

ОЦЕНКА ИНДЕКСА МЕРЦАНИЙ S_4 В ТРАНСКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОЛИНИЯХ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-5-14-24

Manuscript received 16 April 2023;

Accepted 10 May 2023

Сивоконь Владимир Павлович,
Камчатский государственный технический
университет Петропавловск-Камчатский, Россия;
Институт космических исследований и
распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский
край, Паратунка, Россия,
vsivokon@mail.ru

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме (2021–2023 гг.) "Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях", регистрационный номер АААА-А21-121011290003-0

Ключевые слова: межслоевой ионосферный волновод, индекс мерцаний, геофизическая обстановка

На нагревных стендах HAARP и EISCAT для решения ряда прикладных задач проводятся исследования по возбуждению межслоевого ионосферного волновода. Успешность реализации этих задач зависит от многих факторов, в том числе от уровня замираний электромагнитного поля в волноводе, для оценки вариаций которого исследователями используется индекс мерцаний S_4 . Модель возбуждения волновода, предложенная экспериментаторами, базируется на ракурсном "эффекте саморассеяния" на искусственных магнитоориентированных неоднородностях ионосферы. Однако, в рамках такого подхода, не учитывается возможность существования других механизмов возбуждения волновода и влияние на этот процесс геофизической обстановки. Для проверки этого предположения нами используется многопозиционная диагностика на основе технологии SDR. Измерения на квазипродольных и квазипоперечных относительно силовой линии магнитного поля Земли трассах, а также в отличающихся геофизических условиях показали существенную разницу в вариациях индекса мерцаний S_4 и интенсивности рассеянной волны. Полученные результаты можно использовать в задачах оптимизации схем закачки информационного сигнала в межслоевой ионосферный волновод.

Информация об авторах:

Сивоконь Владимир Павлович, Камчатский государственный технический университет, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Энергетические установки и электрооборудование судов", Петропавловск-Камчатский, Россия;
Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка, Россия

Для цитирования:

Сивоконь В.П. Оценка индекса мерцаний S_4 в трансконтинентальных декаметровых радиоперелиниях // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №5. С. 14–24.

For citation:

Sivokon V.P. (2023) Evaluation of the S_4 scintillations index in transcontinental decameter radio lines. T-Comm, vol. 17, no.5, pp. 14–24. (in Russian)

Введение

Известен ряд работ, посвященных изучению свойств магнитоориентированных неоднородностей [19, 23, 20], в том числе искусственных [2, 3, 18, 22, 25, 26, 28]. Интерес к этому виду неоднородностей обусловлен возможностью использования их при решении ряда прикладных задач, например, возбуждении межслоевого ионосферного волновода в телекоммуникационных системах [27]. Наиболее известными в этой области исследований являются работы, выполненные специалистами Харьковского радиоастрономического института и их зарубежными коллегами [3, 4, 21, 24, 27, 28].

В публикации [28] сообщается о наблюдении нагревной волны стенда EISCAT на территории России, Украины и Антарктиды. Делается вывод о двух возможных модах распространения: обычной многоскачковой, формируемой боковыми лепестками антенной решетки нагревного стенда и рассеянной на искусственных неоднородностях, сформированных нагревным стендом.

В работе [3] авторами рассчитаны направления и поперечники ракурсного рассеяния декаметровых радиоволн на случайных магнитоориентированных неоднородностях плоскостной (в среднем) ионосферы.

В публикации [4] вводится термин “эффект саморассеяния”, который был обнаружен в экспериментах по наблюдению излучения нагревного стенда EISCAT в трех значительно разнесенных в пространстве пунктах. Объяснение эффекта базируется на механизме ракурсного рассеяния нагревной волны на искусственных магнитоориентированных неоднородностях, созданных ею же.

В развитие предыдущих работ в публикации [21] анализируется влияние ионосферной рефракции на рассеяние сигналов декаметрового диапазона на случайных магнитоориентированных неоднородностях в верхней ионосфере.

В работе [24] представлены исследования искусственной ионосферной турбулентности, обусловленной коротковолновым нагревом ионосферы стендом HAARP с использованием частот, близких к четвертой гармонике гиромангнитной частоты. Диагностировались сцинтилляции GPS, искусственное радиоизлучение ионосферы, параметры сигналов, принятых на Украинской антарктической станции. Последние позволили провести анализ характеристик волн, рассеянных на искусственной ионосферной турбулентности в ионосферный волновод на расстоянии 15600 км от HAARP. Корреляция между данными от разных детекторов показывает, что рассеянные волны достигают Антарктиду по волноводу вдоль терминатора Земли, и что они были введены в волновод за счет рассеяния на искусственных неоднородностях над HAARP, а не путем прямой инжекции излучения боковых лепестков антенны нагревного стенда.

В публикации [27] обобщаются результаты экспериментов по реализации нового метода создания глобальных радиолиний с использованием различных нагревных стендов EISCAT (Норвегия), HAARP (Аляска) и Аресибо (Пуэрто-Рико).

Из приведенных публикаций следует, что возбуждение межслоевого ионосферного волновода возможно за счет рассеяния на искусственных неоднородностях ионосферы. При описании механизма рассеяния нагревной волны на магнитоориентированных неоднородностях используется подход,

базирующийся на ракурсном рассеянии. Поскольку конфигурация магнитного поля Земли, по крайней мере, в Гаконе (HAARP, Аляска) и Тромсе (EISCAT, Тромсе) не позволяет обеспечить необходимую ориентацию конуса рассеяния и соответственно требуемый угол захвата рассеиваемой энергии в волновод, авторы предлагают учитывать рефракцию как сопутствующий фактор, нивелирующий эту проблему.

Вместе с тем, при определенных условиях возможна реализация и другого механизма рассеяния, резонансного [15]. Кроме того, целесообразно рассмотреть механизм возбуждения ионосферного волновода, обусловленный спецификой магнитоориентированных неоднородностей, которые можно рассматривать как переизлучатели [13]. Тогда проявление того или иного механизма возбуждения волновода, а возможно и одновременная их реализация, определяется топологией магнитоориентированных неоднородностей и их положением в волноводе.

При всей значимости полученных в работах [3, 4, 21, 24, 27, 28] результатов, влиянию фоновых неоднородностей ионосферы, на наш взгляд, должного внимания не уделяется. По нашим наблюдениям, они играют существенную роль [15, 16]. Можно ожидать, что свойства возбуждающего волновода поля, в частности уровень его замираний, будет зависеть как от параметров нагревной волны и искусственных неоднородностей, так и от интенсивности фоновых неоднородностей ионосферы. Возбуждение межслоевого ионосферного волновода в цитируемых работах преследует цель организации телекоммуникационного канала, помехоустойчивость и пропускная способность которого зависит как от величины индекса мерцаний S_4 , так и отношения сигнал/шум. Последнее отношение существенно зависит от эффективности закачки информационного сигнала в ионосферный волновод.

В рассмотренных экспериментах в качестве информационного передатчика предполагается использовать одну из секций нагревного стенда. Возможна и другая схема возбуждения, когда информационный передатчик расположен на некотором удалении от нагревного стенда. В этом случае будет отличный от рассмотренного в работах характер распространения, например квазипоперечный. Следовательно, является актуальной задача исследования вариаций индекса мерцаний S_4 и интенсивности рассеяния на искусственных магнитоориентированных неоднородностях ионосферы в различных режимах работы нагревного стенда и состояния ионосферы.

Материалы и методы анализа геофизической обстановки

В ходе формирования подхода, позволяющего, по возможности, учесть факторы, определяющие поведение индекса мерцаний, использовались доступные публикации по данному направлению исследований.

Наиболее полно результаты, полезные для решения поставленной нами задачи представлены в разделе 3.4. HAARP Signals Detected at UAS [24]. При проведении этих экспериментов на HAARP применялись нагревные частоты 5,67-5,94 МГц с шагом 30 кГц.

В качестве аналога сигнала использовалась компонента искусственного радиоизлучения ионосферы DM (down shifted maximum). На станции имени академика Вернадского (Антарктида) производилась запись сигнала и оценка параметров присущих телекоммуникационным технологиям, а именно:

1. Интенсивность сигнала.
2. Отношение сигнал/шум.
3. Ширина спектра на уровне половинной мощности.
4. Индекс мерцаний S4.

Известно, что индекс мерцаний определяется как (Рекомендация МСЭ-R P. 531-12)

$$S_4 = \sqrt{\frac{(I^2) - (\bar{I})^2}{(\bar{I})^2}}$$

где I – интенсивность сигнала, а S – среднее по ансамблю.

