

УДК 550.388.2

ЗАГОРИЗОНТНАЯ КВ РАДИОЛОКАЦИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛЧМ ИОНОЗОНДА–РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

В.П. Урядов, Г.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова

Представлены новые результаты изучения среднеширотного F -рассеяния, полученные с помощью широкополосного КВ радара бистатической конфигурации на трассе ЛЧМ зондирования Кипр — Ростов-на-Дону, когда в приемном пункте использовался ионозонд – радиопеленгатор.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЗАГОРИЗОНТНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ, ИОНОСФЕРА, ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию рассеяния в F -области ионосферы посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (см., например, [1–3] и цитируемую там литературу). Явление F -рассеяния – наличие протяженного по задержке и частоте сильно диффузного отраженного сигнала на ионограммах вертикального зондирования (ВЗ) было обнаружено в середине 30-х годов XX века в первых исследованиях ионосферы с помощью ионозондов вертикального зондирования.

Несмотря на значительные достижения в изучении F -рассеяния многие вопросы еще ждут своего решения. Так, нет полной ясности в механизмах образования F -рассеяния. В [3] развивается предположение, что за пространственный тип F -рассеяния (рассеяние по дальности) ответственен механизм не вертикального зеркального отражения от волнообразных среднemasштабных структур типа перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), когда на ионограммах ВЗ образуются дополнительные треки параллельные основному следу, в совокупности формирующих такой тип F -рассеяния. С другой стороны, еще до обнаружения ПИВ, рассматривался механизм рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях, ответственный за явление F -рассеяния.

В этой связи проведение исследований F -рассеяния с помощью новой техники наклонного зондирования с использованием ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора в качестве широкополосного КВ радара, на наш взгляд, представляет интерес для более полного понимания механизмов, ответственных за формирование таких структур, особенно, в среднеширотной ионосфере, где таких исследований очень мало (см., например, [2,3]).

В докладе представлены новые результаты изучения среднеширотного F -рассеяния, полученные с помощью широкополосного КВ радара бистатической конфигурации на трассе ЛЧМ зондирования Кипр – Ростов-на-Дону, когда в приемном пункте использовался ионозонд – радиопеленгатор, позволяющий в реальном времени одновременно измерять ключевые характеристики ионосферного канала (АЧХ, ДЧХ и УЧХ) во всем диапазоне частот прохождения коротких радиоволн [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ

На трассе ЛЧМ зондирования Кипр – Ростов-на-Дону регулярно проводятся круглосуточные наблюдения распространения коротких радиоволн. ЛЧМ передатчик на Кипре работает в диапазоне частот 8–30 МГц, скорость перестройки частоты составляет 100 кГц/с. Прием ЛЧМ сигналов осуществляется в Ростове-на-Дону с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора на антенную решетку, состоящую из 16 вертикальных 9-ти метровых штырей, расположенных на площадке 100×100м, ионограммы снимаются каждые 5 минут.

Во время патрульных наблюдений на этой трассе в течение длительного времени примерно с 21:30 мск 04 января 2012 г. до 06:20 мск 05 января 2012 г. на ионограммах наклонного зондирования регистрировался сильно диффузный рассеянный сигнал РС1 на частотах превышающих максимально наблюдаемую частоту (МНЧ) прямого сигнала. Характерный пример АЧХ, ДЧХ и УЧХ для периода

развитого устойчивого присутствия на ионограммах рассеянного сигнала РС1 (это примерно с 22:00 мск 04.01.2012 г. до 05:30 мск 05.01.2012 г.) показан на рис.1. Согласно результатам измерений характеристик рассеянного сигнала РС1 в период его развитого состояния он имел в среднем

