УДК 533.951+537.868

СКОРОСТЬ ДРЕЙФА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДАРА. І. МЕТОД РАСЧЁТА И ЕГО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

 Γ . Г. Вертоградов ¹, В. П. Урядов ² *, В. Г. Вертоградов ¹, Е. Г. Вертоградова ¹, С. В. Кубатко ¹

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону; ² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Изложена методика расчёта полного вектора скорости дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по результатам измерений эффективного доплеровского смещения частоты ракурсно рассеянных сигналов от нескольких диагностических передатчиков подсветки, работающих на различных частотах. Разработана методика адаптивного имитационного моделирования распространения декаметровых радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере с учётом эффектов ракурсного рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля. Дано описание многочастотного доплеровского коротковолнового радара для синхронного измерения доплеровских спектров радиосигналов на множестве частот.

ВВЕДЕНИЕ

В статье разработан метод расчёта полного вектора скорости дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по результатам измерений доплеровского смещения частоты рассеянных радиосигналов. Данный метод широко используется для изучения быстрых процессов в различных слоях ионосферы, обусловленных конвекцией плазмы в субавроральной и авроральной ионосфере [1–3], магнитосферно-ионосферными взаимодействиями [4, 5], эффектами рентгеновских вспышек [6, 7], солнечных затмений [8], взрывами [9] и воздействиями мощного радиоизлучения [10–12].

Доплеровские измерения сигналов, рассеянных искусственными мелкомасштабными ионосферными неоднородностями, применяются как для диагностики крупномасштабных возмущений с периодами около 2÷3 часов [5], так и для изучения волновых процессов с периодами 30÷70 с [11–13], связанных с магнитосферным распространением магнитогидродинамических волн.

Как показано в работе [5], частотный спектр рассеянного сигнала содержит информацию о динамике искусственных мелкомасштабных неоднородностей. В эксперименте, проведённом в августе 2006 года на базе нагревного стенда «Сура» [5], наблюдался эффект уширения спектра рассеянного сигнала вещательных коротковолновых станций после 16:00 UT (время прохождения терминатора в районе нагревного стенда). Установлено, что примерно до 16:00 UT ширина спектра рассеянного сигнала составляет 1÷2 Гц, а после 16:00 UT она увеличивается до 5÷7 Гц. Кроме того, после 16:00 UT увеличивается суммарная энергия рассеянного сигнала. Полученные данные свидетельствуют об усилении турбулизации ионосферной плазмы и увеличении хаотической составляющей скоростей искусственных мелкомасштабных неоднородностей в условиях неосвещённой ионосферы после прохождения терминатора над стендом «Сура».

^{*} uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов и др.

Трудности в исследовании динамических процессов в ионосфере Земли в значительной мере обусловлены ограниченными техническими возможностями используемых средств диагностики, эпизодичностью наблюдений и сложностью проведения комплексных измерений. В этой связи представляет интерес выполнение целенаправленных исследований динамики ионосферы в условиях дозированного воздействия на ионосферную плазму мощным декаметровым излучением, когда создаваемые искусственные ионосферные неоднородности могут являться контролируемыми рассеивателями и служить в качестве индикатора движения ионосферной плазмы.

Работа состоит из двух частей. В первой статье дано теоретическое представление метода определения полного вектора скорости дрейфа мелкомасштабных искусственных неоднородностей по данным многочастотного доплеровского коротковолнового радара и дано описание аппаратуры для синхронного измерения доплеровского смещения частоты сигналов, ракурсно рассеянных искусственными неоднородностями, ориентированными вдоль магнитного поля. Во второй статье будут приведены результаты экспериментальных исследований характеристик дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, полученные с помощью многочастотного доплеровского коротковолнового радара.

1. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ДРЕЙФА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

В данном разделе представлено описание методики расчёта полного вектора скорости дрейфа V мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей на основе одновременного измерения доплеровского смещения частоты ракурсно рассеянных сигналов сразу от нескольких диагностических передатчиков подсветки, которые работают на различных частотах в декаметровом диапазоне волн. Даётся также описание методики определения проекции V_{\perp} скорости дрейфа неоднородности на плоскость, ортогональную вектору геомагнитного поля.

1.1. Проекция скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностей на направление вектора рассеяния

Как известно, рассеяние радиоволн на вытянутых мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля, имеет ракурсный характер [14]. При рассеянии на вытянутых неоднородностях волновые векторы падающего излучения \mathbf{k}_{0i} и рассеянных волн \mathbf{k}_{si} образуют коническую поверхность с осью, направленной вдоль магнитного поля Земли \mathbf{H}_0 в области рассеяния (см. рис. 1). Угол раскрыва конической поверхности равен углу между векторами \mathbf{k}_{0i} и \mathbf{H}_0 (здесь и далее индекс *i* соответствует *i*-ому диагностическому передатчику).

