

Исследование мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей методом ракурсного рассеяния

Егоров И.М., Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова, Загорский Г.А.

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. С. Петербург, ул. Беринга, 38
E-mail: egorovneva@gmail.com*

Приведены результаты исследований мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей методом ракурсного рассеяния сигналов при проведении экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating. Приводятся краткие характеристики технических средств и описание метода диагностирования. Рассмотрены особенности поведения и характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИИ) при X- и O-нагреве.

Ключевые слова: КВ нагревной комплекс, мощная КВ радиоволна, ракурсно-рассеянные сигналы, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, дистанционная диагностика

Investigations of small-scale artificial ionospheric irregularities by angle scattering method

Egorov I.M., N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, T.D. Borisova, Zagorskiy G.A.

*Arctic and Antarctic Research Institute
38, Bering str., St. Petersburg, Russia, 199397*

The investigations result on the EISCAT heating facility of small-scale artificial ionospheric irregularities by angle scattering method are presented. The characteristics of technical means of registration, methods of remote diagnostics, conditions for conducting experiments and modes of operation of the heating stand are also given. The specific features of the artificial ionospheric irregularities induced by the ordinary polarized (O-mode) and extraordinary polarized (X-mode) powerful HF radio waves from the EISCAT/Heating facility are are considered.

Keywords: high power HF waves, artificial ionospheric irregularities, bi-static HF Doppler radio scatter observations, Doppler frequencies shifts of scattered signals, remote sensing

Введение

Искусственное воздействие на ионосферную плазму при помощи мощных КВ радиоволн обладает огромным потенциалом в области генерации целого ряда эффектов космической погоды, а также может служить инструментом диагностирования ионосферы [1, 2, 3]. Состояние ионосферы сильно зависит от эффектов, происходящих на Солнце. Классические пассивные исследования ионосферы включают в себя дистанционное радиозондирование, оптические наблюдения, модельные исследования, зондирование при помощи ракет и комических аппаратов. Определенной сложностью исследования ионосферы пассивными методами является то, что необходимо дожидаться требуемых условий и параметров ионосферы, а также выделить исследуемое событие на фоне других происходящих процессов. В отличие от этого, активные воздействия позволяют возбуждать необходимые физические явления в исследуемой области ионосферы, а интенсивность их может превосходить естественные.

Часть большого комплекса явлений, генерируемых воздействием мощных КВ радиоволн, могут быть обнаружены с помощью дистанционных радиофизических методов диагностики.

Целью данной работы является обзор результатов дистанционного диагностирования поведения МИИН, генерируемых мощным КВ-радиоизлучением нагревного стенда EISCAT/Heating. Анализ поведения проводился методом ракурсного рассеяния диагностических сигналов, регистрируемых на большом (более 1000 км) удалении от нагревного стенда.

Описание экспериментов

Нагревной стенд EISCAT/Heating расположен в г. Tromsø, северная Норвегия (69.6° С.Ш., 19.2° В.Д.), и представляет собой универсальный научно-исследовательский инструмент для искусственной модификации и диагностирования состояния высокоширотной ионосферы [4] (рис. 1). Стенд состоит из антенных фазированных решеток, фидерных линий, 12-ти передатчиков мощностью 100 кВт каждый на базе радиоламп тетродов rs2054sk, цифрового синтезатора частот и пункта управления. Также на территории стенда находится комплекс научного оборудования для диагноза фоновой геофизической обстановки и результатов активных воздействий.

