперимент и интерпретация полученных данных. Эксперименты по апробации алгоритма были проведены на двух радиолиниях широтного распространения (Хабаровск–Йошкар-Ола и Inskip–Йошкар-Ола). В начале были получены спектры мощности сигналов разностной частоты для анализируемых мод. При этом 2F2 является первой принимаемой модой для трассы Хабаровск–Йошкар-Ола, а 1F2 – первой для трассы Inskip–Йошкар-Ола. Кепстральной обработке подвергались нижние лучи, для которых магнитоионные компоненты не разрешались по задержке ионозондом с инструментальной разрешающей способностью равной 24 мкс.

Анализ полученных кепстров показал, что: для трассы Хабаровск–Йошкар-Ола задержка ИХ магнитоионных компонент на выделенных на ионограмме частотах составляла 3 мкс, для трассы Inskip–Йошкар-Ола – 2.15 мкс. Эти экспериментальные результаты согласуются с теоретическими оценками возможной задержки между магнитоионными компонентами для этих радиотрасс, полученных в численных экспериментах с использованием статистической модели ионосферы IRI.

### Выводы

Теоретически обоснована возможность применения кепстрального анализа к разделению магнитоионных компонент мод распространения при наклонном зондировании ионосферы непрерывным сигналом с линейной частотной модуляцией.

Предложен метод кепстрального анализа к исследованию характеристик магнитоионных лучей в экспериментах по наклонному зондированию ионосферы на трассах большой протяженности. Предложенный метод показал, что на трассах, протяженностью 2500–6000 км, разность задержек между магнитоионными компонентами первой принимаемой моды составляет 2–3 мкс.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты: 04-05-65120, 05-07-90313).

<sup>1</sup>Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола