

И. В. Либерман, А. А. Ржанов, С. Б. Шаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Представлены результаты анализа поляризационной структуры ионосферных сигналов. Использован ортогонально-круговой базис для оценки поляризационных характеристик. Экспериментально подтвержден эффект Погкельса.

Results of analysis of the polarization structure of ionospheric signals. The orthogonally circular basis for assessing the polarization characteristics is used. The Pockels effect is experimentally verified.

Ключевые слова: ионосфера, распространение радиоволн, поляризация, эффект Погкельса.

Key words: ionosphere, radio wave propagation, polarization, Pockels effect.

Тематика исследований вопросов распространения и приема ионосферных сигналов остается актуальной задачей. Это обусловлено необходимостью диагностики, изучения различных ионосферных процессов и мониторинга состояния ионосферы. С другой стороны, сложность ионосферы предопределяет сложность структуры ионосферных сигналов. В связи с этим для приема и анализа ионосферных сигналов требуется разработка новых методов. Это вполне возможно на основе современной микроэлектронной и компьютерной техники. Цель данной работы – создание автоматизированного аппаратного комплекса, составной частью которого являются измерения и анализ поляризационной структуры ионосферных сигналов. Однако для оценки структуры и технических параметров комплекса аппаратуры проводится предварительный анализ поляризационной структуры ионосферных сигналов по данным эксперимента 1975 г.

При ионосферном распространении радиоволн в точку приема приходит, как правило, несколько лучей, отраженных от E, F1, F2 областей ионосферы. Наличие магнитного поля земли H_0 приводит к анизотропии ионосферы, к явлению двойного лучепреломления. В этом случае каждый луч разделяется на обыкновенный и необыкновенный, их поляризация определяется выражением $\hat{K}_{1,2}$ и зависит от угла α между вектором магнитного поля \vec{H}_0 и волновым вектором \vec{k} .

$$\frac{E_{y1,2}}{E_{x1,2}} = K_{1,2} = -i \frac{2\sqrt{u}(1-v)\cos\alpha}{u\sin^2\alpha \mp \sqrt{u^2\sin^4\alpha + 4u(1-v)^2\cos^2\alpha}}. \quad (1)$$

$$\sqrt{u} = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{|e|H^{(0)}}{mc\omega}, \quad v = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = \frac{4\pi e^2 N}{m\omega^2},$$

где α – угол между вектором магнитного поля земли и волновым вектором; ω – рабочая круговая частота; N – электронная концентрация в ионосфере; e, m, c – заряд, масса электрона, скорость света в вакууме.

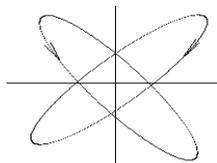


Рис. 1. Эллипсы поляризации двух магнитоионных компонент

В общем случае согласно (1) в ионосфере поляризация магнитоионных компонент эллиптическая. Большие оси эллипсов перпендикулярны и вращение вектора напряженности поля происходит по часовой стрелке и против (рис. 1). При анализе поляризационной структуры ионосферных сигналов интерес представляет область входа луча в ионосферу и область выхода магнитоионных компонент (рис. 2).

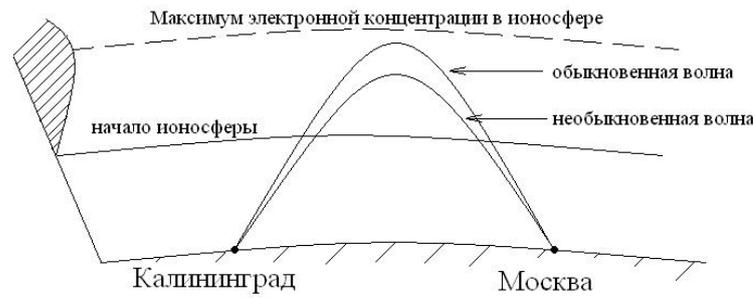


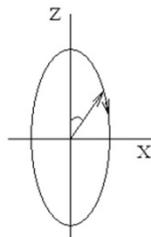
Рис. 2. Область входа луча в ионосферу и область выхода магнитоионных компонент из ионосферы

При входе в ионосферу происходит разделение энергии луча на две части, относящиеся к энергии магнитоионных компонент. При выходе из ионосферы определяется предельная поляризация, которая отмечается в точке приема.