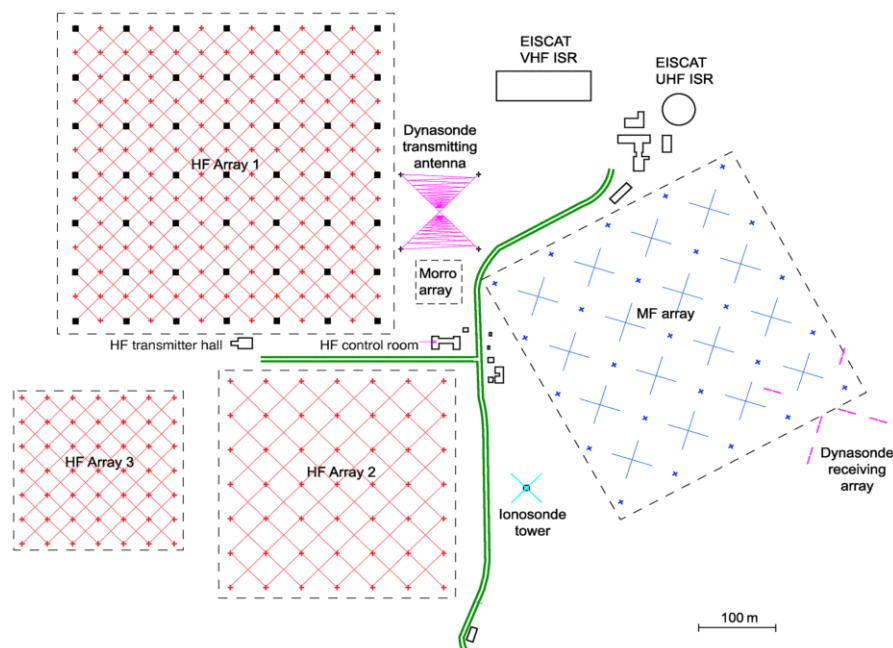


Рис. 1. Схема нагревного стенда EISCAT Heating [4]

Массивы ортогональных диполей HF Array 1, HF Array 2 и HF Array 3 представляют собой фазированные антенные решетки. Меняя сдвиг фаз сигналов, подводимых

к антеннам от передатчиков, можно менять угол наклона диаграммы направленности антенных решеток и поляризацию волны накачки.

Для дистанционной диагностики и контроля работы нагревного стенда в ААНИИ разработан и применяется многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, обеспечивающий регистрацию диагностических КВ сигналов методом ракурсного рассеяния от ионосферных неоднородностей.

Многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс размещается на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» в Ленинградской области. Расстояние вдоль дуги большого круга между НИС «Горьковская» и стендом EISCAT

1140 км. Доплеровский комплекс состоит из восьми измерительных каналов, на базе радиоприемников ICOM IC-R75. В приемном тракте, после узкополосного фильтра 3-й промежуточной частоты 455 кГц производится преобразование аналогового сигнала в цифровую форму с разрядностью 18 бит. Далее, в реальном времени осуществляется цифровая обработка регистрируемых сигналов в полосе 250 Гц. Результаты отображаются в виде осциллограмм, мгновенных спектров и трехмерных графиков в координатах частота – время - амплитуда. Перестройка частот комплекса автоматизирована и происходит согласно сетке вещания КВ радиостанций, где указано время вещания, характеристики излучения, координаты радиоцентра и другая информация.

Сущность ракурсного рассеяния сигналов состоит в следующем [5, 6, 7]. Если на область, содержащую ионосферные неоднородности, один из размеров которых сопоставим с длиной диагностической волны, падает радиоволна, то энергия волн, рассеянных этими неоднородностями, сосредоточена на поверхности конуса. Вследствие замагниченности ионосферной плазмы мелкомасштабные неоднородности сильно вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля Земли H_0 . Рассеяние радиоволн на таких неоднородностях характеризуется ракурсной чувствительностью – энергия рассеянного излучения сосредоточена в узком угловом интервале вблизи конуса зеркального отражения. Если пренебречь конечной вытянутостью неоднородностей l_0 , и устремить l_0 к бесконечности, то для волновых векторов падающей и рассеянных волн выполняется соотношение

$$(k_0 \cdot H_0) = (k_S \cdot H_0), \quad (1)$$

где k_0 и k_S – волновые вектора падающей и рассеянной волн соответственно;

H_0 – вектор магнитного поля Земли.

Таким образом, в этом случае волновые векторы рассеянных волн сосредоточены на поверхности конуса ракурсного рассеяния, содержащего волновой вектор падающей волны k_0 , имеющего вершину в месте расположения рассеивающей неоднородности и угол раствора Θ_r , равный углу между k_0 и H_0 . При $\Theta_r = \pi/2$ ракурсный конус вырождается в диск.