В анализируемых экспериментах использовалась технология воздействия на гармониках гиромагнитной частоты. Известно, что гиромагнитная частота определяется, как

$$\omega_H = \frac{e \cdot B}{m}$$

где e , m – заряд и масса электрона, B – магнитная индукция поля Земли, которая является функцией геомагнитной широты и высоты. В публикации [5] показана возможность определения гиромагнитной частоты, как

$$\omega_H = 2\pi f_1 \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \sqrt{1 + 3(\sin\theta)^2}$$

где r_0 – радиус Земли, r – расстояние от центра Земли до рассматриваемой точки, θ – геомагнитная широта этой точки, $f_1 \approx 0,8$ МГц. Однако точность определения ω_H с использованием такого подхода невелика, поэтому для определения высот, соответствующих значениям частоты нагревной волны, использовали модель магнитного поля Земли IGRF-13 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/index.html>).

В работе [3] справедливо отмечено, что в отличие от падающей на ионосферу волны, траектории рассеянных на магнитоориентированных неоднородностях волн начинаются не на нижней границе ионосферного слоя, а в точке рассеяния. Следовательно, целесообразно определить положение рассеивающей области в волноводе. В ходе эксперимента частота менялась в пределах 5,67-5,94 МГц, что эквивалентно перемещению области воздействия по вертикали, в данном случае сверху вниз.

Из ионосферных данных в работе [24] используются величины критических частот и максимальной высоты слоя F2, сведения о наличии спорадического слоя и его критической частоты, и анализируются они применительно к эффективности модификации ионосферы.

В работе [4] предполагается, что волновод формируется между высотами максимумов электронной концентрации областей E и F ионосферы. Однако в течение всего времени эксперимента 6 июня 2014 года на ионограммах (<https://lgdc.uml.edu/common/DIDBDayStationStatistic?ursiCode=GA762&year=2014&month=6&day=6>) присутствует спорадический слой Es, который, как известно, отличается малой полутолщиной и большим градиентом электронной концентрации, и учитывать его влияние только как причину дополнительных потерь, наверное, будет некорректно, поскольку он может выступать в качестве одной из стенок волновода. Поэтому, исходя из ионограмм с сайта (<https://giro.uml.edu/didbase/>) наряду с величинами hmF2, hmE нами используются сведения о вариациях hEs во время эксперимента. Если объединить полученные сведения на одном графике, и показать ионограмму снятую в середине нагревного цикла, то получим следующий результат (рис. 1).

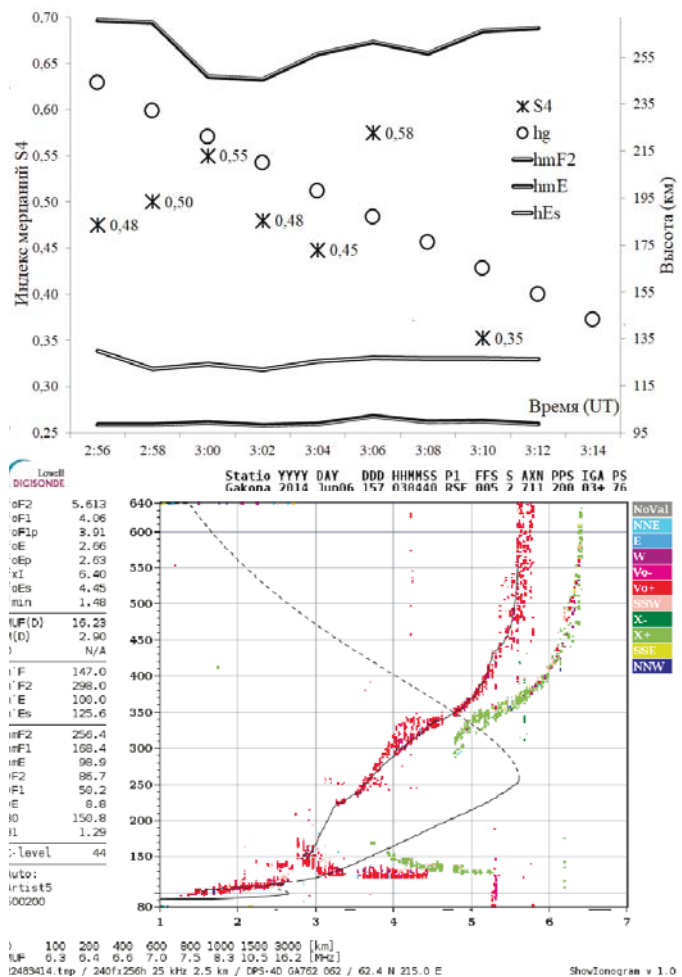


Рис. 1. Сводные данные по эксперименту 6 июня 2014 года

На рисунке символом hg обозначена высота гиромагнитного резонанса для соответствующей частоты. Видно, что во время эксперимента область воздействия перемещалась сверху вниз, при этом величина индекса мерцаний S4 менялась в пределах 0,35-0,575. Однозначных выводов о причинах такого изменения S4 сделать нельзя, поскольку в качестве пробного сигнала использовалась компонента DM искусственного радиоизлучения ионосферы, поведение которой зависит от геофизической обстановки и параметров нагревной волны.

Так, в анализируемой работе приводятся вариации интенсивности компоненты DM регистрировавшихся на удалении 15 км (лаборатория Naval Research Laboratory) от места воздействия на ионосферу, в которых прослеживается максимум интенсивности на высотах 168-186 км и её снижение при уменьшении (увеличении) высоты.

Поскольку приводимые в работе [24] значения S4 определялись на трассе протяженностью более 15000 километров, при такой постановке экспериментальных исследований нет возможности определить вклад в величину S4 рассеяния на неоднородностях ионосферы и замираний, обусловленных распространением на протяженной трассе. Поэтому на этом этапе будем считать, что вероятнее всего вариации S4 обусловлены, в том числе, модификацией рассеивающих свойств области воздействия, как следствие изменения высоты воздействия.

Если исходить из изложенного в работах, например [4], то рассеяние обусловлено преимущественно искусственными магнитоориентированными неоднородностями, как если бы фоновых неоднородностей не существовало. Однако, например, в работе [9] отмечается, что наличие естественных мелкомасштабных неоднородностей в области воздействия мощным коротковолновым радиоизлучением на ионосферу может существенно улучшить возбуждение искусственных неоднородностей, ускоряя их развитие и увеличивая уровень рассеянного на них радиосигнала. В связи с этими обстоятельствами возникает необходимость оценить вариации S_4 , обусловленные рассеянием в области активного воздействия на ионосферу и показать роль фоновых неоднородностей в процессе возбуждения ионосферного волновода.

Для определения свойств возможных механизмов рассеяния нагревной волны вдоль и поперек магнитного поля Земли предположим, что в области активного воздействия имеются преимущественно магнитоориентированные неоднородности. Тогда для случая продольного рассеяния можно использовать показанный в работе [4] подход для определения эффективного дифференциального поперечника рассеяния

$$Q(z_s) = P(z_s) \frac{\pi k_0^4}{2} C_\varepsilon^2(z_s) [1 + K_\perp^2(z_s) L_\perp^2]^{-p/2}$$

где

$$K_\perp^2(z_s) = k_0^2 \left[\sin^2 \theta_0^{(s)} + \sin^2 \theta_0 + (\sin \theta_0^{(s)} \cos \varphi^{(s)} - \sin \theta_0 \cos \varphi^{(i)})^2 \frac{h_{0x}^2}{h_{0z}^2} - 2 \sin \theta_0^{(s)} \sin \theta_0 \cos(\varphi^{(i)} - \varphi^{(s)}) \right]$$

$$C_\varepsilon^2(z_s) \sim \sigma_\varepsilon^2(z_s) = \frac{\omega_p^4(z_s) \sigma_N^2(z_s)}{\omega^4 N_0^2(z_s)}$$

$$P(z_s) = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\vec{k}^{(s)}(z_s) \vec{k}^{(i)}(z_s) \right)^2 / k^4(z_s) \right]$$

θ_0 – угол падения волны на нижнюю границу ионосферы, $\theta_0^{(s)}$ $\varphi^{(s)}$ $\varphi^{(i)}$ – углы, определяющие ориентацию волновых векторов рассеянного (индекс s) и падающего (индекс i) полей в точке рассеяния z_s , ω_p – плазменная частота; ω – частота падающей электромагнитной волны; $\vec{k}^{(s)}(z_s)$, $\vec{k}^{(i)}(z_s)$, $k(z_s)$ – волновые векторы рассеянной, падающей на неоднородность и основание ионосферы волн; $\sigma_N^2(z_s)$ – дисперсия флуктуаций электронной концентрации δn ; $N_0(z_s)$ – регулярный высотный профиль электронной концентрации; $3 < p < 4$; $K_\perp$ – поперечная (относительно направления геомагнитного поля) составляющая вектора рассеяния $\vec{K}$, $L_\perp$ – поперечный размер ионосферной неоднородности.

