

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ, СВЯЗИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

---

УДК 537.877

PACS number: 94.20.Bb

В. Г. ГАЛУШКО, А. В. ЗАЛИЗОВСКИЙ, С. Б. КАЩЕЕВ,

И. И. ПИКУЛИК, О. В. ЧАРКИНА

Радиоастрономический институт НАН Украины,

ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина

E-mail: galushko@rian.kharkov.ua

---

### ПЕЛЕНГОВАНИЕ ВЧ СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ ИОНОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ, С ПОМОЩЬЮ МАЛОРАЗМЕРНЫХ АНТЕНН

*Предмет и цель работы: Предложена модификация метода фазовой пеленгации с доплеровской фильтрацией, которая позволяет оценивать углы прихода сравнительно широкополосных ВЧ сигналов, рассеянных случайными неоднородностями ионосферной плазмы, с помощью малоразмерных слабонаправленных антенн.*

*Методы и методология: Разработанная методика основана на измерении фаз взаимных спектров зондирующего излучения, регистрируемого минимум в трех пространственно-разнесенных точках.*

*Результаты: С помощью построенного алгоритма проведено исследование угловых и частотно-временных характеристик ВЧ сигналов, распространяющихся на частотах выше максимально применимой для прямой трассы Москва–Харьков. В спектрах принимаемого излучения выделены три семейства пространственных составляющих, обусловленных соответственно рассеянием на плазменных неоднородностях вблизи средней точки радиотрассы, сигналами возвратно-наклонного зондирования и рассеянием пробных сигналов интенсивной плазменной турбулентностью, связанной с авроральными активациями. Показано, что области, ответственные за формирование компонент третьего семейства, расположены на экваториальном склоне максимума потока энергии высыпającychся частиц. Определены скорость и направление дрейфа плазмы полярной ионосферы.*

*Заключение: Полученные данные согласуются с классическими представлениями о магнитосферной конвекции и конвекции плазмы в полярных областях и не противоречат результатам исследования динамики авроральной ионосферы с помощью системы SuperDARN.*

*Ключевые слова:* ионосферная плазма, рассеяние, пеленгация, полярная ионосфера, авроральный овал, скорость и направление дрейфа плазмы

#### 1. Введение

Данные измерения углов прихода пробных ВЧ сигналов широко используются при решении задачи дистанционного зондирования околоземной плазмы [1–10]. Например, современные цифровые ионозонды, такие как система DPS (Digisonde Portable Sounder) разработки Центра атмосферных исследований Массачусетского университета (Лоуэлл, США) [2, 3], позволяют восстанавли-

вать дрейф ионосферной плазмы по результатам угломерных и доплеровских измерений [4]. В работах [5–7] предложен метод частотно-углового зондирования ионосферы, в котором используются частотно-угловые зависимости ВЧ сигналов на однокачковых трассах для восстановления трехмерно-неоднородной структуры ионосферной плазмы. На основании долговременных синхронных измерений углов прихода и доплеровского смещения частоты (ДСЧ) ВЧ сигналов авторами работ [8–10] разработано несколько методов диагностики перемещающихся ионосферных возмущений для разных моделей неоднородностей.

© В. Г. Галушко, А. В. Зализовский, С. Б. Кашеев,  
И. И. Пикублик, О. В. Чаркина, 2016

Одна из основных проблем, возникающих при экспериментальной реализации вышеупомянутых методов, связана с необходимостью прецизионных измерений углов прихода зондирующих сигналов с точностью не хуже  $0.5^\circ$ . Эффективным инструментом решения такой задачи являются фазированные антенные решетки с размерами апертур более километра. Подобные устройства, примером которых может служить радиотелескоп УТР-2 [11], представляют собой сложные и дорогостоящие сооружения. Вполне очевидно, что такие уникальные инструменты не могут быть широко использованы для постоянного мониторинга ионосферы. Традиционные разностно-фазовые методы пеленгации позволяют обеспечить необходимую точность, но только в случае одномодового сигнала и при достаточно большом соотношении сигнал/шум. Однако при ионосферном распространении сигнал в точке приема, как правило, представляет собой суперпозицию нескольких пространственных компонент, в результате чего возникают существенные погрешности измерения углов прихода [12]. Причина состоит в том, что в этом случае результирующий фазовый фронт не является плоским и нормаль к нему может сильно флуктуировать. Поэтому предварительно необходимо обеспечить разделение интерферирующих мод. Одним из методов, позволяющих это сделать, является фазовая пеленгация с доплеровской фильтрацией (ФПДФ) [1] или доплеровская интерферометрия (Doppler interferometry) [13]. Его суть состоит в когерентной регистрации излучения по меньшей мере в трех пространственно-разнесенных точках, разделении пространственных компонент сигнала в спектральной области, благодаря разному ДСЧ и применению алгоритмов разностно-фазовой пеленгации к каждой из парциальных компонент. Такой алгоритм довольно легко реализуется в случае зеркального отражения пробных сигналов, например, с помощью фурье-анализа с достаточно высоким спектральным разрешением порядка  $0.01$  Гц. В то же время он напрямую неприменим для исследования сигналов, рассеянных мелкомасштабными неоднородностями ионосферной плазмы. Дело в том, что в этом случае поле в точке наблюдения формируется большим числом случайных рассеивателей (неоднородностей электронной концентрации) и вы-

делить отдельные пространственные компоненты в его достаточно широком и практически непрерывном спектре не удастся. Вместе с тем возможность оценки углов прихода рассеянных сигналов имеет большое значение для интерпретации результатов исследования ионосферы на частотах выше максимально применимой частоты (МПЧ).

В настоящей работе предложена модификация метода ФПДФ с целью его применения для оценки углов прихода случайных сравнительно широкополосных сигналов, рассеянных неоднородностями ионосферной плазмы. Эффективность разработанного алгоритма иллюстрируется на примере наблюдения рассеяния ВЧ сигналов радиостанции службы точного времени и частоты РВМ авроральными неоднородностями северного полярного овала.

## 2. Методика оценки углов прихода случайных сигналов

Пусть стохастический сигнал некоторого точечного бесконечно удаленного источника регистрируется в трех пространственно-разнесенных точках с координатами  $\{x_i, y_i, 0\}$ , где  $i = 1, 2, 3$  (см. рис. 1). В качестве такого сигнала может быть либо собственное излучение какого-то объекта, либо переизлучение (рассеяние) определенной областью пространства, например, рассеяние ионосферными неоднородностями, локализованными в каком-то пространственном объеме (искусственная ионосферная турбулентность, полярные неоднородности и т. д.).