В 1975 г. для исследования поляризационной структуры ионосферных сигналов был проведен специальный эксперимент. Излучались короткие ($T = 200$ мкс) радиоимпульсы на трассах Свердловск—Калининград и Тбилиси—Калининград. Длительность радиоимпульсов была достаточной для разделения отдельных мод сигнала (отражения от E, F1, F2 областей ионосферы). Однако этой длительности зачастую недостаточно для разделения по времени задержки магнитоионных компонент. Указанные трассы квазипоперечные. В связи с этим ожидаемые поляризации магнитоионных компонент линейные и взаимно перпендикулярные. В случае, когда магнитоионные компоненты не разделяются во времени, на квазипоперечных трассах должен наблюдаться эффект Пококельса: за счет изменения разности фаз между магнитоионными компонентами общая поляризация меняется от линейной до эллиптической и снова линейной.

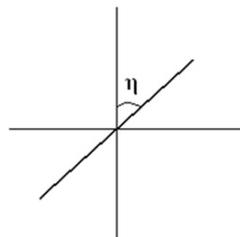
Для исследования поляризационной структуры выделенных во времени мод сигнала использовались два базиса: линейный и ортогонально-круговой. Линейный базис создается за счет вертикального и горизонтального вибраторов, определяющих напряженности поля E_z , E_x . Схема создания линейного базиса и ортогонально-кругового базиса показана на рисунке 3. Ортогонально-круговой базис создается за счет добавки фазы $\pi/2$, суммирования и вычитания.

Измерение поляризационных характеристик сигнала



Линейный базис

$$\begin{aligned} \delta &= \pi/2 \\ \gamma &= 0 \\ \operatorname{tg} 2\gamma &= \frac{2q \cos \delta}{1 - q^2} \end{aligned}$$



Ортогонально-круговой базис

$$\begin{aligned} \delta &= 0 \\ \eta &= \pi/4 \\ \operatorname{tg} 2\eta &= \operatorname{tg}(\pi/2 + \delta) \end{aligned}$$

Рис. 3. Создание линейного базиса и ортогонально-кругового базиса

При использовании этих базисов достаточно определить лишь угол ориентации эллипса поляризации в линейном γ и ортогонально-круговом η базисах. По этим параметрам можно получить все поляризационные характеристики сигнала.

Поляризационная и временная структура выделенных во времени мод сигнала показана на рисунке 4, где представлены четыре различных кадра фотопленки, полученные с помощью фоторегистрации с экрана пятилучевого осциллографа. На отдельных кадрах показана временная развертка сигнала определяющая временную структуру сигнала, линейный базис определяющий поляризационную структуру сигнала отображен слева, ортогонально-круговой базис справа.

Качество экспериментального материала низкое. Однако зависимость от времени углов ориентации γ и η проследить можно.

На 1-м кадре показан случай приема одного луча. На 2-м кадре (внизу слева) — трехмодовая структура сигнала. Две моды имеют вертикальную поляризацию и одна горизонтальную. На 3-м кадре (вверху справа) первая принятая мода сигнала имеет вертикальную поляризацию, а вторая состоит из двух магнитоионных компонент с частичным наложением радиопульсов. На 4-м кадре (внизу справа) показана трехмодовая структура сигнала. Две моды сигнала (первая и третья) имеют вертикальную поляризацию, а вторая — горизонтальную.

На рисунке 5 можно видеть зависимости углов ориентации эллипсов поляризации в линейном γ и ортогонально-круговом η базисах от времени. Изменения поляризационных характеристик небольшие в пределах $\pm 90^\circ$. Это свидетельствует о спокойном состоянии ионосферы.