Из анализа приведенных формул можно сделать вывод об отсутствии признаков резонансных явлений в случае продольного рассеяния. Учитывая, что продольные размеры единичной неоднородности меньше длины волны, для оценки связи интенсивностей падающей и рассеянной компоненты можно использовать полученное в работе [1] выражение

$$\frac{I_s}{I_0} \approx \frac{1}{\lambda^4}$$

где I_0 – интенсивность падающей волны; I_s – интенсивность рассеянной волны; λ – длина волны. Следовательно, в этом случае степень коррелированности вариаций падающей и рассеянной должна быть значительной.

Для случая поперечного рассеяния механизм формирования результирующего поля иной (его описание можно найти

в работах [13, 15]). В этом случае необходимо учитывать вариации направленных свойств единичной неоднородности $F_n(\theta)$ и коллективное переизлучение системы неоднородностей $F_p(\theta)$. Результирующую интенсивность поля переизлученного областью магнитоориентированных неоднородностей в этом случае можно определить как

$$F(\theta) = F_n(\theta) * F_p(\theta).$$

Если рассматривать магнитоориентированную неоднородность, как элементарный излучатель то для определения рассеянного на тонком проводнике поля необходимо знать распределение тока в нём, порожденное падающей волной. Например, в [10] для определения распределения тока в проводе, ориентированном вдоль оси z используется выражение

$$I(z) = I_0 \{ [\cos kz \cos(kl \cos \theta) - \cos kl \cos(kz \cos \theta)] + A [\sin kz \sin(kl \cos \theta) - \sin kl \sin(kz \cos \theta)] \}$$

где I_0 – ток в начале проводника, l – длина проводника, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; θ – угол, отсчитываемый от оси z . Если принять $\theta = 0$, то распределение тока вдоль провода примет вид

$$I(z) = I_0 \{ [\cos kz - \cos kl] \},$$

что характерно для распределения тока в вибраторе. Для вибратора диаграмма направленности в горизонтальной плоскости, в нашем случае плоскости параллельной силовым линиям магнитного поля Земли, может быть определена, как

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta}$$

Заметим, что подобный подход нашел применение в особом классе антенн, называемых плазменными, которые отличаются от обычных вибраторных антенн тем, что металлический проводник заменяется плазмой в диэлектрической трубке [6, 8, 12, 17].

В работе [15] для оценки свойств коллективного переизлучения магнитоориентированных неоднородностей использовалось выражение, характерное для синфазных решеток. Поскольку эти неоднородности расположены в пространстве случайным образом, корректнее будет использовать выражение для диаграммы направленности, формируемой системой излучателей, возбуждаемых неравномерно с фазовым набегом, которая может быть определена как [7]

$$F_p(\theta) = \frac{\sin \left(0.5 n k d \left(\sin \theta + \frac{\lambda}{n d} \right) \right)}{n \sin \left(0.5 k d \left(\sin \theta + \frac{\lambda}{n d} \right) \right)}$$

где n – число излучателей, λ – длина волны, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, d – расстояние между неоднородностями, θ – угол наблюдения. Предположим, что n и λ фиксированные величины, тогда диаграмма излучения определяется отношением расстояния между неоднородностями к длине волны и для поперечного направления очевиден резонансный механизм переизлучения.

Наличие в этом механизме случайных размеров неоднородностей и расстояний между ними, а также резонансных явлений позволяет предположить, что степень коррелированности между мощностью нагревной волны и интенсивностью рассеянной компоненты будет меньше, чем в случае продольного рассеяния.

При определении генезиса вариаций индекса мерцаний вначале определим наиболее вероятный сценарий их формирования. Как правило, таковыми принято считать интерференционный и поляризационный механизмы. В анализируемых экспериментах используется селективное поляризационное возбуждение магнитоионных компонент волнами круговой поляризации (излучение производится в магнитный зенит).

Нами показано [16], что в условиях спокойного магнитного поля Земли селективное поляризационное возбуждение реализуется в полной мере. Параметры магнитного поля Земли приведем позже, а здесь заметим, что в течении 23-25 июня 2020 года магнитное поле Земли было спокойным. Поскольку в экспериментах используется излучение круговой поляризации, нет причин для поляризационных замираний в пункте приема. Следовательно, наиболее вероятным является интерференционный механизм формирования замираний.

В выражении для $F_p(\theta)$ присутствуют величины d – расстояние между неоднородностями и n – количество неоднородностей, при этом λ величина в нашем случае фиксированная. Расстояния между неоднородностями являются случайными величинами, динамика изменения которых определяется скоростью перемещения неоднородностей. Количество неоднородностей, находящихся в области активного воздействия, в определенной степени тоже зависит от скоростей входящих и выходящих из неё неоднородностей.

Таким образом, наиболее вероятной причиной вариаций результирующего рассеянного поля является движение неоднородностей. При этом в большей степени замирания должны проявляться при поперечном рассеянии и в меньшей степени в пункте наблюдения продольного рассеяния нагревной волны.

Предположим, что область активного воздействия преимущественно заполнена искусственными магнитоориентированными неоднородностями, а фоновая электронная концентрация ионосферы мала настолько, что интенсивность естественных неоднородностей будет незначительна по сравнению с интенсивностью искусственных. Тогда, исходя из вышеприведенного анализа свойств рассеянной волны, наблюдаемой в пунктах поперечного и продольного переизлучения они должны иметь следующие признаки

1. Величина индекса мерцаний рассеянной нагревной волны в пункте наблюдения поперечного рассеяния больше, чем в пункте наблюдения продольного.
2. Корреляция вариаций S4 в двух пунктах значительна.
3. Корреляция мощности нагревной волны и интенсивности рассеянной компоненты в двух пунктах отличается, при этом в пункте наблюдения поперечного рассеяния она меньше.

В случае наличия в ионосфере естественных неоднородностей велика вероятность маскирования рассеяния на магнитоориентированных неоднородностей рассеянием на других естественных неоднородностях. В результате указанные выше признаки будут существенно трансформироваться. Подобная картина маскировки искусственных процессов естественными наблюдалась нами при исследовании селективного поляризационного возбуждения характеристических волн в ионосфере [13].

Экспериментальные наблюдения и обсуждение гипотезы

Для проверки этой гипотезы воспользуемся методом [14], основанным на использовании технологии SDR, что позволяет осуществить многопозиционную диагностику области активного воздействия на ионосферу.

Приемники SDR имеют принципиальное отличие от обычных радиоприемников, как в части реализации, так и доступа к ним. В этой технологии сигнал, поступающий из антенны, подвергается дискретизации, и дальнейшая его обработка происходит в цифровом виде. При меньшей чувствительности SDR-приемников, технология позволяет установить одинаковый коэффициент усиления приемного тракта нескольких приемников, находящихся в разных пунктах. Если взять две однотипные приемные антенны и два однотипных SDR-приемника, то их можно использовать для наблюдений без предварительной калибровки.

Безусловным достоинством технологии является дистанционный доступ и управление приемником, запись сигнала в формате “wave” с последующим его скачиванием. Из записей в формате “wave” с использованием анализатора спектра получаем информацию об амплитуде и частоте нагревной волны. При этом размер быстрого преобразования Фурье (FFT size) выбирается максимально возможным, что позволяет увеличить спектральное разрешение. Для исключения возможного отклонения частоты используется режим USB – однополосная модуляция верхней боковой полосы. Для проверки стабильности частоты и отсутствия нелинейности приемников используются сигналы передатчика точного времени RWM, расположенного в Москве.

Расположение приемников выберем таким образом, чтобы они находились в пределах прямой видимости области активного воздействия на ионосферу и обеспечивали условия наблюдения близкие к квазипродольному типу распространения рассеянной волны для одного пункта наблюдения и квазипоперечному для другого пункта. Из имеющихся в сети SDR «Kiwi» приемников наиболее пригодными, с учетом их параметров [14], оказались расположенные в пунктах Umea (удаление 649 км, азимут 171°) и Arctic (удаление 413 км, азимут 69°). Ситуационная схема исходя из магнитного склонения в Тромсе и средней высоты воздействия 200 км выглядит как показано на рисунке 2.