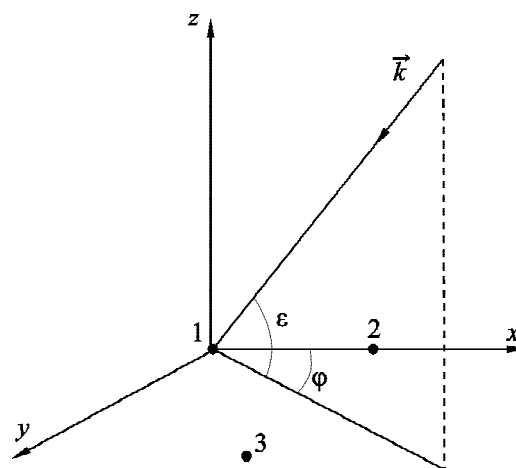


Рис. 1. Геометрия задачи

Поскольку рассматривается точечный источник, сигналы, принимаемые антеннами 1, 2 и 3, есть  $u_1(t)$ ,  $u_2(t) = u_1(t + \tau_{12})$  и  $u_3(t) = u_1(t + \tau_{13})$ , где  $\tau_{ij}$  – задержка, обусловленная разностью хода лучей, приходящих в точки  $i$  и  $j$ . Величина  $\tau_{1i}$  определяется угловыми координатами источника (углами прихода сигнала),

$$\tau_{1i} = \frac{1}{c}(x_i \cos \varepsilon \cos \varphi + y_i \cos \varepsilon \sin \varphi), \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $\varepsilon$  и  $\varphi$  – углы прихода в вертикальной и горизонтальной плоскостях (см. рис. 1).

Если сигналы  $u_i(t)$  стационарны, то взаимные корреляционные функции  $K_{1i}(\tau) = \langle u_1(t)u_i^*(t + \tau) \rangle$  тождественно равны  $K(\tau_{1i} + \tau)$ , где  $K(\tau_{1i} + \tau)$  – автокорреляционная функция сигнала источника. Соответственно, взаимные спектры  $S_{1i}(\omega)$  сигналов  $u_1(t)$  и  $u_i(t)$  равны  $S_{1i}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_{1i} + \tau)e^{-i\omega\tau}d\tau = S(\omega)e^{i\omega\tau_{1i}}$ , где  $S(\omega)$  – энергетический спектр излучаемого сигнала. Видно, что фаза взаимного спектра  $\psi_{1i} = \omega\tau_{1i}$  является линейной функцией частоты. Скорость ее изменения зависит от величины  $\tau_{1i}$ , которая в свою очередь определяется угловым положением источника относительно базы разнеса между антеннами. В случае широкополосных сигналов это обстоятельство может быть использовано для повышения точности вычисления  $\tau_{1i}$  по формуле (1) за счет усреднения по частотам (вписывания линейной функции в измеренную зависимость  $\psi_{1i}(\omega)$ ).

Таким образом, измеряя фазы взаимных спектров сигналов, регистрируемых в трех пространственно-разнесенных точках, мы получаем систему двух уравнений для определения углов прихода излучения шумового источника или видимых угловых координат самого источника:

$$\begin{cases} \psi_{12} = \frac{\omega}{c}x_2 \cos \varepsilon \cos \varphi, \\ \psi_{13} = \frac{\omega}{c}(x_3 \cos \varepsilon \cos \varphi + y_3 \cos \varepsilon \sin \varphi). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь учтено, что  $y_2 = 0$  (см. рис. 1).

Легко показать, что решение системы (2) имеет вид

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_2 \psi_{13} - x_3 \psi_{12}}{y_3 \psi_{12}}, \quad (3)$$

$$\cos \varepsilon = \frac{\omega \psi_{12}}{c x_2 \cos \varphi} \quad \text{или} \quad \cos \varepsilon = \frac{\omega \psi_{13}}{c(x_3 \cos \varphi + y_3 \sin \varphi)}.$$

Таким образом, регистрируя излучение в трех пространственно-разнесенных точках с помощью малоразмерных антенн, можно оценить углы прихода шумового сигнала, излучаемого точечным бесконечно удаленным источником, (или видимые угловые координаты источника). Заметим, что такой подход значительно проще реализуется на практике, чем непосредственные измерения временных задержек  $\tau_{ij}$ . Действительно, пусть  $\varphi = 0$ , длина волны  $\lambda = 2\pi c/\omega = 30$  м (частота излучения  $f = \omega/(2\pi) = 10$  МГц) и  $x_2 = 15$  м. Тогда из первого выражения системы (2) следует, что при изменении  $\varepsilon$  от  $90^\circ$  до  $0^\circ$  фаза  $\psi_{12}$  меняется от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , в то время как  $\tau_{12}$  – от 0 до 50 нс. Следовательно, если нужно иметь, например, 10 отсчетов в диапазоне  $\varepsilon \in [0^\circ \dots 90^\circ]$ , то  $\tau_{12}$  необходимо измерять с точностью приблизительно 5 нс, что невозможно реализовать на практике, особенно с использованием взаимных корреляционных функций. В то же время  $\psi_{12}$  достаточно оценивать с точностью примерно  $18^\circ$ , что вполне достижимо даже при не очень больших соотношениях сигнал/помеха.

Из (2) и (3) следует, что точность оценки углов прихода  $\varepsilon$  и  $\varphi$  определяется, как и следовало ожидать, пространственным разнесом между антеннами и погрешностью измерения фаз  $\psi_{1i}$ . Для однозначного измерения  $\psi_{1i}$  в случае узкополосных сигналов база антенн не должна превышать половину длины волны регистрируемого излучения  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , т. е. должно выполняться соотношение  $x_2, y_2, x_3, y_3 < \lambda/2$ . В то же время для широкополосных сигналов выполнение последнего условия не обязательно, т. к.  $\tau_{1i} = d\psi_{1i}/d\omega$  и возможная неоднозначность  $2\pi n$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ , исключается при дифференцировании.

Заметим также, что для корректной работы данного алгоритма при наличии нескольких источников излучения необходимо использовать частотные интервалы, соответствующие непеп-

рекрывающимся участкам их энергетических спектров. В противном случае могут возникать существенные ошибки определения углов прихода, связанные с интерференционными эффектами, как и в обычных разностно-фазовых пеленгационных системах [1].

