

И.А. Егошин\*;  
Е.Ю. Зыков\*\*,  
*кандидат физико-математических наук, доцент;*  
А.А. Колчев\*\*,  
*кандидат физико-математических наук, доцент;*  
А.Г. Чернов\*\*\*;  
В.В. Шумаев\*\*\*

\* Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола.

\*\* Казанский федеральный университет, г. Казань.

\*\*\* ООО "СИТКОМ", г. Йошкар-Ола.

## ЭФФЕКТ НЕВЗАИМНОСТИ ПРИ КВАЗИВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Рассмотрена автоматизированная система зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией. Описана схема эксперимента по квазивертикальному зондированию ионосферы. Экспериментально показано, что отсутствует взаимность в характеристиках распространения сигналов при смене направления распространения. Этот эффект объясняется различием в набеге фаз из-за вращения плоскости поляризации. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: модель радиоканала, многолучевость, наклонное зондирование, линейная частотная модуляция.

### ВВЕДЕНИЕ

Воздействие магнитного поля Земли на распространяющуюся в ионосфере электромагнитную волну приводит к тому, что характеристики сигналов, идущих в противоположных направлениях, могут различаться. Эффекты воздействия магнитного поля – магнитоионное расщепление и вращение плоскости поляризации линейно поляризованной волны [1]. Эти эффекты могут менять характеристики сигналов на наклонных радиотрассах при изменении направления излучения (пункты приема и излучения меняются местами).

В последнее время в радиосвязи, радиолокации и радионавигации ДКМ диапазона волн интенсивно внедряются широкополосные электронные радиотехнические системы, использующие сигналы с расширенным спектром (широкополосные системы). Применение широкополосных систем позволяет существенно повысить надежность и помехоустойчивость систем связи, улучшить метрологические характеристики загоризонтных радиолокационных систем с одновременным уменьшением их масс габаритных характеристик и энергопотребления [2]. Перспективными являются ионосферные станции, использующие для диагностики ионосферных радиолиний широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [3, 4].

В данной публикации рассматриваются эффекты невзаимности при распространении сигналов ЛЧМ на квазивертикальных радиолиниях.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И АППАРАТУРА ЗОНДИРОВАНИЯ

Геометрия экспериментальной радиотрассы показана на рис. 1. Излучение и прием сигнала происходил в пунктах г. Йошкар-Ола ( $56^{\circ}37'12''\text{N}$ ,  $47^{\circ}52'12''\text{E}$ ) и г. Казань ( $55^{\circ}48'0''\text{N}$ ,  $49^{\circ}07'12''\text{E}$ ). Азимут радиотрассы Йошкар-Ола – Казань  $\sim 140^{\circ}$ . Расстояние между пунктами излучения и приема 121 км. Середина радиотрассы имеет географические координаты  $56^{\circ}12'42''\text{N}$  и  $48^{\circ}30'6''\text{E}$ . Синяя стрелка на рис. 1 показывает направление горизонтальной со-

ставляющей вектора магнитного поля Земли в указанной точке (азимут  $\sim 14^{\circ}$ ). Угол между радиотрассой Йошкар-Ола – Казань и направлением горизонтальной составляющей магнитного поля составил  $126^{\circ}$ , а между радиотрассой Казань – Йошкар-Ола и направлением магнитного поля –  $56^{\circ}$ . Оба пункта оснащены аппаратурой наклонного зондирования сигналами с ЛЧМ фирмы «SITCOM».