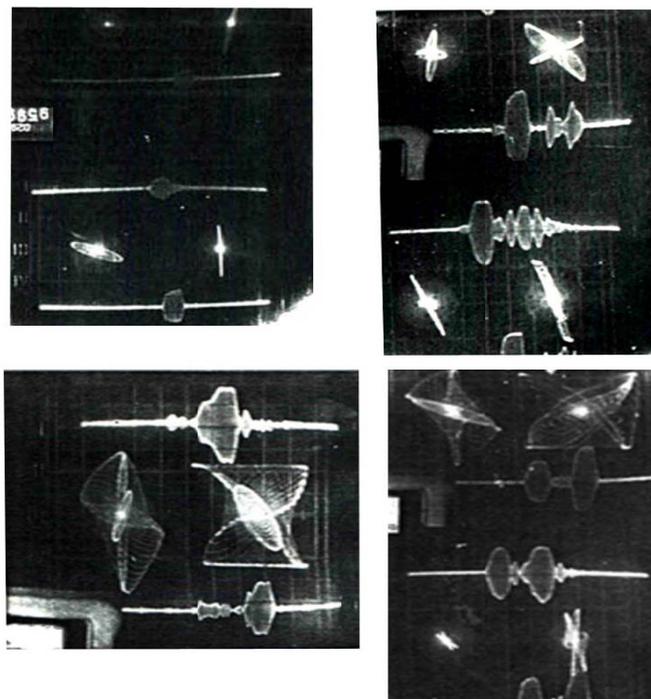


Рис. 4. Поляризационная и временная структура выделенных во времени мод сигнала

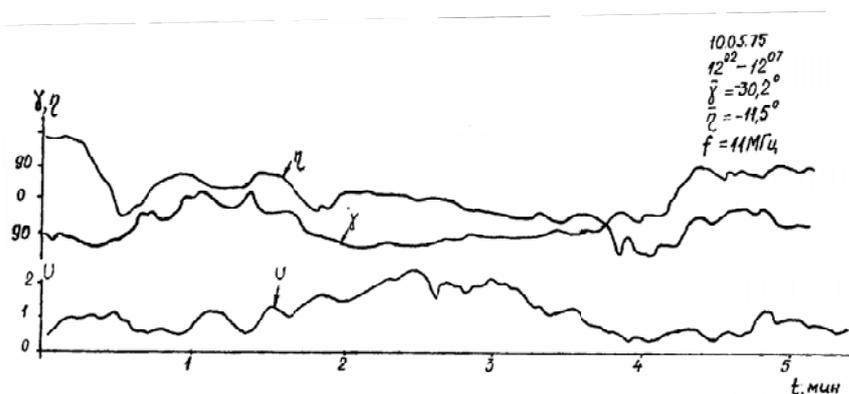


Рис. 5. Зависимости углов ориентации эллипсов поляризации в линейном γ и ортогонально-круговом η базисах от времени

На рисунке 6 отмечается регулярное изменение угла ориентации эллипса поляризации в ортогонально-круговом η_1 базисе. Это фактически эффект Поக்கельса, связанный с регулярным изменением разности фаз между магнитоионными компонентами. В линейном базисе изменения угла ориентации эллипса поляризации небольшие.