Может показаться, что при практической реализации рассмотренного алгоритма возникают определенные сложности, поскольку источник излучения/переизлучения (рассеяния) не всегда можно рассматривать как точечный и бесконечно удаленный. Например, при ионосферном распространении на частотах выше МПЧ рассеяние может происходить не обязательно на пространственно-локализованных неоднородностях ионосферной плазмы, кроме того, размеры рассеивающей области могут быть довольно большими. Однако это не совсем так. Например, результаты работы [14], полученные в рамках теории однократного рассеяния, свидетельствуют, что при небольших удалениях от рассеивающего объема ( $r \leq L$ , где  $r$  – расстояние до области рассеяния, а  $L$  – ее характерный размер) радиус корреляции поля  $l_u$  порядка длины волны  $\lambda$  в случае мелких неоднородностей диэлектрической проницаемости  $l_\varepsilon$  ( $l_\varepsilon \ll \lambda$ ) и порядка  $l_\varepsilon$  в обратном случае. Оба утверждения вытекают из оценки (теорема Ван Циттерга–Цернике)

$$l_u \sim \lambda/\gamma,$$

где  $\gamma$  – видимый угловой размер области, занятой источниками (неоднородностями).

Поэтому при разносе между антеннами меньше  $\lambda$  взаимная корреляционная функция будет значимой. Конечно, углы прихода, а следовательно, и угловые координаты источника в этом случае будут определяться с довольно большой погрешностью. Но это обстоятельство не является критическим, т. к. в данной ситуации видимые угловые размеры источника не менее  $\pm 28^\circ$  и любое направление внутри этого сектора будет соответствовать координатам источника.

С увеличением  $r$  происходит некоторое упорядочение рассеянного поля, что выражается в возрастании масштабов пространственной корреляции. Так, при  $r \gg L$  угловой размер  $\gamma$  рассеивающего объема становится порядка  $L/r \ll 1$ , и, следовательно, поперечный по отношению к направлению рассеяния радиус корреляции  $l_\perp$

превышает длину волны в  $r/L$  раз, т. е.  $l_\perp \sim \lambda r/L$ . При приближении к началу фраунгоферовой зоны,  $r \sim kL^2$ , поперечный радиус корреляции увеличивается до размеров рассеивающего объема,  $l_\perp \sim L$ , а при  $r \gg kL^2$  превышает его.

Что касается продольного радиуса корреляции  $l_\parallel$ , то в пределах ближней зоны рассеивающего объема ( $r \ll kL^2$ ) он равен  $l_\parallel \sim \lambda/\gamma^2 \sim \lambda r^2/L^2$ , а начиная с расстояний  $r \approx kL^2$ , корреляция простирается до бесконечности,  $l_\parallel = \infty$ .

Таким образом, пространственная корреляция рассеянного поля определяется только длиной волны излучения  $\lambda$  и геометрическими параметрами задачи  $r$  и  $L$ , но не зависит от статистических характеристик флуктуаций диэлектрической проницаемости. Следовательно, использование баз антенн меньше  $\lambda$  обеспечивает достаточную для физической интерпретации точность измерения видимых угловых координат источника случайного излучения. Напомним, что при наличии нескольких областей рассеяния корректное определение углов прихода радиоволн, рассеянных каждой из них, возможно при условии разрешения семейств сигналов в спектральной области. В противном случае оценка будет соответствовать некоторому средневзвешенному направлению прихода излучения.

### 3. Экспериментальные исследования

Предложенный алгоритм был применен в ходе специальной измерительной кампании по исследованию угловых и частотно-временных параметров ВЧ сигналов, распространяющихся на частотах выше МПЧ на прямой трассе, с целью идентификации рассеяния от ионосферных неоднородностей северного аврорального овала. В качестве источника пробных сигналов использовалась радиостанция службы точного времени и частоты РВМ ( $55.75^\circ$  с. ш.,  $37.64^\circ$  в. д.), которая круглосуточно излучает когерентные сигналы одновременно на трех несущих частотах 4996, 9996 и 14996 кГц. На всех частотах передатчики работают либо в непрерывном режиме, либо в одном из двух типов импульсного режима. В первом из них излучаются импульсы с частотой повторения 1 Гц при длительности 100 мс, а во втором частота повторения составляет 10 Гц, длительность импульса – 20 мс. Все режимы излучения как непрерывных, так и импульсных сигналов син-

хронизированы с мировым временем (UT) и циклически переключаются каждые полчаса.

Наблюдения проводились в Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде (РАО) Радиоастрономического института НАН Украины в Харьковской области ( $49.67^\circ$  с. ш.,  $36.83^\circ$  в. д.). Длина прямой трассы РВМ–РАО составляет 678 км. Измерения проводились с помощью 3-канального когерентного приемного комплекса, построенного на базе стандартного связного устройства. Для повышения стабильности приемного тракта гетеродины всех каналов синхронизировались сигналом с частотой 5 МГц от рубидиевого стандарта частоты с относительной нестабильностью порядка  $10^{-11}$ . В качестве трех приемных антенн использовались малоразмерные вертикальные штыри, расположенные в вершинах треугольника со сторонами 15, 18 и 23.5 м. Сигналы с антенн поступали на приемники, оцифровывались на промежуточной частоте с помощью многоканального быстродействующего АЦП и далее обрабатывались цифровым способом. Частота дискретизации составляла  $f_d \approx 2$  кГц. Фазовые соотношения между каналами периодически измерялись с помощью калибровочных сигналов и учитывались при вычислении фаз взаимных спектров сигналов  $\psi_{1i}$ , которые затем использовались для оценки углов прихода в соответствии с выражением (3). Взаимные спектры вычислялись по единичным реализациям длительностью 8.2 с и с последующим усреднением по минутным интервалам, т. е. усреднялось 7 реализаций. В качестве критерия наличия полезного сигнала на данной частоте использовалось условие превышения соответствующей спектральной плотности уровня шума более чем на 30 дБ.

Кроме углов прихода пробных сигналов, приемный комплекс позволял также оценивать время группового запаздывания  $\tau_d$  различных спектральных мод зондирующих сигналов во время импульсного режима работы станции РВМ, которое пересчитывалось в групповой путь  $L_g$  по формуле  $L_g = c\tau_d$ . Для этого была реализована частотно-временная обработка сигналов, которая подробно описана в работе [15]. Здесь отметим только, что полоса приемника составляла 1 кГц, что с учетом частоты оцифровки порядка 2 кГц обеспечивало пространственное разрешение около 150 км.