Из рисунка видно, что в пункте Umea реализуется квазипоперечное, а в пункте Arctic квазипродольное распространение. Таким образом, в пункте Umea имеется возможность наблюдать резонансное переизлучение нагревной волны, а в Arctic ракурсное.

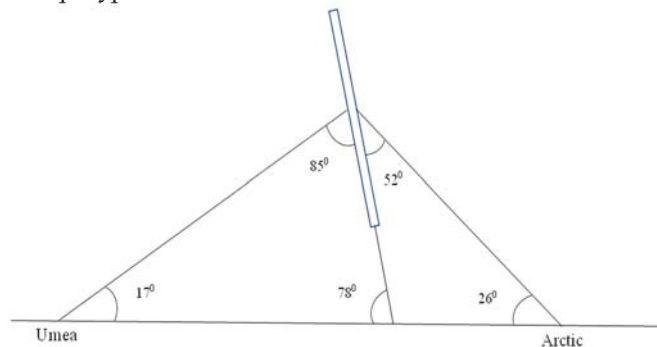


Рис. 2. Ситуационная схема организации наблюдений

Для самостоятельного проведения экспериментов на нагревном стенде EISCAT у нас нет возможностей, поэтому используем возможности других исследователей. Так в период с 23 по 26 июня 2020 года на нагревном стенде EISCAT в рамках Программы научного сотрудничества между Украиной и научной ассоциацией EISCAT специалистами Харьковского радиоастрономического института проводились исследования по модификации ионосферы в окрестностях третьей гармоники гиромангнитной частоты [https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?fileName=202005263589&Start=1900&End=2130].

В ходе экспериментов, если исходить из информации, размещенной на сайте, планировалось создание искусственной ионосферной турбулентности и формирование искусственных ионосферных слоев. Предполагалось изучить распространение коротковолновых сигналов на большие расстояния путем рассеяния их на искусственной ионосферной турбулентности. Одновременная регистрация сигналов проводилась в окрестностях Тромсе, на Шпицбергене, Украине и украинской антарктической станции.

Эксперименты в дни, указанные на сайте (https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?fileName=202005263589&Start=1900&End=2130) проводились ежедневно с 18 до 21 часа мирового времени в три этапа, каждый продолжительностью в один час.

1 этап. С 18 до 18.30 и с 18.30 до 19.00 мирового времени нагрев производился циклами 1 минута нагрев, 1 минута пауза. Частота изменялась от 4 до 4,14 МГц с шагом 10 кГц. Мощность не менялась.

2 этап. С 19 до 19.30 и с 19.30 до 20.00 мирового времени нагрев производился циклами 55 секунд малой мощностью, 5 секунд пауза, 1 минута повышенной мощностью, 1 минута пауза. Частота изменялась от 3,9 до 4,17 МГц с шагом 30 кГц.

3 этап. С 20.00 до 20.30 и с 20.30 до 21.00 мирового времени. Нагрев производился на одной частоте 3,85 МГц. В разные дни поляризационная и энергетическая схемы экспериментов существенно отличались.

Для решения поставленной нами задачи в большей степени подходят эксперименты, проводившиеся на третьем этапе, поскольку нагрев производился на фиксированной частоте. Однако заметим, что и на этом этапе постановка экспериментов в первые два дня не в полной мере соотносилась с нашими задачами. Так, 23 июня в ходе экспериментов изменялась поляризация излучаемой волны, с одновременным изменением мощности. 24 июня при фиксированной поляризации случайным образом изменялась мощность нагревной волны. И только 25 июня эксперименты проводились с одной поляризацией (обыкновенная волна) и изменением мощности по определенному алгоритму. Поскольку особого выбора у нас нет, для анализа мы используем записи третьего этапа во все три дня экспериментов.

Геофизическая обстановка на момент проведения эксперимента 23 июня характеризуется спокойным магнитным полем Земли $K_p = 0 + \div 1 -$, $Dst = +6$. Интенсивность солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см составляла $F10.7_{obs} = 67,1$ (https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/). Критическая частота слоя F2= 4.2 МГц, $F_{min}=2,15$ МГц. Частота нагревной волны составляла 3850 кГц, что соответствует третьей гармонике гиромангнитной частоты для высоты 376 км.

Этап разбит на циклы длительностью 12 минут. 23 июня, в цикле происходило излучение обыкновенной и необыкновенной волн длительностью 4 минуты, а между ними двухминутное излучение меньшей мощности, вероятнее всего линейной поляризации. Из алгоритма проведения эксперимента следует, что на этом этапе исследовалась степень турбулентности ионосферной плазмы в зависимости от поляризации излучаемой волны. В результате обработки записей, произведенных в пунктах Arctic и Umea 23 июня 2020 года в интервале 20:00 - 20:12, получены вариации S_4 , показанные в верхней части рисунка 3. На этом же рисунке показана ионограмма Тромсе.

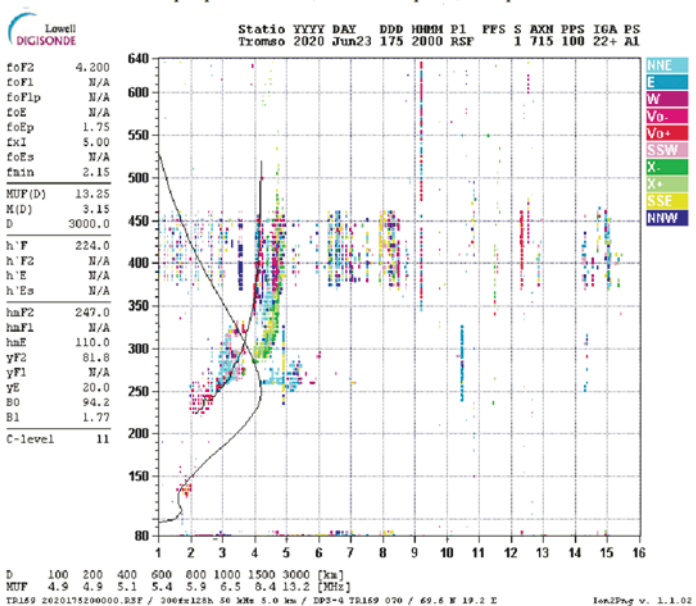
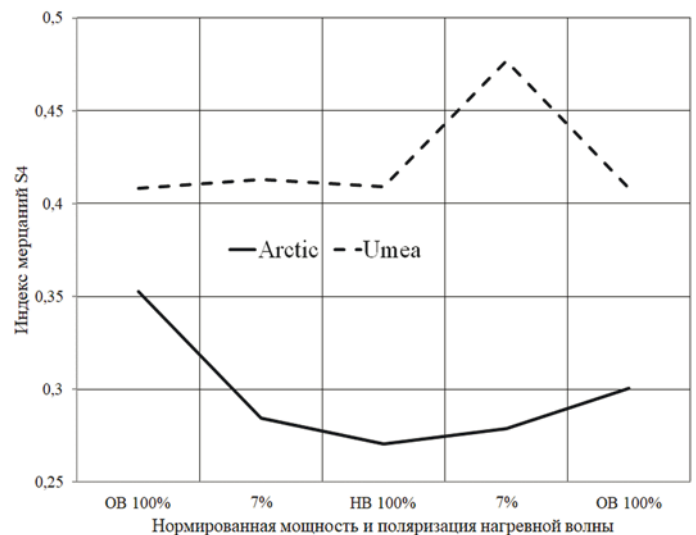


Рис. 3. Вариации индекса S_4 и ионосферная обстановка в 20:00 23 июня 2020 года

Из рисунка видно, что характер изменения индекса мерцаний S_4 в пунктах Arctic и Umea существенно отличается. Так при излучении волны обыкновенной поляризации со 100% мощностью в пункте Arctic величина S_4 , практически не изменилась, а в Umea она существенно трансформировалась. В изменении замираний в целом проявляется ранее установленная закономерность [18] — нагревная волна, согласованная по

поляризации с обыкновенной магнитоионной компонентой, вызывает большую турбулентность. Однако, проявляется эта закономерность в большей степени в Umea.

Кроме того, коэффициенты корреляции между интенсивностью наблюдаемого излучения и мощностью нагревной волны составили в Arctic 0,9 и 0,7 в Umea, что в совокупности дает основания полагать, что механизмы формирования полей в этих пунктах значительно отличаются. На ионограмме обращает на себя внимание наличие F-рассеяния, которое может маскировать рассеяние на искусственных магнитоориентированных неоднородностях ионосферы, что не позволяет в полной мере проявиться признакам переизлучения характерным для магнитоориентированных неоднородностей перечисленным выше.