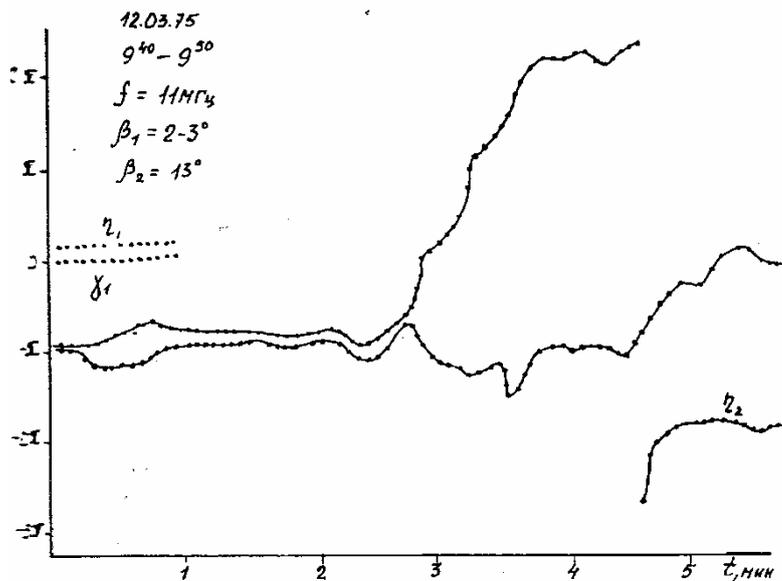


Рис. 6. Регулярное изменение угла ориентации эллипса поляризации в ортогонально-круговом η_1 базисе

На рисунке 7 даны регулярные изменения параметров η_1 и η_2 в зависимости от времени. Параметры γ_1 и γ_2 практически неизменны, что говорит о том, что трассу Тбилиси—Калининград пересекает неоднородность ионосферы, захватывающая области отражения как первого, так и второго лучей. Оба этих луча содержат две магнитоионные компоненты. Эффект Пококельса, связанный с изменением разности фаз между магнитоионными компонентами, проявляется достаточно четко.

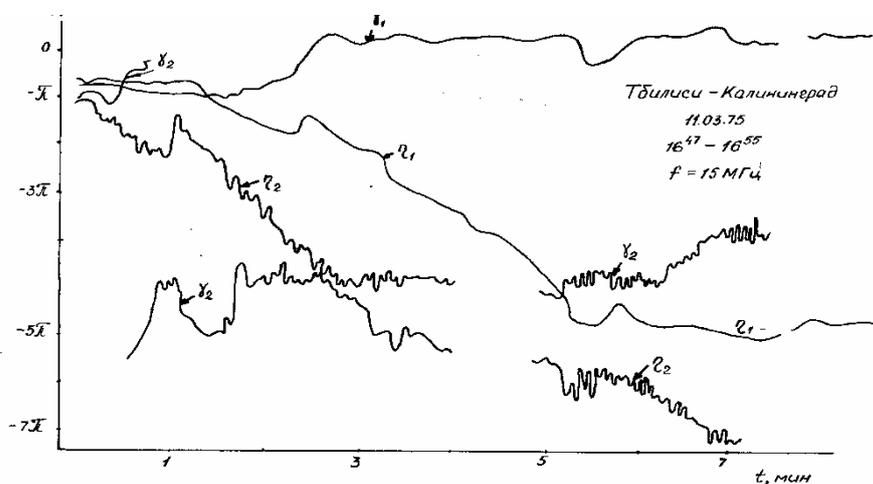


Рис. 7. Регулярные изменения параметров η_1 и η_2 в зависимости от времени

Представлена поляризационная структура выделенных во времени мод сигналов на квазипоперечных трассах. Показан эффект Пококельса, на основе которого возможно создание высокочувствительного метода обнаружения и диагностики неоднородностей в ионосфере.

Список литературы

1. Пахотин В. А. Поляризация радиоволн КВ диапазона на наклонной трассе // Геомагнетизм и аэронавигация. 1977. Т. 17, №4. С. 57.
2. Ляной Б. Е., Пахотин В. А., Сергиенко О. С. Аппаратурный комплекс для исследования характеристик КВ-радиосигналов // Траекторные характеристики коротких радиоволн. М., 1978.

Об авторах

Ирина Владимировна Либерман — канд. физ.-мат. наук, доц., РГУ им. И. Канта, e-mail: airinlib@mail.ru

Алексей Александрович Ржанов — асп., РГУ им. И. Канта.

Сергей Борисович Шаров — асп., РГУ им. И. Канта.

Authors

Dr Irina Liberman — assistant professor, IKSUR, e-mail: airinlib@mail.ru

Aleksey Rzhanov — PhD student, IKSUR.

Sergey Sharov — PhD student, IKSUR.