В качестве примера на рис. 2 показана спектрограмма сигнала станции РВМ частотой 9996 кГц, принятого в РАО 18.04.2012 г. в интервале 01:00–01:08 UT. Спектральная плотность приведена в оттенках серого (см. шкалу справа). Как видно из представленных данных, спектр принятого излучения был достаточно широким и занимал полосу частот примерно  $\pm 10$  Гц. Такой характер спектра свидетельствует о том, что поле в точке приема формировалось за счет рассеяния пробных радиоволн на случайных неоднородностях электронной концентрации. На следующем этапе принятые сигналы обрабатывались с помощью предложенного выше алгоритма определения углов прихода. Результаты обработки сигнала, спектрограмма которого приведена на рис. 2, показаны на рис. 3 в координатах зенитный угол – азимут. Зенитный угол, равный  $90^\circ - \varepsilon$ , отсчитывается по радиусу от центра окружности, а азимут – по часовой стрелке от направления на север ( $0^\circ$ ). Серые кружочки соответствуют угловым координатам направлений прихода пробного излучения, рассеянного ионосферными неоднородностями. ДСЧ (частота спектра) пробных сигналов приведено в оттенках серого (см. шкалу справа).

Как видно, спектральные составляющие со значительным ДСЧ приходят с северного направления ( $\varphi = \pm 25^\circ$ ) под достаточно низкими углами места ( $\varepsilon \leq 30^\circ$ ). Следует отметить, что азимутальные углы прихода компонент с большими отрицательными ДСЧ вплоть до  $-10$  Гц соответствуют северо-восточному направлению, а сиг-

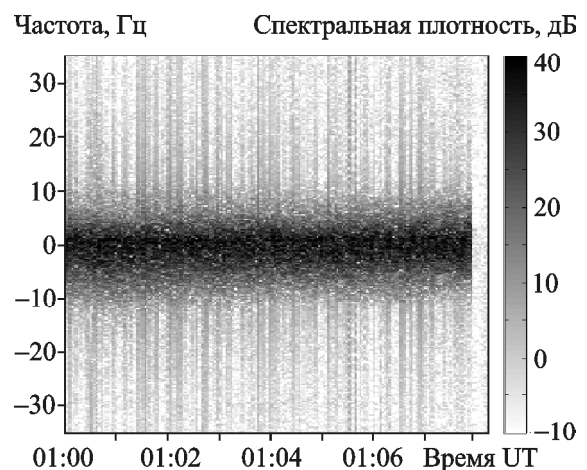


Рис. 2. Спектрограмма сигнала станции РВМ частотой 9996 кГц, принятого в РАО 18.04.2012 г. в интервале 01:00:00–01:08:20 UT

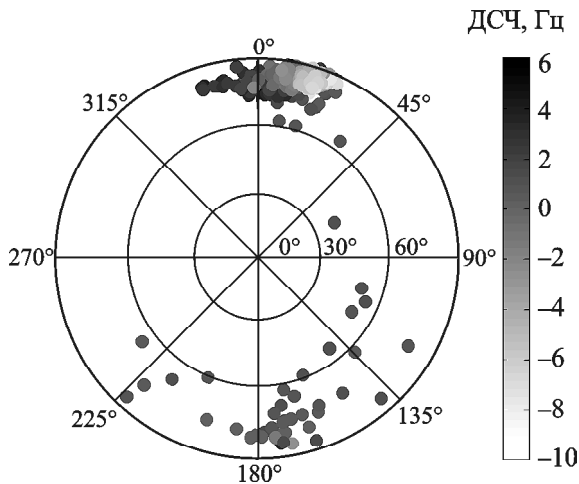


Рис. 3. Направления прихода спектральных компонент пробного излучения в координатах зенитный угол – азимут. Доплеровская частота сигнала указана в оттенках серого (см. шкалу справа)

налы с положительными ДСЧ около +3 Гц – северо-западному сектору. Наблюдаются также пространственные моды с ДСЧ, близкими к нулю, для которых нельзя выделить преимущественное направление прихода как по углу места, так и по азимуту.

С целью определения местоположения областей, формирующих рассеянное излучение, данные измерений были подвергнуты частотно-временной обработке в соответствии с алгоритмом, изложенным в работе [15]. Это позволило оценить групповые пути распространения различных спектральных компонент сигнала во время импульсного режима работы станции РВМ и, в комбинации с измерениями углов прихода, локализовать области, ответственные за рассеяние пробных сигналов ионосферными неоднородностями. Результаты такой обработки, полученные 18.04.2012 г. для интервала времени 00:50:00–00:59:55 UT, представлены на рис. 4.

Анализ этих данных позволяет выделить три семейства спектральных составляющих зондирующего сигнала, которые обозначены на рисунке цифрами 1, 2 и 3. Первое из них характеризуется довольно низкой интенсивностью и узкой спектральной полосой вблизи нулевых доплеровских частот. Характерный групповой путь соответствующих пространственных компонент составляет около 1000 км и незначительно флуктуирует во времени (см. рис. 5). Это позволяет

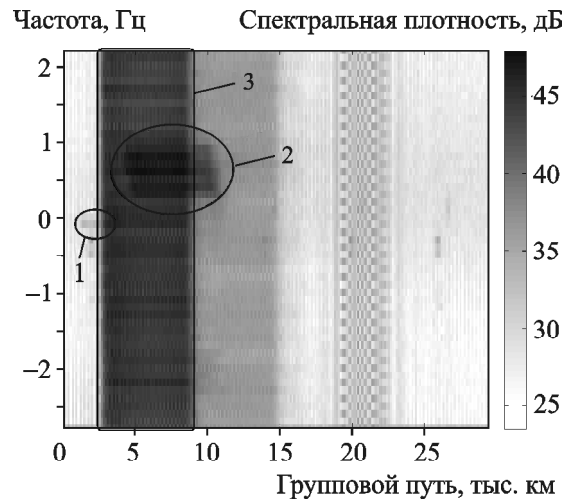


Рис. 4. Спектральная плотность сигнала станции РВМ частотой 9996 кГц в координатах частота–дальность (групповой путь), полученная по данным измерений 18.04.2012 г. для интервала времени 00:50:00–00:59:55 UT

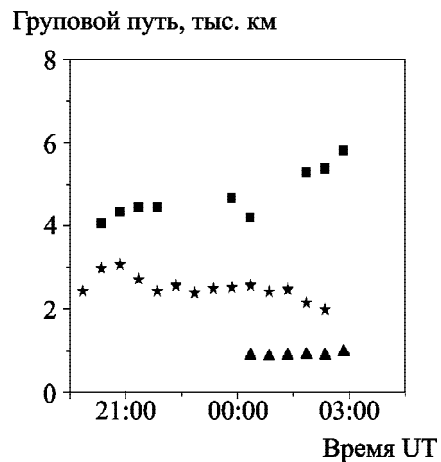


Рис. 5. Временные зависимости группового пути семейств 1 (треугольники), 2 (квадратики) и 3 (звездочки) спектральных компонент сигнала станции РВМ частотой 9996 кГц для ночного интервала времени 17–18.04.2012 г.