Поскольку неоднородности находятся в постоянном движении, ракурсно рассеянные сигналы диагностических волн приобретают доплеровское смещение частоты $\delta \omega_{di}$, которое определяется формулой

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = -\frac{\omega_i}{c} \left(\mathbf{n}_{0i} \mathbf{V} + \mathbf{n}_{\mathrm{s}i} \mathbf{V} \right). \tag{1}$$

Здесь ω_i — круговая частота диагностического излучения, c — скорость света, \mathbf{V} — скорость дрейфа неоднородностей в области рассеяния, \mathbf{n}_{0i} — единичный вектор в направлении вектора \mathbf{k}_{0i} , \mathbf{n}_{si} — единичный вектор вдоль вектора \mathbf{k}_{si} :

$$\mathbf{n}_{0i} = \frac{\mathbf{k}_{0i}}{|\mathbf{k}_{0i}|}, \qquad \mathbf{n}_{\mathrm{s}i} = -\frac{\mathbf{k}_{\mathrm{s}i}}{|\mathbf{k}_{\mathrm{s}i}|}.$$
(2)

2015

Тогда формулу (1) можно переписать в виде

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = \mathbf{k}_{\mathrm{s}i}\mathbf{V} - \mathbf{k}_{0i}\mathbf{V} = \Delta\mathbf{k}_i\mathbf{V},\tag{3}$$

где $\Delta \mathbf{k}_i = \mathbf{k}_{si} - \mathbf{k}_{0i}$ — вектор рассеяния, причём $|\Delta \mathbf{k}_i| = |\mathbf{k}_{si} - \mathbf{k}_{0i}| = 2k_0 \sin(\theta_s/2), \theta_s$ — угол рассеяния. Нетрудно получить выражение, которое позволяет вычислить проекцию скорости неоднородностей на направление вектора рассеяния, $V_{\Delta \mathbf{k}}$, по доплеровскому смещению частоты δf_{di} ракурсно рассеянных сигналов от диагностических передатчиков:

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = (\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}) = 2k_0 \sin(\theta_{\mathrm{s}}/2) V \cos(\widehat{\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}}); \quad (4)$$
$$V_{\Delta \mathbf{k}_i} = V \cos\left(\widehat{\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}}\right) = \frac{\lambda \, \delta f_{\mathrm{d}i}}{2 \sin(\theta_{\mathrm{s}}/2)} \,. \quad (5)$$

Соотношение (5) используется для определения величины $V_{\Delta \mathbf{k}_i}$ по измерению смещения $\delta f_{\mathrm{d}i}$, причём угол рассеяния θ_{s} оценивается по географическим координатам диагностического передатчика подсветки, приёмника и трёхмерным ко-



Рис. 1. Геометрия ракурсного рассеяния сигналов диагностических передатчиков на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях, вытянутых вдоль магнитного поля

ординатам области рассеяния. Корректная оценка угла рассеяния θ_s может быть выполнена только с помощью моделирования процесса ракурсного рассеяния на основе траекторных расчётов с учётом рефракции радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. Отметим, что $V_{\Delta \mathbf{k}_i}$ проекция скорости дрейфа неоднородностей на направление вектора рассеяния или на направление биссектрисы угла между векторами \mathbf{k}_{0i} и \mathbf{k}_{si} , при этом вектор рассеяния $\Delta \mathbf{k}_i$ ортогонален вектору \mathbf{H}_0 . Однако не следует путать проекцию $V_{\Delta \mathbf{k}_i}$ с проекцией скорости дрейфа \mathbf{V} на плоскость, ортогональную вектору \mathbf{H}_0 , поскольку в общем случае проекция \mathbf{V} на указанную плоскость не совпадает с направлением биссектрисы для заданного расположения передатчика и приёмника радиосигналов. Величину этой проекции далее будем обозначать $V_{H\perp}$. Очевидно, что всегда выполняется неравенство $V_{H\perp} \geq V_{\Delta \mathbf{k}_i}$.

Именно проекция $V_{\Delta \mathbf{k}_i}$ неоднократно оценивалась в различных работах, в которых были описаны экспериментальные исследования искусственных неоднородностей, в том числе с использованием нагревного стеда «Сура». При этом, как правило, при оценке угла рассеяния θ_s не учитывается рефракция радиоволн в ионосфере. В ходе экспериментов [15] было показано, что в магнитоспокойных условиях распространения проекция $V_{\Delta \mathbf{k}_i}$ равняется примерно 20 м/с. В магнитовозмущённых условиях данная проекция возрастает до 180 м/с [11].

1.2. Метод определения вектора скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных неоднородностей

Будем предполагать, что при экспериментальных исследованиях используются N диагностических передатчиков подсветки. Предположим, что вектор скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных неоднородностей, ориентированных вдоль магнитного поля, одинаков во всех областях рассеяния волн, распространяющихся от различных диагностических передатчиков подсветки, т. е. вектор V не зависит от высоты области рассеяния. Поскольку спектральная плотность мощности ракурсно рассеянных сигналов имеет конечную и часто значительную ширину,

то под доплеровским смещением частоты $\delta \omega_{di}$ в формуле (3) будем понимать средневзвешенную по доплеровскому спектру величину, причём взвешивание проводится с весом, равным мощности спектральной составляющей.

Для задания координат векторов скорости, волновых векторов, вектора рассеяния и других величин введена локальная правая прямоугольная система координат, в которой плоскость xy совпадает с плоскостью горизонта, ось y направлена на географический север, ось z направлена вертикально вверх.