На рис. 2 представлена схема геометрии ракурсного рассеяния радиоволн с учетом рефракции в ионосфере. Для рассеянного сигнала, ориентированного в одном направлении с падающим полем, на рис. 2 использовано обозначение волнового вектора k_{S1} , при обратном рассеянии - k_{S2} . Пересечение конуса ракурсного рассеяния с поверхностью Земли определяет ракурсный контур, в любой точке которого может быть принят рассеянный сигнал от заданного источника излучения. Следует отметить, что в расчетах геометрии ракурсного рассеяния КВ радиоволн необходимо учитывать ионосферную рефракцию, которая в значительной мере определяет конфигурацию ракурсных контуров на поверхности Земли. Для частот КВ диапазона рефракция радиоволн в ионосфере, приводит к искривлению ракурсных конусов. Контурные рассеянных сигналов с различными значениями Θ_r формируют зоны возможного приема ракурсно-рассеянных радиосигналов. Расчет геометрии таких зон имеет принципиальное значение при постановке экспериментов и интерпретации измерений.

Минимальный поперечный магнитному полю масштаб неоднородностей l_1 , ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн, определяется выражением

$$l_{min} = \lambda/2 \cdot \sin(\Theta), \quad (2)$$

где λ – длина волны диагностического передатчика.

Частным случаем ракурсного является обратное рассеяние, когда $k_0 \perp H_0$ и $l_{min} = \lambda/2$.

Результаты измерений

Ракурсно-рассеянные сигналы (далее РРС), на получаемых КВ доплеровским комплексом динамических спектров, проявляются в виде дополнительных треков, сдвинутых в отрицательную или положительную сторону от нулевой частоты, соответствующей распространению сигнала по дуге большого круга. Дополнительные треки наблюдаются в моменты излучения нагревного комплекса и отсутствуют в паузах. Величина и знак доплеровского смещения частоты определяется вектором скорости движения мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (далее МИИН) в искусственно возмущенной области ионосферы.

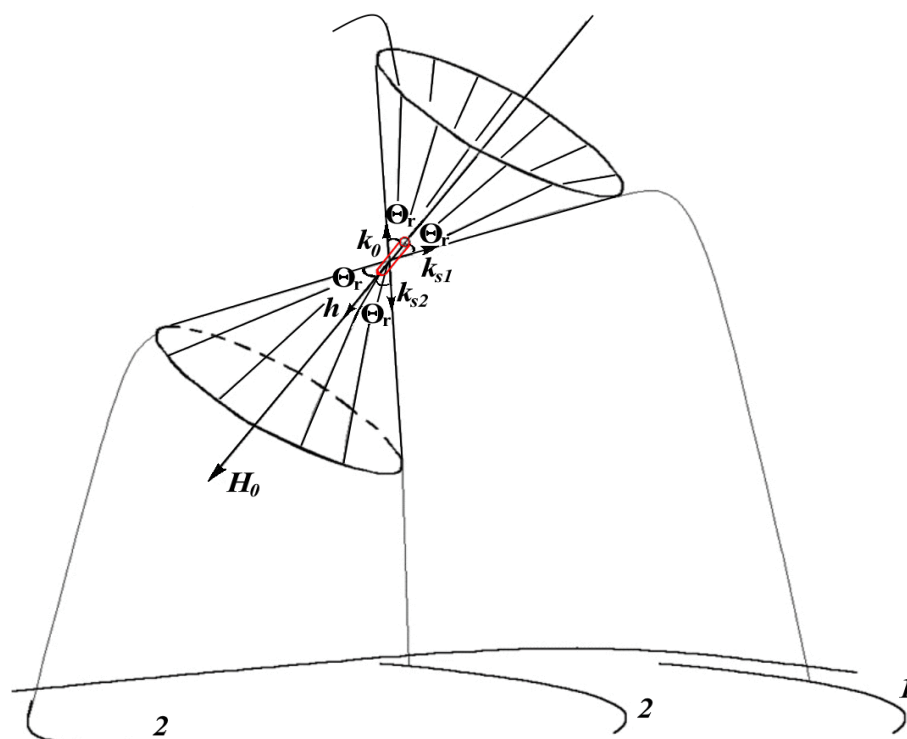


Рис. 2. Схема геометрии ракурсного рассеяния радиоволн с учетом рефракции рассеянного сигнала в ионосфере. 1 - контур РР радиоволн при рассеянии «вперед», 2 – при рассеянии «назад»