предположить, что данное семейство связано с рассеянием пробных сигналов ионосферными неоднородностями вблизи средней точки прямой трассы РВМ–РАО.

Второе семейство состоит из более интенсивных компонент, которые также сосредоточены в достаточно узкой полосе (менее 1 Гц), но в окрестности доплеровской частоты порядка 0.5 Гц. Оценка группового пути этих составляющих дает значения немногим более 4000 км в начале сеанса наблюдения и почти 6000 км в конце (см. рис. 5).

Анализ угломерных данных показывает отсутствие выделенного направления прихода соответствующих пространственных волн как по азимуту, так и по углу места. Учитывая такие характеристики спектральных компонент данного семейства, можно сказать, что, скорее всего, они связаны с обратным рассеянием ионосферных сигналов от поверхности земли, т. е. это так называемые сигналы возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ).

Третье семейство спектральных компонент занимает достаточно широкую полосу частот (до 10 Гц). Их интенсивность примерно равна интенсивности составляющих второго семейства, а групповой путь лежит в пределах  $2000 \div 2500$  км (см. рис. 5). Углы прихода рассматриваемых пространственных компонент соответствуют северному направлению и низким углам места. Такие значения группового пути и ширины спектральной полосы около 10 Гц, характерной для рассеянного сигнала, а также северное направление прихода и низкие углы места позволяют предположить, что эти компоненты обусловлены ракурсным рассеянием пробного излучения плазменными неоднородностями авроральной ионосферы. Действительно, такая ситуация может реализовываться в случае расположения рассеивающей области на расстоянии примерно 850 км к северу от станции РВМ. Это соответствует приблизительно  $63.5^\circ$  с. ш., где вполне могла располагаться экваториальная граница северного полярного овала при средней геомагнитной активности. Следует отметить, что ночью 17–18.04.2012 г. наблюдалось умеренное магнитное возмущение. Значение индекса магнитной активности  $am$  в первый трехчасовой интервал 18.04.2012 г. составляло 32, а  $Kp$ -индекс был равен 3о (информация взята с сайта Международной службы геомагнитных индексов, International Service of Geomagnetic Indices, URL: <http://isgi.unistra.fr/>). Для проверки этой гипотезы был проведен совместный анализ данных измерений углов прихода и частотно-временной обработки спектральных компонент третьего семейства, что позволило восстановить координаты областей, ответственных за их рассеяние. Результаты такого анализа для интервала времени 01:01–01:02 UT 18.04.2012 г. представлены на рис. 6 черными точками. Тонкие стрелки соответствуют скорости движения неоднородностей  $\vec{V}_{r_i}$  вдоль вектора

рассеяния для  $i$ -й точки. На карту нанесено также распределение потока энергии высыпавшихся частиц  $Je$  (в ваттах) в области северного аврорального овала, полученное с помощью ресурса лаборатории прикладной физики университета Джона Хопкинса, США (URL: <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/>). Градации серого характеризуют значения  $\log Je$ , восстановленные по данным спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program – спутниковая программа метеорологической защиты). Видно, что рассеивающие неоднородности, обсуждаемые в настоящей работе, располагаются на широтах, соответствующих экваториальному склону области максимума потока энергии высыпавшихся частиц.

Анализ распределения  $\vec{V}_{r_i}$  позволяет предположить, что ионосферные неоднородности вблизи утреннего сектора перемещались в восточном направлении, что в целом соответствует классической картине магнитосферной конвекции и конвекции плазмы в полярных областях [16]. Заметим, что при наличии достаточно большого количества векторов  $\vec{V}_{r_i}$  можно оценить скорость  $V$  и направление  $\beta$  дрейфа плазмы в предположении, что  $\vec{V}$  остается постоянной в пределах анализируемой области. Действительно, ДСЧ  $F_{di}$  пространственной компоненты сигнала, рассеянной в точке  $i$ , можно представить в виде

$$F_{di} = -\frac{2f}{c} [V_x \sin \alpha_{r_i} + V_y \cos \alpha_{r_i}], \quad (4)$$

где  $V_x$  и  $V_y$  – проекции скорости движения неоднородностей в декартовой системе координат,  $\alpha_{r_i}$  – угол ориентации вектора рассеяния.

Пусть имеется  $N$  оценок  $\hat{F}_{di}$ , полученных для разных значений  $\alpha_{r_i}$ . Воспользовавшись методом наименьших квадратов, минимизируем величину

$$\sum_{i=1}^N (\hat{F}_{di} - F_{di})^2 = |\delta F_d|^2.$$

Для этого надо решить следующую систему двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial V_x} |\delta F_d|^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial V_y} |\delta F_d|^2 = 0, \end{cases}$$