После сделанных предположений из формулы (3) получим систему уравнений для определения компонент вектора скорости дрейфа неоднородностей $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$:

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = \Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V} = \Delta k_{xi} V_x + \Delta k_{yi} V_y + \Delta k_{zi} V_z, \qquad i = 1, \dots, N.$$
(6)

Заметим, что в выбранной системе координат, вообще говоря, отличны от нуля все три компоненты вектора рассеяния $\Delta \mathbf{k}_i$, что и позволяет оценить полный вектор скорости дрейфа. Способ оценки вектора $\Delta \mathbf{k}_i$ на основе компьютерного моделирования с учётом рефракции в неоднородной магнитоактивной ионосфере в условиях эксперимента опишем ниже. Отметим, что, с учётом компьютерного моделирования, вектор рассеяния $\Delta \mathbf{k}_i$ будет найден в общем случае для обеих магнитоионных компонент, т. е. для рассеяния волн с обыкновенной и необыкновенной поляризациями. Как следствие, для оценки компонент полного вектора скорости $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ необходимы данные как минимум от двух диагностических передатчиков, т. е. будем полагать, что $N \geq 4$. В этом случае система уравнений (6) является переопределённой. Следовательно, может быть поставлена задача отыскания наилучшего решения $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ в смысле минимизации среднеквадратичного отклонения δ . Таким образом, при условии регистрации ракурсного рассеяния не менее, чем от двух диагностических передатчиков, полный вектор скорости дрейфа неоднородностей может быть оценён путём решения переопределённой системы линейных уравнений (6).

После того, как полный вектор скорости дрейфа оценён, могут быть вычислены его продольная, V_H , и ортогональная вектору геомагнитного поля \mathbf{H}_0 , $V_{H\perp}$, составляющие, а также углы, задающие ориентацию скорости дрейфа. Угол относительно направления на географический север в плоскости горизонта (т. е. азимут) обозначим как β , угол относительно плоскости горизонта (т. е. угол места) — Δ . Указанные величины определяются по формулам

$$\Delta = \operatorname{arctg} \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}, \qquad \beta = \operatorname{arctg} \frac{V_x}{V_y}, \qquad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2},$$
$$V_H = \frac{\mathbf{H}_0 \mathbf{V}}{|\mathbf{H}_0|}, \qquad V_{H\perp} = \frac{[\mathbf{H}_0, \mathbf{V}]}{|\mathbf{H}_0|}. \tag{7}$$

С другой стороны, можно определить проекцию $V_{H\perp}$, если перейти в систему координат, связанную с магнитным полем (x', y', z'), где плоскость x'y' ортогональна магнитному полю, а ось z' ориентирована вдоль магнитного поля. Тогда уравнение (6) можно записать в виде

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = (\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}) = \Delta \mathbf{k}_{i\perp} \mathbf{V}_{H\perp} + \Delta \mathbf{k}_{i\parallel} \mathbf{V}_H.$$
(8)

По условиям ракурсного рассеяния на сильно вытянутых неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля, $\Delta \mathbf{k}_{i\parallel} \mathbf{V}_H = 0$ и соотношение (8) принимает вид

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = (\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}) = \Delta \mathbf{k}_{i\perp} \mathbf{V}_{H\perp} = \Delta \mathbf{k}_{ix'} V_{x'H\perp} + \Delta \mathbf{k}_{iy'} V_{y'H\perp}.$$
(9)

В дальнейшем, чтобы не загромождать запись, будем полагать $\mathbf{V}'_{H\perp} \equiv \mathbf{V}'$, имея в виду, что скорость дрейфа неоднородностей в плоскости, ортогональной магнитному полю, определяется в системе координат (x', y').

Чтобы сравнить характеристики вектора скорости дрейфа неоднородностей $\mathbf{V}_{H\perp}$ с расчётами компонент полного вектора скорости дрейфа \mathbf{V} в системе (x, y, z) (см. уравнения (1)–(7)), выберем ось y' в направлении линии пересечения плоскости географического меридиана с плоскостью, ортогональной магнитному полю (т. е. оси y' и y лежат в одной вертикальной плоскости). При этом, поскольку наклонение магнитного поля на высотах ионосферы над стендом «Сура» составляет заметную величину $I = 71,5^{\circ}$, то географический азимут и азимут в плоскости x'y'будут близки между собой.