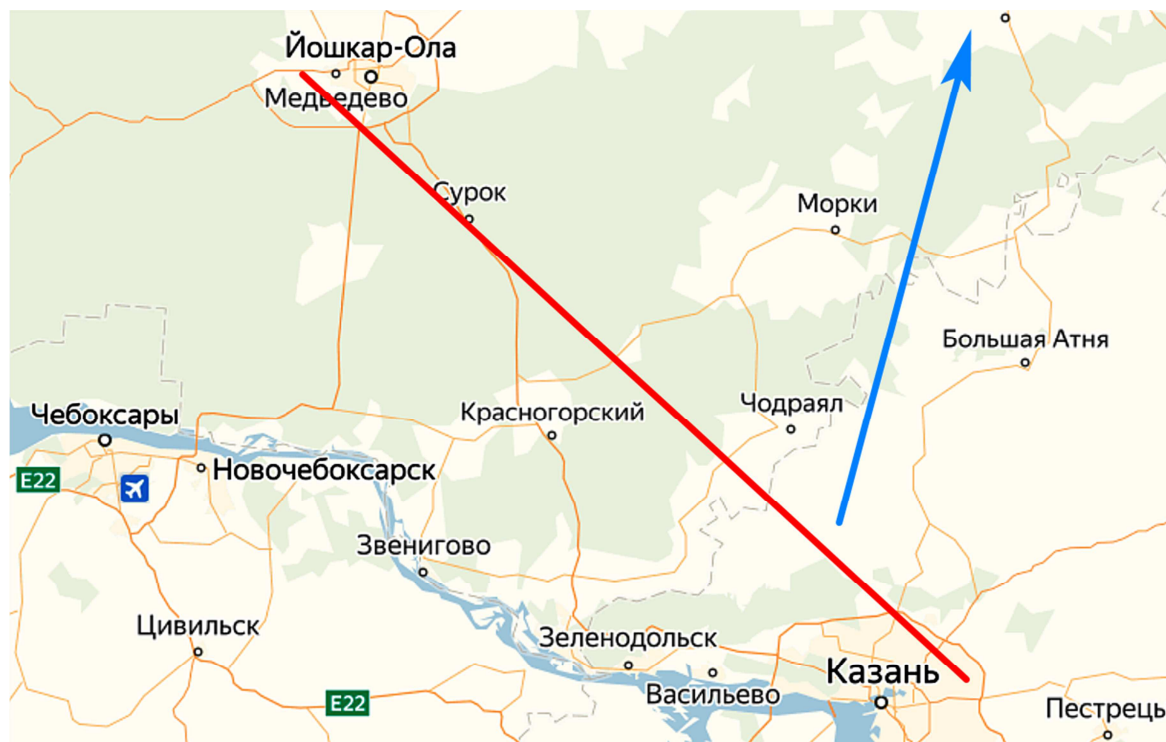


Рис. 1. Схема эксперимента

В настоящее время фирма «SITCOM» изготавливает автоматизированную двухканальную аппаратуру зондирования ионосферы (АЗИ) сигналами с ЛЧМ на базе стандартного КВ радиооборудования фирмы «ICOM» (Япония).

Фотография однопозиционного варианта автоматизированной двухканальной аппаратуры зондирования ионосферы представлена на рис. 2.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент с использованием описанной аппаратуры проходил 27.11.2019 в двухминутном режиме: в четные минуты излучение ЛЧМ сигнала осуществлялось в пункте Казань, а прием – в пункте Йошкар-Ола, в нечетные минуты излучение ЛЧМ сигнала осуществлялось в пункте Йошкар-Ола, а прием – в пункте Казань. Зондирование ионосферы выполнялось в диапазоне частот от 2 до 7 МГц со скоростью перестройки частоты 90 кГц/с. В пункте Йошкар-Ола была антенна типа диполь, а в пункте Казань – антенна типа луч. В каждом пункте излучался и принимался сигнал с линейной поляризацией. Трассы 1 и 2 можно определить как квазивертикальные – происходит наклонное падение волны на слой, но распространение верхним лучем (мода Педерсена) не наблюдается.

На рис. 3,а–д приведены фрагменты ионограмм, содержащие частотные диапазоны с разделенными магнитоионными компонентами, распространявшимися через слой F2.