24 июня 2020 года изменилась схема проведения эксперимента. Излучалась волна обыкновенной поляризации с мощностью которая изменялась по схеме 13%-100%-5%-38%-20%-50%. Геофизическая обстановка на момент проведения эксперимента практически не отличается от предыдущего дня: $K_p = 1 - \div 0 +$; $Dst = +3$; $F10.7_{obs} = 66,9$. Критическая частота слоя F2= 3.475 МГц, $F_{min}=1,9$ МГц. На рисунке 4 показаны вариации индекса мерцаний S_4 в эксперименте.

Из рисунка видно, что интервал изменений индекса S_4 для пунктов наблюдений практически одинаков, но характер изменения существенно отличается. Коэффициенты корреляции между интенсивностью наблюдаемого излучения и мощностью нагревной волны составили в Arctic 0,99 и 0,84 в Umea, что выше аналогичных значений за предыдущие сутки. На ионограмме развито как в предыдущие сутки, F – рассеяния, не наблюдается, что вероятнее всего сказалось на характере изменений индекса мерцаний и увеличении степени коррелированности между мощностью нагревной волны и интенсивностью регистрируемого излучения.

25 июня 2020 года поляризация нагревной волны по-прежнему согласована с обыкновенной магнитоионной компонентой, однако изменился шаг, с которым происходило изменения мощности нагревной волны. Мощность менялась по схеме 100%-40%-100%-40%-100%. Геофизическая обстановка практически не претерпела изменений $K_p = 0 \div +1 -$; $Dst = +2$; $F10.7_{obs} = 68,9$, а ионосферная обстановка изменилась существенно (рис. 5).

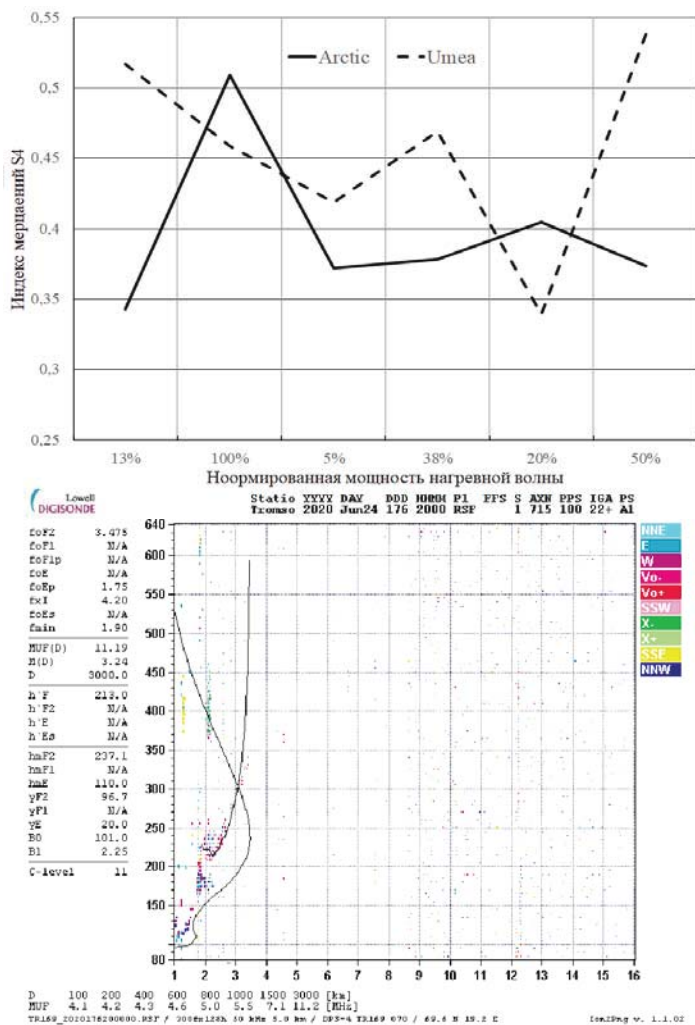


Рис. 4. Вариации индекса S_4 и ионосферная обстановка в 20:00 23 июня 2020 года

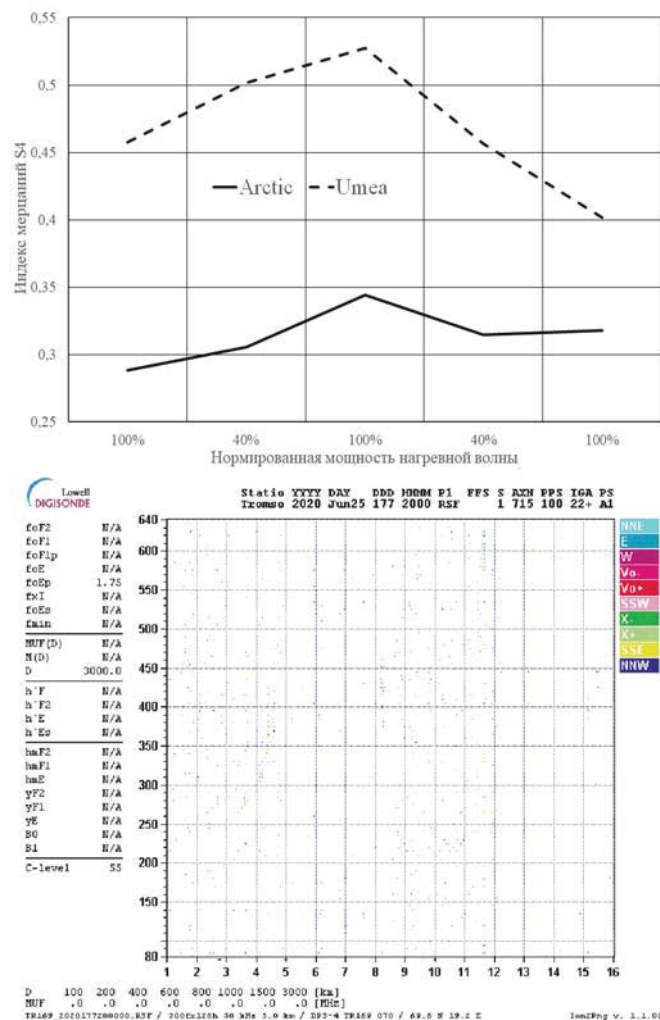


Рис. 5. Вариации индекса S_4 и ионосферная обстановка в 20:00 25 июня 2020 года

Критические и минимальные частоты в этот промежуток времени не определялись. Можно предположить, что в этом случае рассеяние нагревной волны преобладающе происходило на искусственных магнитоориентированных

неоднородностях ионосферы и такая геофизическая обстановка позволила в большей степени проявиться особенностям рассеяния на магнитоориентированных неоднородностях. В частности, коэффициент корреляции между интенсивностью наблюдаемого излучения и мощностью нагревной волны в Umea уменьшился до 0,63, а в Arctic увеличился до 0,997, что соответствует сделанному нами предположению о влиянии механизма переизлучения на степень коррелированности этих параметров.

Поскольку мы предположили, что основной причиной замираний является движение неоднородностей, целесообразно оценить вариации доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) в двух пунктах наблюдения. На рисунке 6 показаны вариации ДСЧ 25 июня 2020 года при 100% мощности нагревной волны на разных этапах нагрева и соответственно, разных значениях индекса мерцаний S_4 . На графиках прослеживается группирование величин ДСЧ вокруг нескольких значений, вероятность реализации которых коррелирует с уровнем индекса мерцаний S_4 , при этом большему значению S_4 соответствует больший динамический диапазон значений ДСЧ.