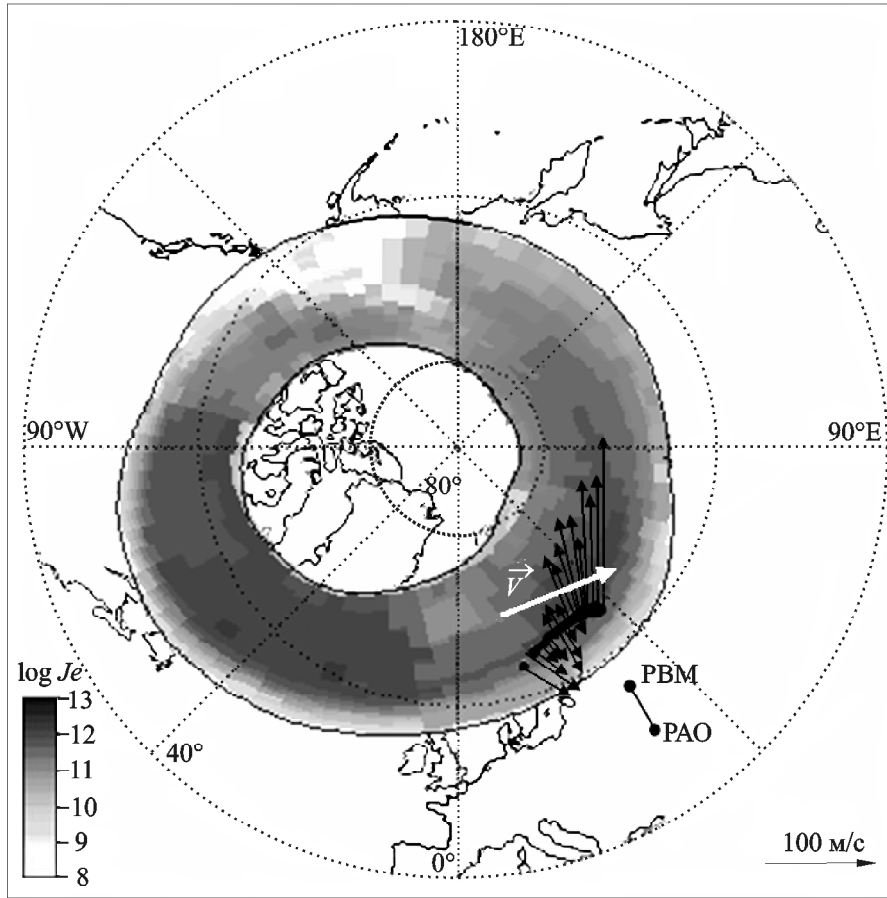


Рис. 6. Расположение северного аврального овала и областей рассеяния спектральных компонент третьего семейства (точки) для интервала времени 01:01–01:02 UT 18.04.2012 г.

которую после несложных преобразований с учетом (4) можно записать в виде

$$\begin{cases} V_x \sum_{i=1}^N \sin^2 \alpha_{r_i} + V_y \sum_{i=1}^N \sin \alpha_{r_i} \cos \alpha_{r_i} = \\ = -\frac{c}{2f} \sum_{i=1}^N \hat{F}_{di} \sin \alpha_{r_i}, \\ V_x \sum_{i=1}^N \sin \alpha_{r_i} \cos \alpha_{r_i} + V_y \sum_{i=1}^N \cos^2 \alpha_{r_i} = \\ = -\frac{c}{2f} \sum_{i=1}^N \hat{F}_{di} \cos \alpha_{r_i}. \end{cases}$$

Таким образом, обозначив  $a_{11} = \sum_{i=1}^N \sin^2 \alpha_{r_i}$ ,  $a_{12} = a_{21} = \sum_{i=1}^N \sin \alpha_{r_i} \cos \alpha_{r_i}$ ,  $a_{22} = \sum_{i=1}^N \cos^2 \alpha_{r_i}$ ,

$b_1 = -\frac{c}{2f} \sum_{i=1}^N \hat{F}_{di} \sin \alpha_{r_i}$  и  $b_2 = -\frac{c}{2f} \sum_{i=1}^N \hat{F}_{di} \cos \alpha_{r_i}$ , получим следующие выражения для оценки  $V_x$  и  $V_y$  методом наименьших квадратов:

$$\begin{cases} V_x = \frac{a_{22}b_1 - a_{12}b_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}, \\ V_y = \frac{a_{11}b_2 - a_{12}b_1}{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}. \end{cases} \quad (5)$$

Применение формулы (5) ко всей совокупности данных, представленных на рис. 6, позволило оценить скорость и направление дрейфа плазмы, которые составили  $V \approx 136$  м/с и  $\beta \approx 93^\circ$ . Полученные оценки отображены на рис. 6 белой стрелкой, длина и ориентация которой соответствуют  $V$  и  $\beta$  (масштаб скорости показан в правом нижнем углу). Таким образом, действительно ионосфер-



ные неоднородности вблизи утреннего сектора перемещались в восточном направлении. Заметим также, что полученная оценка скорости дрейфа плазмы не противоречит результатам исследования динамики авроральной ионосферы, например, с помощью системы SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) [17, 18].

Следует отметить, что в качестве меры невязки оценок скорости и направления дрейфа плазмы использовалась величина  $\sigma_{V_r}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{r_i} - \hat{V}_{r_i})^2$ , где  $\hat{V}_{r_i} = V \cos(\beta - \alpha_{r_i})$ . Для рассматриваемого сеанса измерений значение  $\sigma_{V_r}$  составило примерно 31 м/с, что, на наш взгляд, вполне удовлетворительно. При этом напомним, что оценки  $V$  и  $\beta$  получены в приближении плоской Земли и пространственной однородности скорости движения плазмы. Возможно, при проведении целенаправленных исследований динамики полярной ионосферы следует разбивать весь сектор наблюдаемых значений  $\alpha_{r_i}$  на несколько и определять  $V$  и  $\beta$  для каждого из них. На наш взгляд, это позволит уменьшить погрешность, связанную с вышеуказанными предположениями.

#### 4. Выводы

Предложена модификация метода ФПДФ, которая позволяет оценивать углы прихода сравнительно широкополосных ВЧ сигналов, рассеянных случайными неоднородностями ионосферной плазмы, с помощью малоразмерных слабонаправленных антенн. Разработанная методика основана на измерении фаз взаимных спектров зондирующего излучения, регистрируемого минимум в трех пространственно-разнесенных точках. Показано, что использование разноса между антеннами немного меньше длины волны пробного излучения обеспечивает достаточную для физической интерпретации точность измерения видимых угловых координат источника случайного излучения. При наличии нескольких областей рассеяния корректное определение углов прихода радиоволн, рассеянных каждой из них, возможно при условии разрешения семейств сигналов в спектральной области. В противном случае оценка будет соответствовать некоторому средневзвешенному направлению прихода излучения.