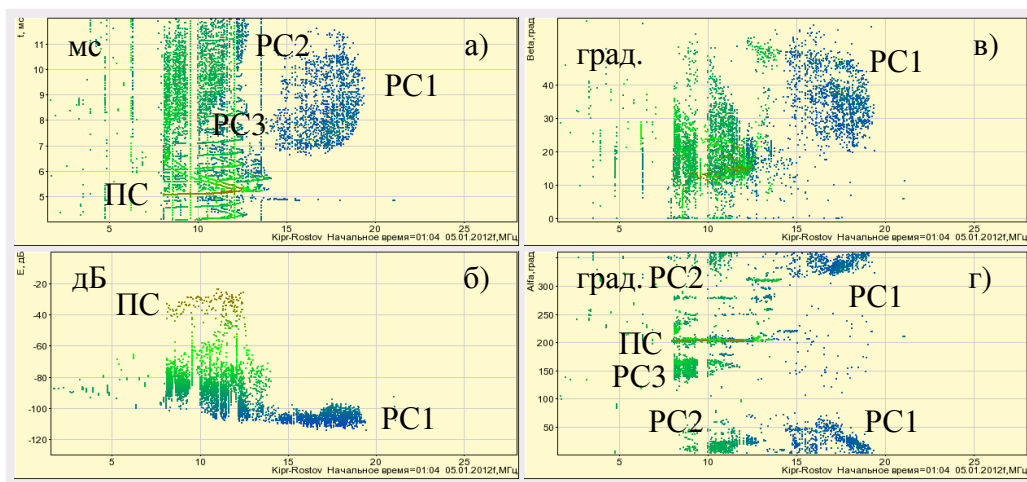


Рис.1. ДЧХ (а), АЧХ (б) и УЧХ (в – угол места, г – азимут) на трассе Кипр – Ростов-на-Дону. 05:04 мск. 05.01.2012 г. ПС – прямой сигнал, РС1-РС3 – рассеянные сигналы. аналогично рис.1 для 05:04 мск. 05.01.2012 г. ПС – прямой сигнал, РС1-РС3 – рассеянные сигналы.

следующие параметры: диапазон задержек ~ 7–11 мс, диапазон частот ~ 14–19 МГц, интервал вертикальных углов прихода ~ 20–45°, интервал азимутальных углов прихода ~ 330–50°, амплитуда сигнала РС1 была на 70–80 дБ меньше амплитуды прямого сигнала. МНЧ рассеянного сигнала РС1 превышала МНЧ прямого сигнала на 2–5 МГц.

Следует отметить, что часто рассеянный сигнал РС1 расслаивался в координатах: частота, задержка, азимут на несколько треков, иногда это расслоение имело вид квазипериодических структур.

Как видно из рис. 1, наряду с сигналом РС1, на ионограммах регистрировались сигналы типа возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ), отмеченные маркерами РС2 и РС3, для которых характерен рост задержки с ростом частоты.

Отметим, что в период наблюдений была спокойная геомагнитная обстановка, магнитный индекс $K_p = 1$.

На основе моделирования с учетом результатов измерений ДЧХ и УЧХ осуществлялось позиционирование областей, ответственных за появление рассеянных сигналов. Результаты нанесены на физическую карту и показаны на рис. 2.

Как видно из сопоставления рис.1 и 2 механизм распространения сигнала РС3 обусловлен рассеянием радиоволн от Иранского нагорья, а сигнала РС2 — рассеянием от Среднерусской и Приволжской возвышенностей. Из рис.2 видно, что зона, ответственная за рассеянный сигнал РС1 занимает протяженную область средних широт, примерно от 50° до 55° N, а по долготе — в интервале значений ~ 35°–48° E.

Важно отметить, что вертикальные углы прихода сигнала РС1 лежат в интервале значений ~ 25–45° (см. рис.1) и с учетом дальности от приемника до этой области ~ 500-800 км можно говорить, что за появляемость рассеянного сигнала РС1 ответственна область среднеширотной верхней ионосферы на высотах ~ 250–500 км. Мы полагаем, что сигнал РС1 обусловлен рассеянием радиоволн от мелко-масштабных ионосферных неоднородностей, расположенных в этой протяженной области возмущения, простирающейся во внешнюю ионосферу выше максимума F-слоя. Поперечные размеры неоднородностей легко оценить из выражения $l_{\perp} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_s / 2}$. В нашем случае, для практически обратного рассеяния, когда $\theta_s \approx \pi$ и $\lambda \sim 16-21$ м, получаем $l_{\perp} \sim 8-10$ м.