Характерные спектры РРС на МИИН представлены на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3 приведены спектры РРС в экспериментах, проводимых на стенде EISCAT/Heating 20 октября 2021 года. Нагревной стенд излучал на частоте 4200 кГц циклами 5 минут нагрев, 3 минуты пауза при обыкновенной поляризации волны накачки (О-мода) в направлении магнитного зенита. В качестве диагностического передатчика использовалась радиостанция, расположенная в окрестности Каши (Китай) и излучающая в режиме АМ на частоте 17650 кГц. Циклы излучения волны накачки комплекса EISCAT/Heating обозначены белыми прямоугольниками.

Как видно из рисунка, РРС регистрировались практически мгновенно с включением нагревного комплекса и также быстро исчезали, что говорит о малой инерционности процесса возбуждения МИИН. Предположительно, рассеяние сигналов происходило на неоднородностях с поперечными размерами $l_{\perp} > 8\text{ м}$

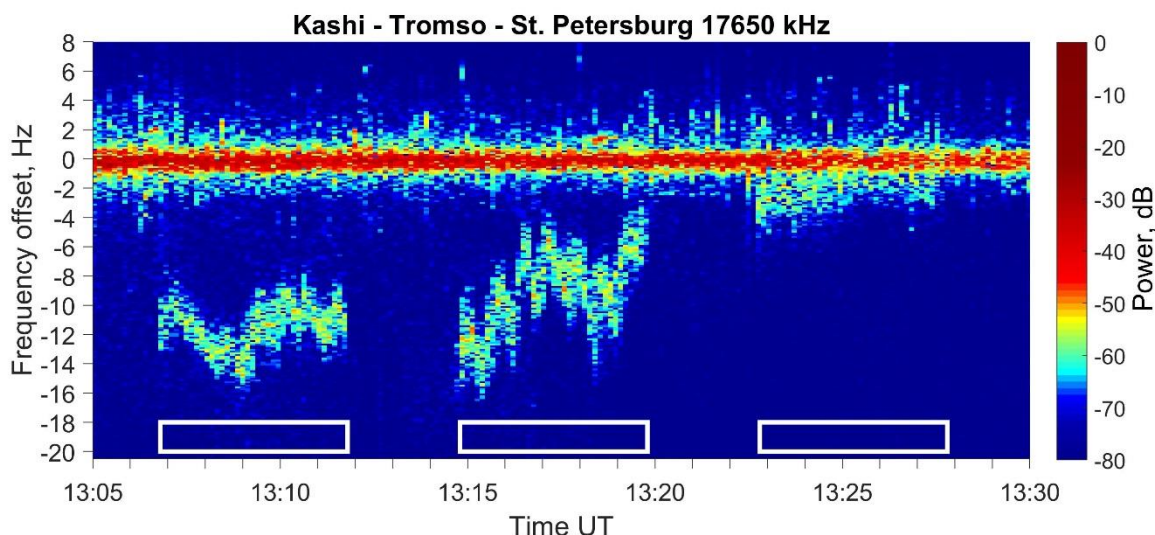


Рис. 3. Зарегистрированные PPC на трассе Каши – Тромсе – Санкт-Петербург 20 октября 2021 года во время проведения экспериментальных работ на стенде EISCAT/Heating

При генерации МИИН X-волной накачки, наблюдаются достаточно большие времена возникновения и релаксации. На рис. 4, приведены зарегистрированные 20 октября 2016 г PPC на трассе Флорида (США) – Тромсе – Санкт-Петербург, прием сигналов осуществлялся на частоте 17790 кГц. Нагревной комплекс излучал в магнитный зенит циклами 10 минут нагрев / 5 минут пауза на частоте 4544 кГц при не обыкновенной поляризации волны накачки (X-мода). PPC регистрировались и после прекращения воздействия волны накачки, время релаксации МИИН составляло более 3 минут.