С помощью разработанного алгоритма проведено исследование угловых и частотно-времен-

ных характеристик ВЧ сигналов, распространяющихся на частотах выше МПЧ для прямой радиотрассы РВМ–РАО. В спектрах принимаемого излучения выделены три семейства пространственных составляющих. Первое из них обусловлено рассеянием неоднородностями электронной концентрации вблизи средней точки прямой радиотрассы, второе формируется сигналами ВНЗ, а третье представлено рассеянием зондирующих сигналов интенсивной плазменной турбулентностью, связанной с авроральными активациями. Показано, что области, ответственные за формирование компонент третьего семейства, расположены на экваториальном склоне максимума потока энергии высыпаящихся частиц. Определены скорость и направление дрейфа плазмы полярной ионосферы. Полученные данные согласуются с классическими представлениями о магнитосферной конвекции и конвекции плазмы в полярных областях и не противоречат результатам исследования динамики авроральной ионосферы с помощью системы SuperDARN.

Таким образом, предложенная методика может использоваться как самостоятельно для идентификации областей рассеяния ВЧ сигналов на частотах выше МПЧ, так и, например, в комбинации с системой SuperDARN при исследовании динамики полярной ионосферы, что позволит расширить объем получаемой информации и повысить достоверность данных диагностики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НИР “Шпицберген” и “Лирус-2”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афраймович Э. Л.* Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
2. *Reinisch B. W.* Modern Ionosondes / Modern Ionosphere Science / H. Kohl, R. Rüster, K. Schlegel, eds. – Kasselburg-Lindau: European Geophysical Society, 1996. – P. 440–458.
3. *Reinisch B. W. and Galkin I. A.* A new digisonde for research and monitoring applications // XXIX GA URSI, August 7-16, 2008: Abstracts. – Chicago, Illinois, USA. – 2008. – P. 131.
4. *Reinisch B. W., Scali J. L., and Haines D. M.* Ionospheric drift measurements with ionosondes // Ann. Geophys. – 1998. – Vol. 41, No. 5-6. – P. 695–702. DOI: 10.4401/ag-3812
5. *Galushko V. G.* Frequency-and-angular sounding of the ionosphere // Telecommunications and radio engineering. – 1997. – Vol. 51, No. 6-7. – P. 1–6. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v51.i6-7.10
6. *Galushko V. G., Yampolski Y. M., and Reinisch B. W.* Frequency-and-Angular Sounding of the Ionosphere with the

- Use of a DPS Receive System // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2000), July 5-14, 2000: Proceedings. – Cambridge, MA, USA. – 2000. – P. 603.
7. Галушко В. Г., Литвиненко Г. В. Восстановление трехмерно-неоднородной структуры электронной концентрации ионосферы методом частотно-углового зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, № 3. – С. 222–229.
  8. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Y. M., Paznukhov V. V., Reinisch B. W., Foster J. C., and Erickson P. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs // Radio Sci. – 2003. – Vol. 38, Is. 6. – id. 1102. DOI: 10.1029/2002RS002861
  9. Paznukhov V. V., Galushko V. G., and Reinisch B. W. Digisonde observations of TIDs with frequency and angular sounding technique // Adv. Space Res. – 2012. – Vol. 49, No. 4. – P. 700–710. DOI: 10.1016/j.asr.2011.11.012
  10. Galushko V. G., Kascheev A. S., Paznukhov V. V., Yampolski Yu. M., and Reinisch B. W. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional density waves // Radio Sci. – 2008. – Vol. 43, Is. 4. – id. RS4013. DOI: 10.1029/2007RS003735
  11. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 3–15.
  12. Gething P. J. Radio direction-finding and the resolution of multicomponent wave-fields. – Stevenage, England: Peter Peregrinus, 1978. – 329 p.
  13. Bibl K. and Reinisch B. W. The Universal digital ionosonde // Radio Sci. – 1978. – Vol. 13, Is. 3. – P. 519–530. DOI: 10.1029/RS013i003p00519
  14. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2: Случайные поля. – М.: Наука, 1978. – 463 с.
  15. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Содин А. А., Пикублик И. И. О возможности бистатического ВЧ зондирования ионосферы сигналами точного времени // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 34–42.
  16. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
  17. Jayachandran P. T., MacDougall J. W., St-Maurice J.-P., Moorcroft D. R., Newell P. T., and Prikryl P. Coincidence of the ion precipitation boundary with the HF E region backscatter boundary in the dusk-midnight sector of the auroral oval // Geophys. Res. Lett. – 2002. – Vol. 29, Is. 8. – P. 97-1–97-4. DOI: 10.1029/2001GL014184
  18. Jayachandran P. T., Donovan E. F., MacDougall J. W., Moorcroft D. R., St-Maurice J.-P., and Prikryl P. SuperDARN E-region backscatter boundary in the dusk-midnight sector – tracer of equatorward boundary of the auroral oval // Ann. Geophys. – 2002. – Vol. 20. – P. 1899–1904. DOI: 10.5194/angeo-20-1899-2002
  3. REINISCH, B. W. and GALKIN, I. A., 2008. A new digisonde for research and monitoring applications. In: *XXIX GA URSI, August 7-16, 2008: Abstracts*. Chicago, Illinois, USA, p. 131.
  4. REINISCH, B. W., SCALI, J. L. and HAINES, D. M., 1998. Ionospheric drift measurements with ionosondes. *Ann. Geophys.* vol. 41, no. 5-6, pp. 695–702. DOI: 10.4401/ag-3812.
  5. GALUSHKO, V. G., 1997. Frequency-and-angular sounding of the ionosphere. *Telecommunications and radio engineering.* vol. 51, no. 6-7, pp. 1–6. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v51.i6-7.10
  6. GALUSHKO, V. G., YAMPOLSKI, Y. M. and REINISCH, B. W., 2000. Frequency-and-Angular Sounding of the Ionosphere with the Use of a DPS Receive System. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2000), July 5-14, 2000: Proceedings*. Cambridge, MA, USA, p. 603.
  7. GALUSHKO, V. G. and LYTVYNENKO, G. V., 2001. Recovering the Three-Dimensional Structure of Ionospheric Electron Density Distribution by Angular-and-Frequency Sounding. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol 6, no. 3, pp. 222–229 (in Russian).
  8. GALUSHKO, V. G., BELEY, V. S., KOLOSKOV, A. V., YAMPOLSKI, Y. M., PAZNUKHOV, V. V., REINISCH, B. W., FOSTER, J. C and ERICKSON, P., 2003. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs. *Radio Sci.* vol. 38, is. 6, id. 1102. DOI: 10.1029/2002RS002861.
  9. PAZNUKHOV, V. V., GALUSHKO, V. G. and REINISCH, B. W., 2012. Digisonde observations of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Adv. Space Res.* vol. 49, no. 4, pp. 700–710. DOI: 10.1016/j.asr.2011.11.012
  10. GALUSHKO, V. G., KASCHEEV, A. S., PAZNUKHOV, V. V., YAMPOLSKI, Yu. M. and REINISCH, B. W., 2008. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional density waves. *Radio Sci.* vol. 43, is. 4, id. RS4013. DOI: 10.1029/2007RS003735
  11. BRAUDE, S. Ya., MEN', A. V. and SODIN, L. G., 1978. The UTR-2 decameter wavelength radio telescope. In: *Antenny*. Moscow: Svyaz'. is. 26, pp. 3–15 (in Russian).
  12. GETHING, P. J., 1978. *Radio direction-finding and the resolution of multicomponent wave-fields*. Stevenage, England: Peter Peregrinus.
  13. BIBL, K. and REINISCH, B. W., 1978. The Universal digital ionosonde. *Radio Sci.* vol. 13, is. 3, pp. 519–530. DOI: 10.1029/RS013i003p00519
  14. RYTOV, S. M., KRAVTSOV, Yu. A. and TATARSKI, V. I., 1978. *Introduction to statistical radiophysics. Part 2: Random fields*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
  15. KASHCHEYEV, S. B., ZALIZOVSKI, A. V., SOPIN, A. A. and PIKULIK, I. I., 2013. On the possibility of bistatic HF ionospheric sounding by exact time signals. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 18, no. 1, pp. 34–42 (in Russian).
  16. BRUNELLI, B. E. and NAMGALADZE, A. A., 1988. *Physics of the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
  17. JAYACHANDRAN, P. T., Macdougall, J. W., ST-MAURICE, J.-P., MOORCROFT, D. R., NEWELL, P. T. and PRIKRYL, P., 2002. Coincidence of the ion precipitation