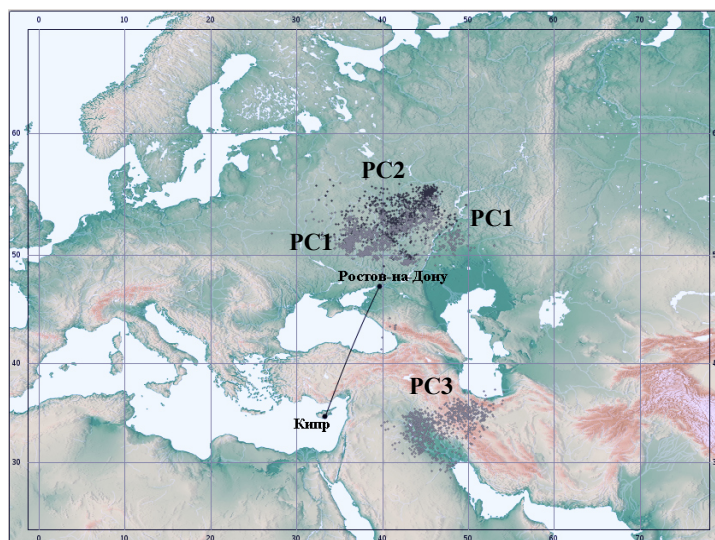


Рис.2. Месторасположение областей, ответственных за рассеянные сигналы PC1 – PC3, для сеанса зондирования 05:04 мск, 05.01.2012 г.

Мы провели моделирование распространения и рассеяния радиоволн на трассе Кипр — область рассеяния — Ростов-на-Дону, предполагая ракурсный характер рассеяния на естественных среднеширотных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях с небольшой степенью вытянутости. Согласно расчетам вся экспериментально наблюдаемая область рассеяния по географическим координатам, задержкам, углам прихода полностью перекрывается результатами моделирования, т.е. пространственно условия выполнения ракурсности значительно шире наблюдаемой области расположения мелкомасштабных естественных неоднородностей (МЕН). Как следствие, наблюдаемая область локализации мелкомасштабных естественных неоднородностей (МЕН) соответствует их реальному географическому расположению, а не обусловлена ракурсным «вырезанием» области рассеяния из общего объема расположения неоднородностей.

Интенсивность неоднородностей, ответственных за рассеяние, можно оценить на основе сравнения экспериментального и расчетного поперечников рассеяния. В борновском приближении мощность рассеянного сигнала можно представить в виде [5]

$$P_s \approx \frac{P_0 G_0 \sigma A_s e^{-\Gamma_s}}{16\pi^2 R_1^2 R_2^2} V_{эфф}, \quad (1)$$

где P_0 — мощность передатчика, G_0 — коэффициент усиления передающей антенны, σ — поперечник рассеяния из единицы рассеивающего объема в единичный телесный угол, A_s — эффективная площадь приемной антенны для рассеянного сигнала, R_1 и R_2 — расстояния от передатчика и приемника до рассеивающего объема, Γ_s — коэффициент поглощения радиоволн на пути распространения радиоволн от передатчика и приемника до рассеивающей области, $V_{эфф}$ — эффективный рассеивающий объем.

Величину $P_0 G_0$ можно оценить по данным измерений мощности прямого сигнала P_d на трассе распространения по дуге большого круга между передатчиком и приемником

$$P_d = \frac{P_0 G_0 A_d e^{-\Gamma_d}}{4\pi R_0^2}, \quad (2)$$

где A_d — эффективная площадь приемной антенны для прямого сигнала, R_0 — расстояние от передатчика до приемника, Γ_d — коэффициент поглощения радиоволн на пути распространения радиоволн от передатчика до приемника.

Из (1) и (2) можно оценить величину σ

$$\sigma = \frac{P_s}{P_d} \frac{A_d}{A_s} e^{\Gamma_s - \Gamma_d} \frac{4\pi R_2^2}{V_{\text{эфф}}} \left(\frac{R_1}{R_o} \right)^2 \quad (3)$$

Таким образом, на основе измерений P_d и P_s , расчетов A_d , Γ_d , A_s , Γ_s и оценки эффективного объема рассеяния для известных значений R_o , R_1 и R_2 можно оценить поперечник рассеяния σ .

Для оценок σ мы полагаем $R_1 \approx 2100$ км, $R_2 \approx 700$ км, $R_o \approx 1400$ км, $\frac{P_s}{P_d} \approx 10^{-8}$, $\frac{A_d}{A_s} \approx 1$, $e^{\Gamma_s - \Gamma_d} \approx 1,2$.