Тогда задача оценки двух компонент $\mathbf{V}_{H\perp} = \{V_{x'}, V_{y'}\}$ упрощается и сводится к решению переопределённой системы линейных уравнений:

$$\delta\omega_{\mathrm{d}i} = (\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}) = \Delta \mathbf{k}_{i\perp} \mathbf{V}_{H\perp} = \Delta k_{ix'} V_{x'} + \Delta k_{iy'} V_{y'}, \qquad i = 1, 2, \dots, N.$$
(10)

При этом имеют место соотношения

$$V_{x'} = V' \sin \beta', \qquad V_{y'} = V' \cos \beta', \qquad \Delta k_{ix'} = \Delta k_i \sin \alpha'_i, \qquad \Delta k_{iy'} = \Delta k_i \cos \alpha'_i,$$

$$\Delta k_i = 2k_{0i} \sin(\theta_{si}/2); \qquad \delta \omega_{di} = (\Delta \mathbf{k}_i \mathbf{V}') = \Delta k_i V' \cos(\alpha'_i - \beta'); \qquad V' = \frac{\delta \omega_{di}}{\Delta k_i \cos(\alpha'_i - \beta')}. \tag{11}$$

Здесь α'_i — азимут биссектрисы (т. е. вектора $\Delta \mathbf{k}_i$) для комбинации *i*-й передатчик—приёмник (г. Ростов-на-Дону); β' — азимут вектора **V**'.

В этом случае можно не решать переопределённую систему уравнений (10), а параметры скорости $\mathbf{V}' = \{V_{x'}, V_{y'}\}$ могут быть найдены по измерениям двух доплеровских смещений частоты от двух различных передатчиков с учётом соотношений:

$$\frac{\delta\omega_{\rm d1}}{\delta\omega_{\rm d2}} = \frac{\Delta k_1 \,\cos(\alpha'_1 - \beta')}{\Delta k_2 \,\cos(\alpha'_2 - \beta')},\tag{12}$$

откуда следует

$$\frac{\delta f_{\rm d1}}{\delta f_{\rm d2}} = \frac{\sin(\theta_{\rm s1}/2)\lambda_2\cos(\alpha_1' - \beta')}{\sin(\theta_{\rm s2}/2)\lambda_1\cos(\alpha_2' - \beta')}.$$
(13)

Из (13) следует, что

$$A = \frac{\cos(\alpha'_1 - \beta')}{\cos(\alpha'_2 - \beta')} = \frac{\delta f_{d1} \sin(\theta_{s2}/2)\lambda_1}{\delta f_{d2} \sin(\theta_{s1}/2)\lambda_2}, \qquad B = \operatorname{tg} \beta' = \frac{\cos\alpha'_1 - A\cos\alpha'_2}{A\sin\alpha'_2 - \sin\alpha'_1}. \tag{14}$$

Отсюда, в свою очередь, можно заключить, что

$$V' = \frac{\delta f_{\rm d1} \lambda_1}{\sin(\theta_{\rm s1}/2) \cos(\alpha'_1 - \arctan B)}.$$
(15)

Однако в дальнейшем для определения вектора $\mathbf{V}' = \{V_{x'}, V_{y'}\}$ и азимута этого вектора β' будем пользоваться переопределённой системой (10), т. к. она позволяет использовать множество диагностических передатчиков для определения неизвестных параметров методом наименьших квадратов.

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов и др.

1.3. Определение вектора рассеяния на основе адаптивного имитационного моделирования ракурсного рассеяния радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере

При моделировании результатов эксперимента в качестве модели ионосферы задавалась модель IRI-2012 [16, 17] с коррекцией геометрических параметров $N_{\rm e}(h)$ -профиля в одной точке. Модель IRI адаптировалась по результатам наклонного широкополосного зондирования с линейной частотной модуляйией (ЛЧМ) на трассе Москва—Ростов-на-Дону. Для конкретного времени эксперимента моделировались моды распространения прямого сигнала на этой трассе, т. е. для неё восстанавливались дистанционные и угловые частотные характеристики (ДЧХ и УЧХ).

Параметры $N_{\rm e}(h)$ -профиля ионосферы (критическая частота, высота максимума F_2 -слоя) подбирались так, чтобы получилось наилучшее согласие вычисленных характеристик с экспериментальными данными. Данные станции вертикального зондирования ИЗМИРАН использовались только в качестве начального приближения для определения критической частоты и высоты максимума F_2 -слоя. Отметим, что при подгонке указанных параметров возможны небольшие отклонения от данных станции вертикального зондирования. Это обусловлено тем, что последняя характеризует состояние ионосферы только в одной точке, а это не всегда обеспечивает хорошее согласие рассчитанных частотных характеристик с экспериментальными характеристиками наклонного зондирования. Затем полученное и согласованное с характеристиками распространения на прямой трассе Москва—Ростов-на-Дону пространственное распределение электронной концентрации использовалось для нахождения дистанционных и угловых частотных характеристик рассеянных сигналов.

На рис. 2 в качестве иллюстрации показаны результаты эксперимента и моделирования для сеанса зондирования 16:26 UT 24.09.2010. Чёрными мелкими точками обозначены экспериментальные данные для прямого ЛЧМ-сигнала (τ — групповая задержка; Δ — угол места, т. е. угол прихода луча относительно плоскости горизонта; α — азимут прихода луча относительно направления на географический север), указаны все моды распространения прямого сигнала (ПС). Экспериментальные данные для рассеянного сигнала (РС) показаны мелкими серыми треугольниками.