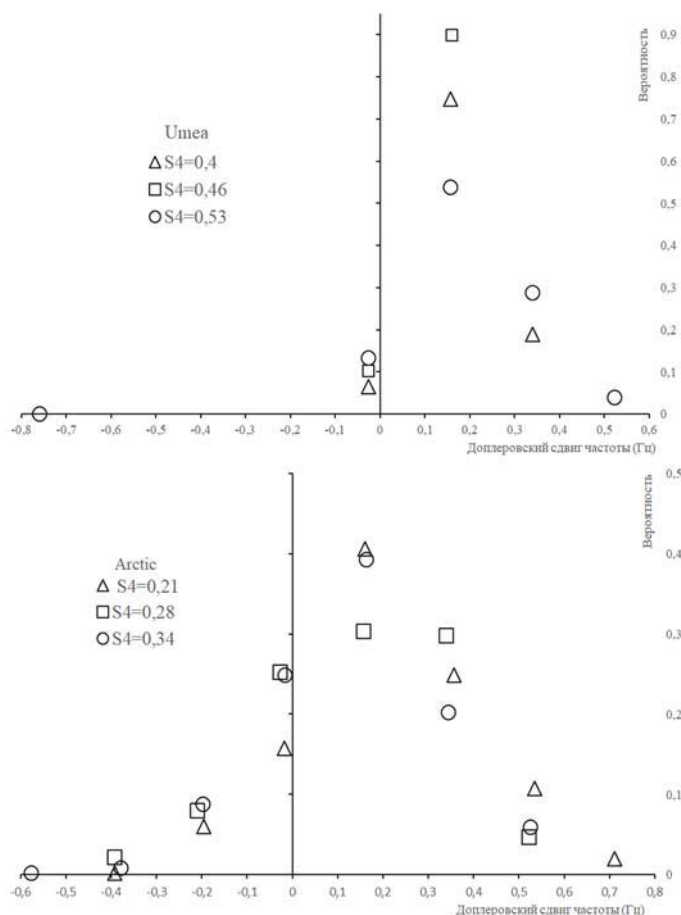


Рис. 6. Сравнение распределений доплеровского сдвига частоты 25 июня 2020 года

Отметим, что при схожих диапазонах значений ДСЧ в пунктах наблюдения, вероятность реализаций дискретных значений и их количество в Arctic и Umea заметно отличаются. Следовательно, предположение о движении магнитоориентированных неоднородностей как приоритетной

причине вариаций S_4 , его величине и изменчивости можно считать обоснованным.

Величины индекса мерцаний, полученных на протяженной трассе [24] и измеренных нами в пределах прямой видимости области модификации сопоставимы, что может свидетельствовать о том, что основной вклад в уровень замираний вносит механизм рассеяния в зоне активного воздействия на ионосферу. Если оценить степень коррелированности вариаций интенсивности рассеянной нагревной волны в двух пунктах наблюдения, то окажется, что 23 июня $r = 0,75$; 24 июня $r = 0,88$ и 25 июня $r = 0,65$.

Изменения в степени корреляции вероятнее всего объясняется уменьшением интенсивности F-рассеяния и проявлением 25 июня свойств поля рассеянного преимущественно на магнитоориентированных неоднородностях. Корреляция вариаций S_4 в двух пунктах при тех же условиях выглядит иначе: 23 июня $r = -0,34$; 24 июня $r = -0,24$; 25 июня $r = 0,39$. Существенное изменение характера корреляции вариаций S_4 25 июня по сравнению с 23 и 24 июня, вероятнее всего объясняется низкой электронной концентрацией и минимальным присутствием неоднородностей естественного происхождения, что увеличивает проявление свойств искусственных магнитоориентированных неоднородностей.

Изложенный выше анализ делает возможным утверждение, что предложенная нами модель взаимодействия магнитоориентированных неоднородностей с нагревной волной позволяет объяснить:

- отличие вариаций S_4 в разных пунктах наблюдения разным механизмом переизлучения: в направлении Arctic ракурсным, а Umea резонансным;
- изменение корреляции S_4 с отрицательной на положительную при изменении геофизической обстановки – степенью интенсивности естественных неоднородностей ионосферы.

Изменение частоты нагревной волны, приводит к изменению высоты активного воздействия и модифицирует условия возбуждения межслоевого волновода, что может повысить эффективность его запитки. Следовательно, целесообразно проследить будут ли проявляться установленные закономерности поведения S_4 в этом случае. Для решения этой задачи вполне подходят эксперименты, проводившиеся в интервале времени 18.00-19.00 UT. Однако, в силу отсутствия полной информации о содержании экспериментов, что не позволило сразу же определить алгоритм перестройки SDR приёмников, ограниченного количества слотов у них нам не удалось сделать в полном объеме записи в эти интервалы времени.

Из имеющихся в нашем распоряжении данных наиболее подходящими оказались записи, относящиеся к экспериментам проводившимися на EISCAT в сентябре 2020 года по программе «Stimulated Electromagnetic Emissions on the Second Harmonic» (<https://portal.eiscat.se/schedule/?year=2020&month=9&S=on&TRO=on&VHF=on&KST=on&KIR=on&SOD=on&ESR=on&HEA=on>). Целью этих экспериментов, как указано на сайте (<https://portal.eiscat.se/schedule/comment.cgi?fileName=2020090923151&Start=0900&End=1300>), являлось изучение искусственного радиоизлучения ионосферы на второй гармонике гиромангнитной частоты.

Сообщалось, что нагревной стэнд будет работать на частоте около 5,4 МГц с поляризацией, согласованной с обыкновенной волной.

В ходе экспериментов предполагалось изменение мощности нагревной волны и угла излучения в вертикальной плоскости.

9 сентября с 9 часов UT нами проводилась запись излучений нагревной волны в пунктах Arctic и Umea. Из анализа записей следует, что эксперимент проводился циклами по 40 минут. В цикле частота изменялась от 3953 до 4353 кГц с шагом 20 кГц. Номиналы частот соответствуют третьей гармонике гиромангнитной частоты для высот от 311 до 77 км. Шаг в 20 кГц соответствует изменению по высоте в среднем около 12 км. Длительность нагрева на одной частоте составляла 1 минуту. Пауза также была равна одной минуте. Мощность нагревной волны в цикле не менялась. Геофизическая обстановка на момент проведения экспериментов 9 сентября 2020 года характеризуется спокойным магнитным полем Земли $K_p = 0$, $Dst=0$. Интенсивность солнечного излучения на длине волны 10,7 см составляла $F10.7_{obs} = 69,7$. Таким образом геофизическая обстановка в экспериментах июня и сентября 2020 года практически не отличается.

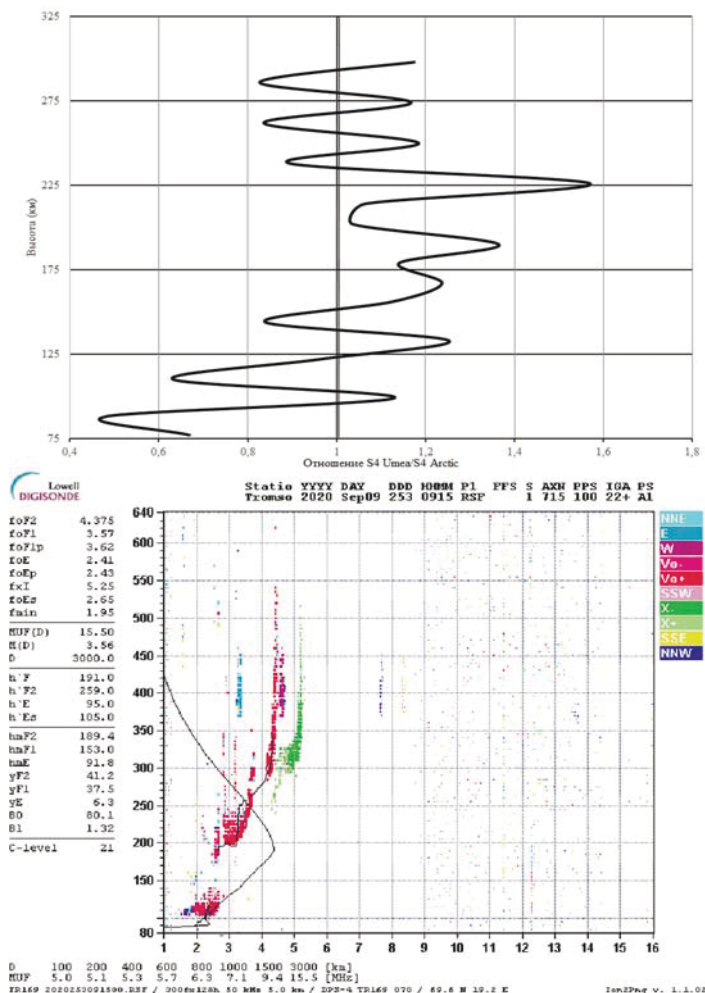


Рис. 7. Сопоставление индексов S4 в эксперименте 9 сентября 2020 года с 09:55 до 10:35 UT

Для анализа результатов эксперимента предлагаем использовать не абсолютное значение вариаций S_4 , а отношение индекса, наблюдаемого в Umea, к этому же параметру, полученного для пункта наблюдения Arctic.

Тогда, исходя из результатов предыдущих наблюдений можно полагать, что, когда отношение этих величин больше единицы, преобладает переизлучение обусловленное магнитоориентированными неоднородностями. В противном случае, роль магнитоориентированных неоднородностей в формировании поля рассеянной нагревной волны незначительна. На рисунке 7 и 8 приводятся отношения индексов S_4 для экспериментов, проводившихся в промежутки времени 09:55-10:35 и 10:35-11:15. На этих же рисунках приводятся ионограммы полученные в 09:15 и 11:00 9 сентября 2020 года в Тромсе.