Оценки эффективного рассеивающего объема сделаны на основе измерений интервала задержек занимаемых рассеянным сигналом и интервала вертикальных и азимутальных углов прихода рассеянного сигнала с учетом диаграммы направленности антенной решетки. Согласно оценкам $V_{\text{эфф}} \approx 7 \cdot 10^{15}$ м³.

Тогда из (3) для поперечника рассеяния из единицы рассеивающего объема в единичный телесный угол получаем

$$\sigma \approx 2,3 \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{м}} \quad (4)$$

Для оценки интенсивности неоднородностей мы используем выражение для удельного поперечника рассеяния на анизотропных неоднородностях с гауссовым спектром [6].

$$\sigma = \frac{\omega_o^4}{\omega^4} \left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle \frac{k^4 l_{\perp}^2 l_{\parallel} \sin^2 \chi}{16\sqrt{\pi}} \exp\left\{ -(kl_{\perp})^2 \sin^2 \frac{\theta_s}{2} \right\} \exp\left\{ -(kl_{\parallel})^2 \sin^2 \frac{\theta_s}{2} \psi^2 \right\} \quad (5)$$

Здесь ω_o — плазменная частота, ω — угловая частота, $\left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle$ — средний квадрат флуктуаций электронной концентрации, l_{\perp} и l_{\parallel} — поперечный и продольный масштабы неоднородностей, χ — угол между вектором поля падающей волны \vec{E}_o и волновым вектором рассеянной волны, $k = \frac{\omega}{c}$, θ_s — угол рассеяния, ψ — угол между вектором рассеяния $\vec{K} = \vec{k}_o - \vec{k}_s$ и перпендикуляром к направлению вытянутости неоднородностей.

В нашем случае практически для обратного рассеяния $\theta_s \approx \pi$, $\chi \approx \pi/2$. Мы полагаем, что для широкого спектра углов, засвечивающих обширную область с рассеивающими неоднородностями и квазиизотропных естественных неоднородностей среднеширотной ионосферы с низкой ракурсной чувствительностью ($l_{\parallel}/l_{\perp} \geq 2-4$) [7] можно считать, что с учетом рефракции выполняются условия ракурсного рассеяния, т.е. $\psi \approx 0$. Это же подтверждают результаты моделирования и рассеяния радиоволн на трассе Кипр – область рассеяния – Ростов-на-Дону.

Используя (5) для значений $l_{\perp} \sim 9$ м, $l_{\parallel}/l_{\perp} \approx 3$, $f = \frac{\omega}{2\pi} = 15$ МГц, $f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} \sim 2,8$ МГц получаем

$$\sigma = 3 \cdot 10^{-7} \cdot \left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle \cdot \frac{1}{\text{м}} \quad (6)$$

Сравнивая экспериментальное значение для поперечника рассеяния (4) с расчетным значением (6) получаем $\delta N^2 = \left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle \approx 6,2 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, для наблюдаемого явления F-рассеяния, относительные флуктуации электронной концентрации ионосферных неоднородностей с масштабами

$l_{\perp} \sim 8-10$ м в верхней ионосфере составляют величину $\delta N = \sqrt{\left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle} \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$ что примерно в 3–

5 раз превышает значение δN естественных флуктуаций электронной концентрации для обычных условий в F -области [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты работы:

- на трассе ЛЧМ зондирования Кипр — Ростов-на-Дону в вечерние, ночные и ранние утренние часы в условиях спокойной геомагнитной обстановки наблюдалось явление F -рассеяния на частотах превышающих МНЧ 1F прямого сигнала на 2–5 МГц;
- параметры рассеянного сигнала: диапазон задержек $\sim 7-11$ мс, диапазон частот $\sim 14-19$ МГц, интервал вертикальных углов прихода $\sim 20-45^\circ$, интервал азимутальных углов прихода $\sim 330-50^\circ$, амплитуда рассеянного сигнала была на 70–80 дБ меньше амплитуды прямого сигнала;
- в ряде случаев рассеянный сигнал расслаивался в координатах: частота, задержка, азимут на несколько треков, иногда это расслоение имело вид квазипериодических структур;
- на основе моделирования и сопоставления с экспериментальными данными установлено, что наблюдаемый аномальный сигнал обусловлен обратным рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях с размерами $\sim 8-10$ м, занимавших протяженную область среднеширотной ионосферы ($\sim 50-55^\circ N$, $35-48^\circ E$) на высотах как ниже, так и выше максимума F -слоя ($h \sim 250-500$ км);
- относительные флуктуации электронной концентрации рассеивающих неоднородностей составляют величину $\delta N \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$ что примерно в 3–5 раз превышает значение δN естественных флуктуаций электронной концентрации для обычных условий в F -области.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-00177а.