При моделировании прямого коротковолнового канала в 16:26 UT 24.09.2010 было установлено, что оптимальное моделирование получается для модели IRI с коррекцией профиля ионизации (критической частоты f_{F_2} и высоты F_2 -слоя $h_{\max F_2}$) в географической точке размещения нагревного стенда «Сура»: $f_{F_2} = 5,081$ МГц, $h_{\max F_2} = 303,75$ км. Для подобранного по прямому сигналу профиля ионизации моделировался сигнал, рассеянный на возмущённой области (для волн с обыкновенной и необыкновенной поляризациями). При этом полагалось, что рассеяние удовлетворяет условию ракурсности [14]. Результат моделирования показан на рис. 2 чёрными крупными треугольниками.

Для определения координат центра области, заполненной мелкомасштабными неоднородностями, проводилось моделирование распространения сигнала волны накачки. С помощью восстановленного по прямому сигналу профиля ионизации из точки с географическими координатами стенда «Сура» строилась лучевая траектория. Угол лучевой траектории определялся ориентацией диаграммы направленности антенны нагревного стенда во время эксперимента. Координаты точки отражения волны накачки от ионосферы определялись в каждом конкретном случае и принимались как координаты центра рассеивающей области.

В результате реализуется следующий алгоритм имитационного моделирования распространения и ракурсного рассеяния декаметровых радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере [18, 19].

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов и др.



Рис. 2. Результаты эксперимента и моделирования рассеянного сигнала для 16:26 UT 24.09.2010 (сеанс нагрева 16:20÷16:40 UT). Эксперимент: ПС — чёрные точки, РС — мелкие серые треугольники. Моделирование: ПС — кружки для моды с обыкновенной поляризацией (о) 1*F*₂, 2*F*₂, крестики для моды с необыкновенной поляризацией (х) 1*F*₂, 2*F*₂, РС — чёрные крупные треугольники. На панелях (а) и (б) в рамках показаны по-отдельности результаты эксперимента и моделирования для рассеянного сигнала

1) С помощью имитационного моделирования распространения волны накачки для конкретного момента времени с учётом известных индексов солнечной активности и коррекции профиля ионизации модели IRI по данным вертикального зондирования или наклонного зондирования находится местоположение рассеивающей области. Координаты центра данной области определяются точкой отражения волны с обыкновенной поляризацией от ионосферы. Влияние конечных размеров рассеивающей области учитывается варьированием её положения по высоте и географическим координатам в пределах её возможных размеров.

2) Вторым этапом является решение граничной задачи для определения волнового вектора \mathbf{k}_{0i} волны, падающей на рассеивающую область. Для этого удобно воспользоваться обратимостью лучевых уравнений в неоднородной магнитоактивной ионосфере в силу их симметрии относительно одновременной замены \mathbf{k} на $-\mathbf{k}$ и t на -t. Как следствие, решается граничная задача, когда точка излучения находится внутри ионосферы, а приёмник — на Земле. Таким образом, для всех

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов и др.

возможных лучевых траекторий определяется угол Ψ между векторами \mathbf{k}_{0i} и \mathbf{H}_0 .

3) Далее осуществляется виртуальное «рассеяние» волны на точечном рассеивателе с координатами, лежащими внутри возмущённой области, и высотой, соответствующей центру рассеивающей области. Это можно сделать, воспользовавшись следующей формулой для найденного угла Ψ:

$$\cos \Psi = \cos I \cos \Delta_1 \cos(D - \alpha_1) + \sin I \sin \Delta_1, \tag{16}$$

где I — магнитное наклонение, D — магнитное склонение, Δ_1 и α_1 — угол места и азимут падающего луча соответственно. В этих обозначениях $\Delta_1 > 0$, если волна падает на рассеивающую область снизу, $\Delta_1 < 0$, если волна падает сверху. В северном полушарии вертикальная составляющая вектора магнитного поля \mathbf{H}_0 направлена сверху вниз, т. е. I < 0, в южном полушарии I > 0. Для конуса рассеянного излучения с волновым вектором \mathbf{k}_{si} можно записать выражение

$$\cos \Psi = \cos I \cos \Delta_2 \cos(D - \alpha_2) + \sin I \sin \Delta_2, \tag{17}$$

где Δ_2 и α_2 — угол места и азимут рассеянного луча соответственно.

4) На последнем этапе для каждой пары лучевых координат Δ_2 , α_2 проводится расчёт лучевых траекторий до первого пересечения луча с поверхностью Земли. При этом азимут α_2 изменяется в диапазоне $-\pi < \alpha_2 \leq \pi$. В результате на поверхности Земли формируется контур ракурсного рассеяния с эллиптической или гиперболической формой.

Описанный подход удобен для выбора источников диагностического излучения при планировании эксперимента. Тем не менее, он становится трудоёмким при имитационном моделировании процессов распространения радиоволн с учётом эффектов ракурсного рассеяния, когда известны координаты передатчика и приёмника. Это, прежде всего, относится к задачам интерпретации результатов экспериментальных данных, полученных с помощью наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы.