## REFERENCES

1. AFRAIMOVICH, E. L., 1982. *Interference methods of ionospheric radio sounding*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
2. REINISCH, B. W., 1996. Modern Ionosondes. In: H. Kohl, R. Rüster, K. Schlegel, eds. *Modern Ionosphere Science*. Katleburg-Lindau: European Geophysical Society, pp. 440–458.

boundary with the HF E-region backscatter boundary in the dusk-midnight sector of the auroral oval. *Geophys. Res. Lett.* vol. 29, is. 8, pp. 97-1–97-4. DOI: 10.1029/2001GL014184

18. JAYACHANDRAN, P. T., DONOVAN, E. F., MACDOUGALL, J. W., MOORCROFT, D. R., ST-MAURICE, J.-P. and PRIKRYL, P., 2002. SuperDARN E-region backscatter boundary in the dusk-midnight sector – tracer of equatorward boundary of the auroral oval. *Ann. Geophys.* vol. 20, pp. 1899–1904. DOI: 10.5194/angeo-20-1899-2002

*V. G. Galushko, A. V. Zalizovski, I. I. Pikulik, S. B. Kashcheyev, and O. V. Charkina*

Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine,  
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### DIRECTION FINDING OF HF SIGNALS SCATTERED BY IONOSPHERIC IRREGULARITIES USING SMALL SIZE ANTENNA

*Purpose:* A modification of the Doppler Interferometry Technique is suggested to enable estimating angles of arrival of comparatively broadband HF signals scattered by random irregularities of the ionospheric plasma with the use of small-size near-omnidirectional antennas.

*Desing/methodology/approach:* The technique is based on the measurements of cross-spectra phases of the probe radiation recorded at least in three spaced points.

*Findings:* The developed algorithm has been used to investigate the angular and time-and-frequency characteristics of HF signals propagating at frequencies above the maximum usable one for the direct radio path Moscow–Kharkiv. The received signal spectra show presence of three families of spatial components attributed, respectively, to scattering by plasma irregularities near the middle point of the radio path, ground backscatter signals and scattering of the sounding signals by the intense plasma turbulence associated with auroral activations. It has been shown that the regions responsible for the formation of the third family components are located on the equatorial slope of the maximum of the precipitating particle energy. The drift velocity and direction of the polar ionosphere plasma has been determined.

*Conclusions:* The obtained estimates are consistent with the classical conception on the magnetospheric convection and plasma convection in the polar regions and do not contradict to the results of investigations of the auroral ionosphere dynamics using the SuperDARN network.

*Key words:* ionospheric plasma, scattering, direction finding, polar ionosphere, auroral oval, velocity and direction of plasma drift

*В. Г. Галушко, А. В. Залізівський, І. І. Пікулік, С. Б. Кащев, О. В. Чаркіна*

Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

#### ПЕЛЕНГУВАННЯ ВЧ СИГНАЛІВ, РОЗСІЯНИХ ІОНОСФЕРНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ, ЗА ДОПОМОГОЮ МАЛОРОЗМІРНИХ АНТЕН

*Предмет і мета роботи:* Запропоновано модифікацію методу фазової пеленгації з доплерівською фільтрацією, що дозволяє оцінювати кути приходу порівняно широко-смугових ВЧ сигналів, розсіяних випадковими неоднорідностями іоносферної плазми, за допомогою малорозмірних слабо спрямованих антен.

*Методи і методологія:* Розроблена методика ґрунтується на вимірюванні фаз взаємних спектрів зондувального випромінювання, що реєструється щонайменше у трьох просторово-рознесених точках.

*Результати:* За допомогою створеного алгоритму виконано дослідження кутових та частотно-часових характеристик ВЧ сигналів, що поширювалися на частотах вищих за максимально застосовну для прямої траси Москва–Харків. В спектрах приймального сигналу вирізано три сімейства просторових компонент, обумовлених відповідно розсіюванням на плазмових неоднорідностях поблизу середньої точки радіотраси, сигналами зворотно-похилого зондування та розсіюванням пробних сигналів інтенсивною плазмовою турбулентністю, пов'язаною з авроральними активаціями. Показано, що області, відповідальні за формування компонент третього сімейства, розташовані на екваторіальному схилі максимуму потоку енергії частинок, що висипаються. Визначено швидкість та напрямок дрейфу плазми полярної іоносфери. *Висновки:* Отримані дані узгоджуються з класичними уявленнями про магнітосферну конвекцію та конвекцію плазми в полярних областях та не суперечать результатам дослідження динаміки полярної іоносфери за допомогою системи SuperDARN.

*Ключові слова:* іоносферна плазма, розсіювання, пеленгація, полярна іоносфера, авроральний овал, швидкість та напрямок руху плазми

*Статья поступила в редакцию 01.06.2016*