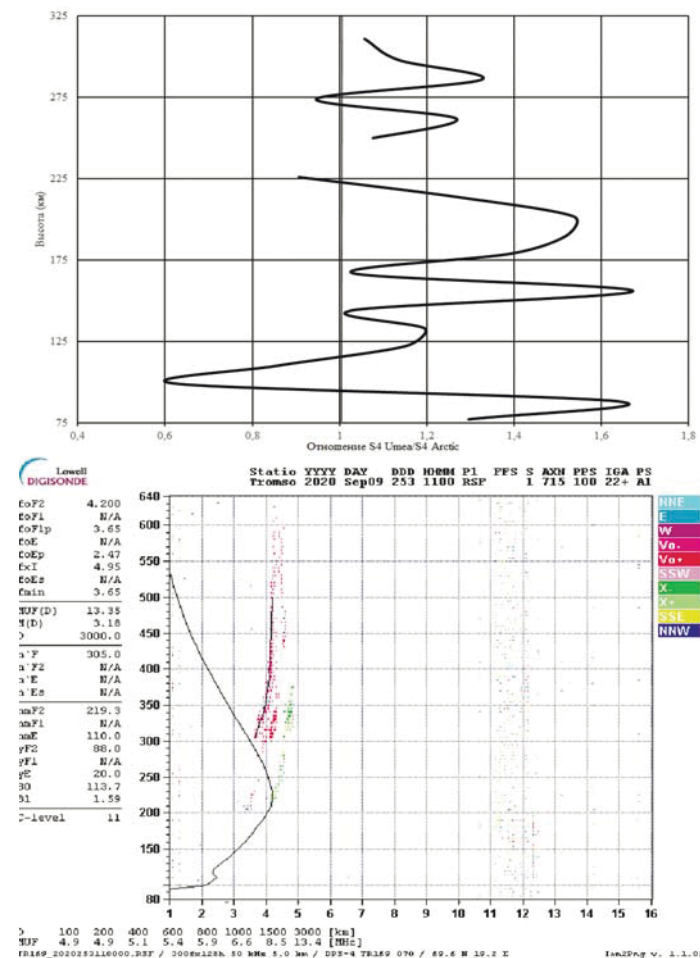


Рис. 8. Сопоставление индексов S4 в эксперименте 9 сентября 2020 года с 10:35 до 11:15 UT

Из рисунков видно, что при изменении ионосферной обстановки меняется отношение $S_4 Umea / S_4 Arctic$, что может свидетельствовать об изменении вклада в рассеяние нагревной волны искусственными магнитоориентированными неоднородностями ионосферы. Кроме того, на рисунках прослеживается тенденция в изменении индекса мерцаний с изменением частоты (высоты гиромангнитного резонанса) аналогичная полученной в эксперименте [24], рисунок 1.

Заключение

Анализ опубликованных и полученных путем самостоятельных наблюдений данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Свойства магнитоориентированных неоднородностей, а также направление рассеяния в котором выполняется условие захвата в межслоевой волновод существенно влияют на величину индекса мерцаний рассеянной нагревной волны.

2. Скорость перемещения магнитоориентированных неоднородностей является определяющим фактором в формировании замираний рассеянной на магнитоориентированных неоднородностях нагревной волны.

3. Использование в качестве передатчика информационного сигнала секции нагревного стенда ограничивает возможности оптимального возбуждения межслоевого волновода.

4. Состояние ионосферы значительно влияет на величину S_4 , что делает необходимым учитывать не только рассеяние на искусственных магнитоориентированных неоднородностях ионосферы, как описано в работах [3, 4, 21, 24, 27, 28], но и на естественных.

Литература

1. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 564 с. 1972.
2. Безродный В.Г., Воткинс Б., Галушко В.Г., Гровс К., Кащеев А.С., Чаркина О.В., Ямпольский Ю.М. Наблюдение ионосферных мерцаний дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ радиометра // Радиофизика и радиоастрономия. Т.12. № 3. С. 242-260. 2007.
3. Безродный В.Г., Галушко В.Г., Райниш Б.В. Ракурсное рассеяние ВЧ радиоволн на магнитоориентированных неоднородностях плоскостной ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. Т.16. № 1. С. 33-42. 2011.
4. Галушко В.Г., Безродный В.Г., Колосков А.В., Зализовский А.В. О возможном механизме "эффекта саморассеяния" мощных ВЧ сигналов в ионосфере // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 17. № 2. С. 112-124. 2012.
5. Гершман Б.Н., Угаров В.А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // УФН. Т.72. № 2. С. 235-271. 1960.
6. Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Рухадзе А.А. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной // Физика плазмы. Т.32. № 5. С. 423-435. 2006.
7. Карлов В.Д., Кириченко Ю.В., Артеменко А.Н., Бесова О.В. Особенности формирования диаграмм направленности плазменной антенны с азимутально-несимметричными бегущими волнами тока. // Системи управління, навігації та зв'язку. Т.2. № 48. С.158-163. 2018.
8. Кириченко Ю.В., Лонин Ю.Ф., Онищенко И.Н. Плазменная антенна бегущей волны // Известия вузов. Радиоэлектроника. Т. 54, № 11. С. 35-39. 2011.
9. Коровин А.В. О влиянии мелкомасштабных естественных неоднородностей верхней ионосферы на развитие искусственных неустойчивостей // Известия вузов. Радиофизика. Т. 27. № 10. С. 1339-1340. 1984.
10. Менцер Д.Р. Дифракция и рассеяние радиоволн. М.: Советское радио, 148 с. 1958.
11. Рекомендация МСЭ-R P. 531-12. Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем.
12. Сергейчев К.Ф., Минаев И.М. Плазменные антенны на поверхностных электромагнитных волнах. // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. Т. 70. С. 143-185. 2014.
13. Сивоконь В.П. Магнитоориентированные неоднородности – ионосферная система переизлучателей // Известия высших учебных заведений. Физика. Т.59. № 12-3. С. 56-60. 2016.
14. Сивоконь В.П. Новый метод исследования магнитоориентированных неоднородностей ионосферы с использованием программы определения радиосистем // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. № 2. С. 242-249. 2020.
15. Сивоконь В.П. Обратное рассеяние дециметровых волн на магнитоориентированных неоднородностях ионосферы. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 3. С. 343-352. 2017.
16. Сивоконь В.П., Дружин Г.И. Геомагнитный фактор DST-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 46. № 4. С. 521-524. 2006.
17. Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S. et.al. Experimental and theoretical results with plasma antennas // IEEE Transaction on plasma science. Vol. 34. No. 2. P. 166-172. 2006.
18. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Rietveld M.T., Ivanova I.M., and Baddeley L.J. Artificial smallscale fieldaligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X mode HF heater wave. Geophysical research letters. Vol. 38. L08802. doi:10.1029/2011GL046724. 2011.
19. Booker H.G. A theory of scattering by nonisotropic irregularities with application to radar reflections from aurora // J. Atmos. Terr. Phys. Vol. 8. № 4/5. P. 204-221. 1956.
20. Bourdillon A., Haldoupis C., and Delloe J. High-frequency Doppler radar observations of magnetic aspect sensitive in the midlatitude E region ionosphere // J. Geophys. Res. Vol. 100. doi:10.1029/95JA01079.1995.
21. Galushko V.G., Bezrodny V.G., Koloskov A.V., Paznukhov V.V., Reinisch B.W. HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere // Radio science. Vol. 48. doi:10.1029/2012RS005072. 2013.
22. Gurevich A.V., Erukhimov L.M., Kim V.Yu., Uryadov V.P., Tsedilina E.E. Influence of scattering on radiowave trapping in ionospheric waveguides // Radiophys. Quantum Electron. Vol. 18. doi:10.1007/BF01038192.1975.
23. Lyon G.F. The anisotropy of ionospheric irregularities deduced from VHF scatter measurements // J. Atmos. Terr. Phys. V. 27. P. 1213-1216. 1965.
24. Najmi A., et al. Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP // J. Geophys. Res. Space Physics. V.120. doi:10.1002/2015JA021341. 2015.
25. Ponomarenko P.V., Leyser T.B., Thide B. New electron gyroharmonic effects in the HF scatter from pumpexcited, field-aligned ionospheric irregularities // J. Geophys. Res. V.104(A5). doi:10.1029/1999JA900039.1999.
26. Rao P.B., Thorne G.D. A model for RF scattering from field-aligned heater-induced irregularities // Radio Science. Vol. 9. No. 11. P. 987-996. 1974.
27. Yampolski Y., Milikh G., Zalizovski A., Koloskov A., Reznichenko A., Nossa E., Bernhardt P.A., Briczinski S., Grach S.M., Shindin A., Sergeev E. Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation // Front. Astron. Space Sci. Vol. 6. No. 12. doi:10.3389/fspas.2019.00012. 2019.
28. Zalizovski A.V., Kashcheyev S.B., Yampolski Y.M., Galushko V.G., Belyev V., Isham B., Rietveld M.T., La Hoz C., Brekke A., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A. Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence. Radio science. Vol. 44. doi:10.1029/2008RS004111. 2009.