В результате для решения указанных задач развит другой подход, при котором моделирование выполнялось по следующей схеме. Задавались географические координаты области рассеяния λ (долгота) и φ (широта). Высота области рассеяния изменялась от 150 до 400 км с шагом 1 км. Для каждой точки рассеяния в результате решения описанной выше граничной задачи находились все возможные траектории, которые попадали из области рассеяния в точку приёма (например, г. Ростов-на-Дону) и из области рассеяния в точку излучения (например, г. Москва). Для каждой возможной траектории находился угол между геомагнитным полем \mathbf{H}_0 и волновыми векторами в точке рассеяния \mathbf{k}_{si} . Угол в окрестности области рассеяния между геомагнитным полем \mathbf{H}_0 и волновыми вектором \mathbf{k}_{si} для волны, распространяющейся от области рассеяния в точку приёма, обозначен далее Ψ_{si} . Угол в окрестности области рассеяния между геомагнитным полем \mathbf{H}_0 и волновым вектором \mathbf{k}_{si} для волны, распространяющейся из точки излучения, обозначен как Ψ_{0i} .

Условие ракурсности в данных обозначениях записывается следующим образом:

$$\cos \Psi_{si} = \cos\left(\widehat{\mathbf{H}_0 \mathbf{k}_{si}}\right) = \cos\left[\widehat{\mathbf{H}_0(-\mathbf{k}_{0i})}\right] = \cos \Psi_{0i}.$$
(18)

Из всего множества траекторий выбираются только те пары, для которых Ψ_{si} и Ψ_{0i} отличаются не более чем на некоторую величину ε (в зависимости от задачи ε обычно выбиралось равным 0.5°).

Для каждой полученной пары траекторий, одна из которых исходила из пункта излучения, а вторая при выполнении условия ракурсности попадала в приёмник, дополнительно вычислялись полная групповая задержка τ , напряжённость поля рассеянного сигнала в точке приёма E и угол

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов и др.

места в точке приёма. Полученные результаты отображались соответственно на экспериментальных дистанционных, амплитудных и угловых частотных характеристиках (ДЧХ, АЧХ и УЧХ) соответственно. Затем определялась высота рассеивающей области, а также вектор \mathbf{H}_0 в области рассеяния. В результате варьирования координат точки рассеяния λ и φ в пределах рассеивающей области на указанных характеристиках получается «пятно», соответствующее рассеянному сигналу с параметрами, найденными в процессе имитационного моделирования.

2. МНОГОЧАСТОТНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ КОРОТКОВОЛНОВЫЙ РАДАР КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СИНХРОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ НА МНОЖЕСТВЕ ЧАСТОТ

Для получения экспериментальных данных при исследовании сигналов, рассеянных от искусственных ионосферных неоднородностей, разработан стенд многочастотных измерений — многочастотный доплеровский коротковолновый радар. Данный стенд позволяет проводить непрерывные длительные измерения квадратурных составляющих высокочастотных сигналов от большого количества источников излучения. Основу измерительной аппаратуры составляют: персональный компьютер, GPS-приёмник для точной временной синхронизации старта приёма данных и многоканальное цифровое радиоприёмное устройство ЦРПУ-КВ, которое обеспечивает до 30 узкополосных каналов приёма. Устройство ЦРПУ-КВ является приёмником прямого усиления, оснащено на входе блоком широкополосных программируемых фильтров, 16-разрядным аналогоцифровым преобразователем с первичной частотой оцифровки первичного канала 70 МГц и встроенным программируемым блоком предварительной цифровой обработки сигналов. Динамический диапазон устройства составляет не менее 100 дБ. Устройство ЦРПУ-КВ может работать в режиме предварительной фильтрации входных сигналов в полосе 2÷32 МГц или, при выборе одного из 6 фильтров предварительной фильтрации, в полосе до 7 МГц. В любом случае устройство ЦРПУ-КВ обеспечивает получение с помощью встроенного блока предварительной цифровой обработки сигналов до 30 вторичных узкополосных каналов с полосой 10 кГц. Каждый канал может независимо настраиваться на любую частоту в пределах первичной полосы пропускания. На выходе ЦРПУ-КВ измеряются квадратурные компоненты каждого из сигналов в полосе 10 кГц.

На основе устройства ЦРПУ-КВ построен макет комплекса для регистрации и предварительной обработки сигналов, рассеянных от естественных и искусственных ионосферных образований. Разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет выполнять следующие операции:

1) в реальном масштабе времени принимать до 30-узкополосных сигналов в пределах первичной полосы пропускания;

2) автоматически распределять заданные частоты по четырём поддиапазонам с выбором входных фильтров предварительной селекции и цифровых фильтров вторичных каналов (полоса 7 МГц) для каждого диапазона;

3) осуществлять дополнительную цифровую фильтрацию по каждому независимому вторичному узкому каналу с помощью комплексных рекурсивных цифровых фильтров десятого порядка с полосой пропускания 50 Гц;

4) понижать частоту дискретизации квадратурных компонент сигнала до частоты 200 Гц;

5) рассчитывать спектральные характеристики сигналов в полосе;

6) визуализировать спектральные характеристики в реальном масштабе времени;

7) сохранять квадратурные компоненты каждого сигнала с частотой дискретизации 200 Гц на жёстком диске для последующей обработки. В общем случае стенд многочастотных доплеровских измерений может обеспечивать работу более 30-ти приёмных каналов, поскольку одновременно к стенду может подключаться несколько устройств ЦРПУ-КВ. В экспериментальных кампаниях с нагревным стендом «Сура» использовалось до трёх устройств ЦРПУ-КВ, что обеспечивало приём 90 независимых частот в пределах первичной полосы пропускания. Такое построение многочастотного доплеровского радара позволяет более гибко использовать гребёнку перестраиваемых входных фильтров (каждый из которых имеет полосу пропускания от 2 до 15 МГц в зависимости от средней частоты настройки) и обеспечивает лучшие динамические характеристики всего стенда.