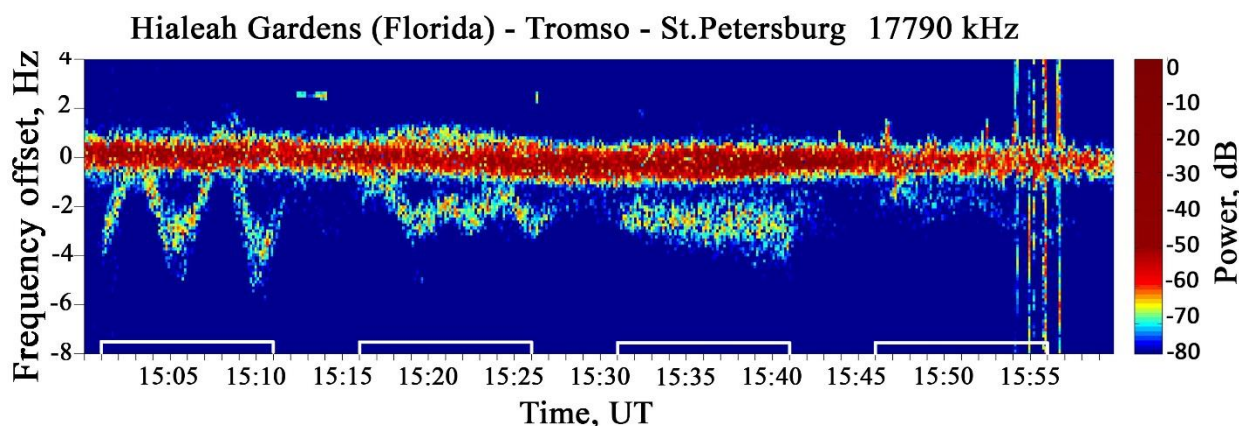


Рис. 4. Зарегистрированные PPC на МИИН 20 октября 2016 г PPC на трассе Флорида (США) – Тромсе – Санкт-Петербург

Заключение

Выполнен обзор характеристик диагностических КВ сигналов при ракурсном рассеянии на МИИН, сгенерированных воздействием волны накачки на F-область ионосферы стендом EISCAT/Heating. Сравнение характеристик МИИН при воздействии мощными КВ-радиоволнами необыкновенной (X-мода) и обыкновенной (O-мода) поляризации показали:

- возбуждение МИИН при X-нагреве происходит на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_oF2$ и $f_H > f_oF2$), в то время как при O-нагреве МИИН генерируются только при $f_H \leq f_oF2$;

- МИИН, возбуждаемые при O- и X-нагреве, имеют существенно различные времена нарастания и релаксации, а также пороговые мощности возбуждения, что свидетельствует о различных механизмах их генерации.

Существует значительная разница во временах релаксации для МИИН при X-моде, возбуждаемых на высоких ($f_H = 5,5 - 8,0$ МГц) и низких ($f_H = 4,0 - 5,5$ МГц) частотах нагрева. Время релаксации МИИН на высоких частотах волны накачки не превышает 3 минут, тогда как оно может достигать значений, превышающих 5-минут, на низких частотах нагрева.

Времена нарастания и релаксации МИИН при X-нагреве сильно зависят от «предыстории» воздействия волны накачки. При «холодном» старте (первый цикл нагрева) время образования МИИН, т.е. нарастания интенсивности рассеянного на МИИН сигнала составляет 60 – 70 с, а при $f_H > f_oF2$ может достигать даже 150 с, при этом время релаксации, после выключения волны накачки, составляет 100 – 130 с. В последующих циклах, времена возрастания составляют единицы секунд.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
2. Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // Space Sci Rev, 2018, 214:118 <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>.
3. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: изд-во Нижегородского ун-та, 468 с. 2017.
4. Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // Radio Science, 2016, vol. 51(9), pp. 1533-1546
5. Booker H.G. Turbulence in the ionosphere with applications to meteor-trails, radio star scintillation, auroral radar echoes and other phenomena // J. Geophys. Res. 1956. V. 61(4). P.673-682.
6. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.М., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Урядов В.П., Фролов В.Л. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности // Тепловые нелинейные явления в плазме. –Горький: ИПФ АН СССР, 1979, С. 7–45.
7. Гетманцев Г.Г., Ерухимов Л.М., Митяков Н.А., Поляков С.В., Урядов В.П., Фролов В.Л. Ракурсное рассеяние коротковолновых радиосигналов на искусственных ионосферных неоднородностях // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1976, Т. 19, С. 1909–1912.