EVALUATION OF THE S_4 SCINTILLATIONS INDEX IN TRANSCONTINENTAL DECAMETER RADIO LINES

Vladimir P. Sivokon, Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia;
Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Paratunka village, Russia, vsivokon@mail.ru

Abstract

On the HAARP and EISCAT heating stands, to solve a number of applied problems, studies are being carried out on the excitation of an interlayer ionospheric waveguide. The success of the implementation of these tasks depends on many factors, including the level of fading of the electromagnetic field in the waveguide, to assess the variations of which researchers use the scintillation index S_4 . The waveguide excitation model proposed by the experimenters is based on the perspective "self-scattering effect" on artificial magnetically oriented irregularities of the ionosphere. However, within the framework of this approach, the possibility of the existence of other mechanisms of excitation of the waveguide and the influence of the geophysical environment on this process is not taken into account. To test this assumption, we use multi-position diagnostics based on SDR technology. Measurements on quasi-longitudinal and quasi-transverse paths with respect to the Earth's magnetic field line, as well as under different geophysical conditions, showed a significant difference in the variations of the scintillation index S_4 and the intensity of the scattered wave. The results obtained can be used in the problems of optimizing schemes for pumping an information signal into an interlayer ionospheric waveguide.

Keywords: interlayer ionospheric waveguide, scintillation index, geophysical environment

References

1. Allexeff I., Anderson T., Parameswaran S. et al. (2006) Experimental and theoretical results with plasma antennas. *IEEE Transaction on plasma science*. Vol. 34. No. 2. P. 166-172.
2. Alpert Ya.L. Propagation of electromagnetic waves and the ionosphere. Moscow: Nauka, 564 p. 1972.
3. Bezrodny V. G., Galushko V. G., Reinisch B. V. (2011) Angle scattering of HF radio waves on magnetically oriented inhomogeneities of a flat-layered ionosphere. *Radiophysics and Radio Astronomy*. Vol.16. No. 1. P. 33-42.
4. Bezrodny V. G., Votkins B., Galushko V. G., Groves K., Kashcheev A. S., Charkina O. V., Yampolsky Yu. M. (2007) Observation of ionospheric scintillations of discrete space sources using a panoramic RF riometer. *Radiophysics and radio astronomy*. Vol.12. No. 3. P. 242-260.
5. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Yeoman T. K., Rietveld M. T., Ivanova I. M., and Baddeley L. J. (2011) Artificial smallscale fieldaligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X mode HF heater wave. *Geophysical research letters*. Vol. 38. L08802. doi:10.1029/2011GL046724.
6. Booker H.G. (1956) A theory of scattering by nonisotropic irregularities with application to radar reflections from aurora. *J. Atmos. Terr. Phys.* Vol. 8. No. 4/5. P. 204-221.
7. Bourdillon, A., C. Haldoupis, and J. Delloue (1995) High-frequency Doppler radar observations of magnetic aspect sensitive in the midlatitude E region ionosphere. *J. Geophys. Res.* Vol. 100. doi:10.1029/95JA01079.
8. Galushko V. G., Bezrodny V. G., Koloskov A. V., Paznukhov V. V. And Reinisch B. W. (2013) HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere. *Radio science*. Vol. 48. doi:10.1029/2012RS005072.
9. Galushko V.G. et al., Bezrodny V.G., Koloskov A.V., Zalozovski A.V. (2012) On the possible mechanism of the "self-scattering effect" of high-power RF signals in the ionosphere. *Radio Physics and Radio Astronomy*. Vol. 17. No. 2. P. 112-124.
10. Gershman B.N., Ugarov V.A. (1960) Propagation and generation of low-frequency electromagnetic waves in the upper atmosphere. *UFN*. Vol.72. No. 2. P. 235-271.
11. Gurevich A. V., L. M. Erukhimov, V. Yu. Kim, V. P. Uryadov, and E. E. (1975) Tsedilina Influence of scattering on radio-wave trapping in ionospheric waveguides. *Radiophys. Quantum Electron*. Vol. 18. doi:10.1007/BF01038192.
12. Istomin E.N., Karfidov D.M., Minaev I.M., Rukhadze A.A. (2006) Plasma asymmetric vibrator with surface wave excitation. *Plasma Physics*. Vol.32. No. 5. P. 423-435.
13. Karlov V.D., Kirichenko Yu.V., Artemenko A.N., Besova O.V. (2018) Features of the formation of radiation patterns of a plasma antenna with azimuthally asymmetric traveling current waves. *Management systems, navigation and communication*. Vol.2. No. 48. P. 158-163.
14. Kirichenko Yu.V., Lonin Yu.F., Onishchenko I.N. (2011) Plasma antenna of a traveling wave. *Izvestiya vuzov. Radioelectronics*. Vol. 54. No. 11. P. 35-39.
15. Korovin A.V. (1984) On the influence of small-scale natural inhomogeneities of the upper ionosphere on the development of artificial instabilities. *Izvestiya vuzov. Radiophysics*. Vol. 27. No. 10. P. 1339-1340.
16. Lyon G. F. (1965) The anisotropy of ionospheric irregularities deduced from VHF scatter measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.* Vol. 27. P. 1213-1216.
17. Mentzer D.R. (1958) Diffraction and scattering of radio waves. Moscow: Soviet radio. 148 p.
18. Najmi, A., et al. (2015) Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP. *J. Geophys. Res. Space Physics*. Vol. 120. doi:10.1002/2015JA021341.
19. Ponomarenko, P. V., T. B. Leyser, and B. Thide (1999) New electron gyroharmonic effects in the HF scatter from pump-excited, field-aligned ionospheric irregularities. *J. Geophys. Res.* Vol. 104(A5). doi:10.1029/1999JA900039.
20. Rao P. B. and Thorne G. D. (1974) A model for RF scattering from field-aligned heater-induced irregularities. *Radio Science*. Vol. 9. No. 11. P. 987-996.
21. Recommendation ITU-R P. 531-12. Ionospheric propagation data and prediction methods needed for the design of satellite services and systems.
22. Sergeychev K.F., Minaev I.M. (2014) Plasma antennas on surface electromagnetic waves. *Proceedings of the Institute of General Physics. A.M. Prokhorov*. Vol.70. P. 143-185.
23. Sivokon V.P. (2020) A new method for studying magnetically oriented inhomogeneities of the ionosphere using a program for determining radio systems. *Geomagnetism and aeronomy*. Vol. 60. No. 2. P. 242-249.
24. Sivokon V.P. (2017) Backscattering of decameter waves on magnetically oriented inhomogeneities of the ionosphere. *Geomagnetism and aeronomy*. Vol.57. No. 3. P. 343-352.
25. Sivokon V.P. (2016) Magnetically oriented inhomogeneities - ionospheric system of reradiators. *News of higher educational institutions. Physics*. Vol.59. No.12-3. P. 56-60.
26. Sivokon V.P., Druzhin G.I. (2006) Geomagnetic factor of DST variations in the selective excitation of ionospheric characteristic waves. *Geomagnetism and Aeronomy*. Vol. 46. No. 4. P. 521-524.
27. Yampolski Y., Milikh G., Zalozovski A., Koloskov A., Reznichenko A., Nossa E., Bernhardt P.A., Briczinski S., Grach S.M., Shindin A. and Sergeev E. (2019) Ionospheric Non-linear Effects Observed During Very-Long-Distance HF Propagation. *Front. Astron. Space Sci.* Vol.6. No. 12. doi: 10.3389/fspas.2019.00012.
28. Zalozovski A. V., Kashcheyev S. B., Yampolski Y. M., Galushko V. G., Belyev V. , Isham B., Rietveld M. T., La Hoz C., Brekke A., Blagoveshchenskaya N. F. and Kornienko V. A. (2009) Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence. *Radio science*. Vol. 44. doi:10.1029/2008RS004111.

Information about authors:

Vladimir P. Sivokon, Kamchatka State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Power plants and electrical equipment of ships, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation, Kamchatka region, Paratunka, Russia