Погрешность временной синхронизации, обеспечиваемой GPS-приёмником, не превышает 10 мкс.

В качестве приёмной антенны использовалась V-образная антенна с длиной плеча 100 м, углом раскрыва 40°, высотой подвеса над поверхностью земли 12 м и ориентацией максимума диаграммы направленности на нагревный стенд «Сура». Эксперименты показали, что для приёма сигналов ракурсного рассеяния на всех разработанных стендах без потери чувствительности можно использовать пассивные широкополосные штыревые антенны с длиной 9 м, размещённые на поверхности земли. Сигнал, принимаемый используемой V-образной антенной, разветвлялся на входы всех радиоприёмных устройств с помощью активного разветвителя.

На рис. 3 показан снимок экрана многочастотного доплеровского радара при регистрации сигналов, рассеянных на искусственных неоднородностях. На панели, соответствующей каждой вещательной станции или станции РВМ, показаны частота настройки приёмного канала, спектральная плотность мощности (белая кривая на чёрном фоне в нижней части панели) и спектрограммы (оттенки серого в верхней части панели), получаемые в реальном масштабе времени в полосе от -20 Гц до +20 Гц. Ось времени для спектрограммы соответствует оси ординат, а по оси абсписс откладывается частота в окрестности частоты настройки в полосе с шириной 40 Гп. На некоторых частотах настройки радара наблюдаются эффекты ракурсного рассеяния. Особенно чётко это видно на частоте № 10, f = 13760 кГц (Китай) во время длительного нагрева. Здесь слева показано доплеровское смещение частоты прямого сигнала, справа — рассеянного сигнала. По спектрограмме (т. е. развёртке динамической спектральной плотности мощности во времени, время откладывается по оси ординат) можно проследить динамику спектральных характеристик за 20 мин и визуально оценить режим работы нагревного стенда. Это позволяет констатировать факты искусственного воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением и выбирать для дальнейшей детальной обработки только те записи сигналов, для которых обнаружены соответствующие проявления.

Последующая обработка записей комплексного низкочастотного сигнала осуществляется на основе MTM-метода спектрального оценивания [20, 21]. Данный метод позволяет работать с короткими временными выборками, осуществлять детерминированный выбор спектральных окон и дисперсионный анализ дискретных компонент, а также обеспечивает высокое спектральное разрешение.

Основными целями данной обработки является получение оценок следующих характеристик радиосигналов [22, 23]:

1) динамических спектров мощности комплексного низкочастотного сигнала (т. е. доплеровских спектров);

2) параметров отдельных лучей распространения (доплеровского смещения частоты и амплитуды), формирующих поле в точке приёма;

3) величины частотного рассеяния Δf сигнала по уровню 95% принимаемой энергии (т. е. полосы низкочастотного комплексного сигнала);

4) среднего уровня $\langle E \rangle$ принимаемого сигнала относительно разрядности аналого-цифрового

💢 Панорама 1 🥝	_ ×
and the second	
1 11690000 Hz	2 14996000 Hz
Manual Addie Addie Andrea Addie A	
	4 120/5000 Hz
5 12030000 Hz	6 12035000 Hz
www.chananal.adda.chalaalaanalaanaa.aa.laanaanaa.aa.laanaanaa.aa.laanah.chalaalaanaa.add.chalaada.aadda.aadda.	e m preserver many and man
7 12010000 Hz	8 15420000 Hz
9 13635000 Hz	10 13760000 Hz
	and the second
Окно Частота Порог Масштаб Наи 11450000 Ф Центр 1 Лин /2*2 1	Сбработка → Blackmar → Open 2/freqlist.txt Задержка 0 сек → Стоп Выход

Рис. 3. Снимок экрана многочастотного доплеровского коротковолнового радара

преобразователя (АЦП) в децибелах;

5) спектральной плотности мощности шумов в полосе анализа относительно разрядности АЦП в децибелах;

6) среднего отношения сигнал/шум в полосе принимаемого низкочастотного комплексного сигнала;

7) коэффициента мутности ионосферы как интегральной меры её тонкой мелкомасштабной структуры.

Также предполагается оценка статистических свойств указанных характеристик (функций распределения, математических ожиданий и дисперсий) и исследование статистических закономерностей поведения временно́го радиуса корреляции рассеянной компоненты.