Рис. 2. Однопозиционный вариант автоматизированного двухканального АЗИ

На рис. 3,а,с показана радиотрасса Йошкар-Ола – Казань (трасса 1) в 8 ч 33 мин и в 8 ч 35 мин, а на рис. 3,б,д – радиотрасса Казань – Йошкар-Ола (трасса 2) в 8 ч 34 мин и в 8 ч 36 мин UTC соответственно. На этих рисунках по горизонтальной оси откладывается частота зондирования в МГц, а по вертикальной – время группового запаздывания в миллисекундах.

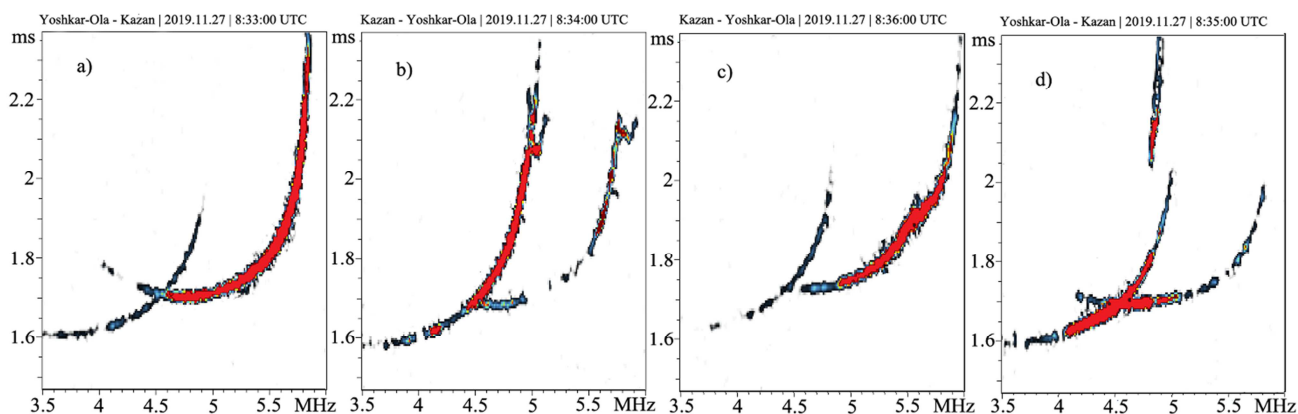


Рис. 3. Фрагменты ионограмм, полученных в эксперименте:  
а, с – радиотрасса Йошкар-Ола – Казань; б, д – радиотрасса Казань – Йошкар-Ола

Из рис. 3 следует, что для радиотрассы 1 на высоких частотах амплитуда  $O$  компоненты  $A_O$  существенно меньше амплитуды  $X$  компоненты  $A_X$ , а для противоположного распространения сигнала (радиотрасса 2) меньше амплитуда  $X$  компоненты:  $A_{O1} < A_{X1}$ ,  $A_{O2} > A_{X2}$ , где  $A_{O1}$ ,  $A_{X1}$  – амплитуды  $O$  и  $X$  компонент на трассе 1 соответственно, а  $A_{O2}$ ,  $A_{X2}$  – амплитуды  $O$  и  $X$

компонент на трассе 2. Кроме того, наблюдается изменение соотношения амплитуд между модами. На рис. 4,а показаны частотные зависимости отношения амплитуд  $O$  компонент  $A_{o_1}/A_{o_2}$  для ионограмм, полученных в 8 ч 33 мин и 8 ч 34 мин (цифра 1), и для ионограмм, полученных в 8 ч 35 мин и 8 ч 36 мин (цифра 2). На рис. 4,б показаны частотные зависимости отношения амплитуд  $X$  компонент  $A_{x_1}/A_{x_2}$  для ионограмм, полученных в 8 ч 33 мин и 8 ч 34 мин (цифра 1), и для ионограмм, полученных в 8 ч 35 мин и 8 ч 36 мин (цифра 2).