OVER-THE-HORIZON HF RADIOLOCATION OF SMALL-SCALE IRREGULARITIES OF MIDDLE-LATITUDE IONOSPHERE WITH HELP LFM IONOSONDE-RADIODIRECTION FINDER

V.P. Uryadov, G.G. Vertogradov, E.G. Vertogradova

Research results of spread F in a middle-latitude ionosphere with help of new technologies of oblique sounding with use LFM ionosonde-radiodirection finder are presented.

Measurements were carried out at LFM sounding Cyprus – Rostov-Don path. At this path for long time approximately from 21:30 LT for 04 January 2012 till 06:20 LT for 05 January 2012 at oblique sounding ionograms the strongly spread scattered signal was registered on frequencies exceeding a maximum observed frequency (MOF) of a direct signal.

On the basis of modeling in view of distance-frequency-characteristics and angle-frequency-characteristics measurements results the positioning of areas responsible for scattering signals was carried out.

Vertical angles of arrival scattering signal lay in interval of values $\sim 25-45^\circ$ and in view of range from receiver to this area $\sim 500-800$ km can be spoken that for occurrence of scattering signal the area of a middle-latitude top ionosphere at height $\sim 250-500$ km is responsible. We believe that spread signal is caused by radio waves scattering from small-scale ionospheric irregularities located in this extended area which reaching in external ionosphere above than

maximum of F -layer. The transverse sizes of irregularities are easy to estimate from expression $l_{\perp} = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta_s}{2}}$. In

our case for practically backscatter when $\theta_s \approx \pi$ and $\lambda \sim 16-21$ м, we obtain $l_{\perp} \sim 8-10$ м.

The basic results of work:

- at LFM sounding Cyprus-Rostov-Don path for evening, night and early morning hours of winter and spring month for a quiet geomagnetic conditions the phenomenon of spread F at frequencies exceeding MOF 1F of direct signal to 2-5 MHz was observed;

- parameters of scattering signal: range of delays $\sim 6 \div 7,5 - 8,5 \div 11$ ms, range of frequencies $\sim 10 \div 14 - 13 \div 19$ MHz, interval of vertical angles of arrival $\sim 20-45^\circ$, interval of azimuth angles of arrival $\sim 330-50^\circ$, amplitude of scattering signal was less amplitude of a direct signal at value $\sim 70-80$ dB;
- in some cases the scattering signal was stratified in coordinates: frequency, delay and azimuth on some tracks, sometimes this stratification looked like quasi-periodic structures;
- on the basis of modeling and comparison to experimental data it is established that the observable abnormal signal is caused by backscatter of radio waves on small-scale irregularities with sizes $\sim 8-10$ m occupying extended area of a middle-latitude ionosphere ($\sim 50-55^\circ\text{N}$, $35-48^\circ$) at height both lower and higher maximum of F-layer ($h \sim 250-450$ km);
- relative fluctuations electronic concentration of scatter irregularities make size $\delta N \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$ that approximately in 3–5 times exceeds value δN for natural fluctuation of electronic concentration for usual conditions F-region in a middle-latitude ionosphere.

KEYWORDS: OVER-THE-HORIZON HF RADIOLOCATION, IONOSPHERE, LFM SOUNDING.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ossakow S.L. Spread-F theories//J. Atm. Terr. Phys. 1981, v.43, pp. 437-452.
2. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F- рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984, 141с.
3. Bowman G.G. A review of some recent work on mid-latitude spread-F occurrence as detected by ionosondes //J. Geomag. Geoelectr. 1990, v.42, pp. 109-138.
4. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В. Ионосферный зонд – радиопеленгатор// Патент РФ № 2399062, опубл. 10.09.2010г.
5. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984, 392с.
6. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн - учебник для вузов. М.: ЛЕНАНД, 2009, 496с.
7. Насыров А.М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Изд. Казанского университета. 1991, 150с.