Далее по каждому сеансу нагрева определяются зависимости от времени для следующих параметров: $E_{\rm N+10}$ — энергия рассеянного сигнала, найденная при превышении спектральной плотности сигнала над спектральной плотностью шума на 10 дБ; $\Delta f_{\rm N+10}$ — соответствующая ширина полосы рассеянного сигнала; $E_{\rm max-10}$ — энергия рассеянного сигнала, найденная по уровню

-10 дБ относительно максимальной спектральной плотности рассеянного сигнала; $\Delta f_{\max -10}$ — соответствующая частотная полоса рассеянного сигнала; Δf_{eff} — эффективная частотная полоса рассеянного сигнала; $\Delta f_{\text{eff}}^2 = \sum_j S_j \Delta f_j^2 / \sum_j S_j$, где S_j — спектральная плотность мощности рассеянного сигнала на частоте f_j , $\Delta f_j = f_j - \delta f$ — смещение спектральной гармоники относительно эффективного доплеровского сдвига δf ; $\delta f = \sum_j S_j f_j / \sum_j S_j$ —

эффективный доплеровский сдвиг рассеянного сигнала, причём суммирование ведётся в пределах полосы рассеянного сигнала по гармоникам, для которых достигается превышение спектральной плотности шума более чем на 10 дБ.

По зависимости $E_{N+10}(t)$ определяются в общем случае три временны́х параметра: время нарастания энергии рассеянного сигнала при включении нагрева τ_0 ; характерное время быстрой релаксации после выключения нагрева τ_1 и характерное время медленной релаксации τ_2 (если таковая наблюдается). Все три параметра определяются как время, в течение которого энергия рассеянного сигнала изменилась бы в 10 раз (т. е. на 10 дБ).

выводы

Разработана методика оценки полного вектора скорости дрейфа мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей по результатам измерений эффективного доплеровского смещения частоты ракурсно рассеянных сигналов от нескольких диагностических передатчиков подсветки и/или на нескольких рабочих частотах.

Разработана методика адаптивного имитационного моделирования процессов распространения декаметровых радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере с учётом эффектов ракурсного рассеяния на мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях. Она, в частности, позволяет оценивать волновой вектор волн, падающих на область рассеяния, и волновой вектор ракурсно рассеянного излучения. В результате разработанная методика позволяет оценить вектор рассеяния при ракурсном рассеянии радиоволн на искусственных неоднородностях.

Дано описание многоканального доплеровского коротковолнового радара для измерения доплеровских спектров на множестве частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и РФФИ (грант 12–02–00177а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., et al. // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 761.
- 2. Parkinson M. L., Devlin J. C., Ye H., et al. // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 1847.
- 3. Kataoka R., Hosokawa K., Nishitani N., Miyoshi Y. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 1695.
- 4. André R., Pinnock M., Villain J.-P., Hanuise C. // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1783.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 669.
- 6. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977. 370 с.
- Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 5. С. 362.
- Boitman O. N., Kalikhman A. D., Tashchilin A. V. // J. Geophys. Res. A. 1999. V. 104, No. 12. P. 28 197.

- Таращук Ю. Е., Нагорский П. М., Борисов Б. Б. и др. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение коротких радиоволн. Томск: Томский ун-т, 1986. 164 с.
- 10. Allen E. M., Thome G. D., Rao R. B. // Radio Sci. 1974. V.9, No. 11. P. 905.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 9. С. 722.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Понятов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 12. С. 1011.
- Черногор Л. Ф., Вертоградов Г. Г., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 12. С. 766.
- 14. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.
- Беленов А. Ф., Богута Н. М., Урядов В. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 5. С. 662.
- 16. Bilitza D. // Radio Sci. 2001. V. 36, № 2. C. 261.
- 17. http://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/models/iri/iri2012/.
- А. с.№ 2001611514 РФ. Программное обеспечение многоканального пеленгатора-дальномера КВ-диапазона / Вертоградов Г.Г., Кондаков Е.В., Шевченко В.Н. Заявл. 13.09.2001; зарегистр. 12.11.2001.
- 19. Вертоградова Е. Г. Диагностика, моделирование и прогнозирование характеристик декаметровых радиоволн в естественно возмущенной и искусственно модифицированной ионосфере: Дис.... канд. физ.-мат. наук. Ростов-на-Дону, 2014. 179 с.
- 20. Томсон Д. Дж. // ТИИЭР. 1982. Т. 70, № 9. С. 171.
- 21. Вертоградов Г. Г., Мятежников Ю. П. // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 3. С. 357.
- 22. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 5. С. 25.
- 23. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 5. С. 22.

Поступила в редакцию 18 декабря 2014 г.; принята в печать 5 февраля 2015 г.

DRIFT VELOCITY OF SMALL-SCALE ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES ACCORDING TO MULTIFREQUENCY HF DOPPLER RADAR. I. METHOD OF CALCULATION AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, V. G. Vertogradov, E. G. Vertogradova, and S. V. Kubatko

The method of calculating the total drift velocity vector of small-scale artificial ionospheric irregularities as measured by the effective Doppler frequency shift of aspect-scattered signals from several diagnostic illumination transmitters operated at different frequencies is discussed. The technique of adaptive simulation of decameter radio waves propagating in an inhomogeneous magnetized ionosphere with allowance for the aspect scattering effects due to small-scale field-aligned irregularities is developed. A multifrequency HF Doppler radar for simultaneous measurement of the Doppler spectra of radio signals at a plurality of frequencies is described.