Из рис. 4,а следует, что ход частотной зависимости может меняться с убывающей (цифра 1) на возрастающую (цифра 2) зависимость. Так как излучается линейно поляризованная волна, то такие амплитудные вариации можно объяснить вращением плоскости поляризации при распространении электромагнитной волны в ионосфере.

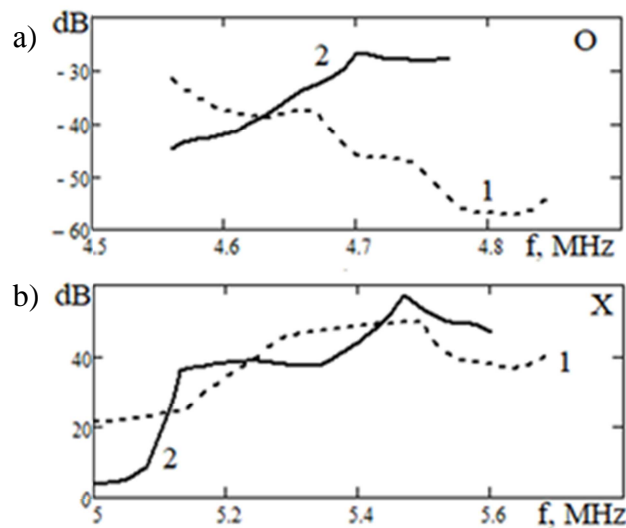


Рис. 4. Зависимости отношения амплитуд

Угол поворота плоскости поляризации волны, излученной передатчиком, находится по формуле

$$\vartheta = \frac{e^3}{2\pi c^2 m^2} \frac{1}{f^2} \int_{L_1}^{L_2} H_L N dl. \quad (1)$$

Здесь  $\vartheta$  – угол поворота плоскости поляризации при прохождении радиоволнами вдоль луча расстояния  $L_2-L_1$  при произвольном направлении распространения радиоволн относительно магнитного поля;

$e, m$  – заряд и масса электрона;

$H_L$  – компонента магнитного поля вдоль направления распространения;

$N$  – электронная концентрация.

В данном эксперименте предполагается постоянство за время зондирования пространственного распределения  $H_L$  и  $N$ . Формула (1) показывает, что при этих предположениях на трассах 1 и 2 должны различаться траектории распространения радиоволн.

Как указано в [1], невзаимность связана с поляризационными свойствами волн и антенн. Изменению амплитуды на рис. 4 соответствуют изменения в угле поворота плоскости поляризации  $\vartheta$ . Используя формулу (1), по этим данным можно оценивать изменения характеристик ионосферной плазмы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В публикации представлена схема эксперимента по исследованию невзаимности при ионосферном распространении радиоволн. Рассматриваются экспериментальные результаты квазивертикального зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ. Показано, что предлагаемая схема исследования имеет высокую чувствительность к вариациям характеристик среды распространения.

### Список используемых источников

1. *Davies K.* (1990) *Ionospheric Radio*. Peter Peregrinus Ltd., London. – URL: <http://dx.doi.org/10.1049/PBEW031E> (дата обращения: 15.04.2020).
2. The DST Group high-fidelity, multichannel oblique incidence ionosonde / J.K. Ayliffe, L.J. Durbridge, G.J. Frazer et al. // *Radio Science*. – 2019. – Vol. 54. – P. 104–114. – URL: <https://doi.org/10.1029/2018RS006681> (дата обращения: 15.04.2020).
3. A Novel Ionospheric Oblique-Incidence Sounding Network Consisting of the Ionospheric Oblique Backscatter Sounder and the Parasitic Oblique-Incidence Sounder IEEE // *Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2015. – October 12(10):1-5. – Doi:10.1109/LJRS.2015.2447524.
4. Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels / V.P. Uryadov, F.I. Vybornov, A.A. Kolchev et al. // *Advances in Space Research*. – 2018. – Vol. 61, № 7. – С. 1837–1849.