

УДК 621.371.332

РАССЕЯНИЕ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ МАГНИТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ИОНОСФЕРЕ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

В. А. Бубнов, Ю. В. Киселев, С. М. Курпянов, Э. Е. Митякова

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований по ракурсному рассеянию коротких радиоволн на искусственных магнитно-ориентированных неоднородностях при существенной рефракции радиоволн в ионосфере. Исследованы характерные параметры рассеянных радиосигналов после включения и выключения нагревного передатчика: время их появления 15—20 с, время полной релаксации 18—27 с, время установления амплитуды 100—150 с, относительное увеличение уровня 2,5—6 дБ по сравнению с рассеянным земной поверхностью радиосигналом, доплеровское смещение частоты 2,15—2,8 Гц. Проведен расчет зон приема рассеянных радиосигналов, подтвердивший роль ракурсно-рефракционного механизма распространения радиосигналов в проведенном эксперименте. Рассчитанный по измеренным данным интегральный поперечник рассеяния искусственной возмущенной области составил 10^6 — 10^7 м².

В работе [1] представлены результаты комплексного эксперимента по изучению рассеяния коротких радиоволн на искусственных неоднородностях ионосферы из нескольких пространственно-разнесенных пунктов. Этот эксперимент позволил исследовать параметры искусственных мелкомасштабных магнитно-ориентированных ионосферных неоднородностей, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн, изучить динамику развития, релаксации и движения этих неоднородностей.

В настоящей работе рассматриваются результаты, полученные при проведении данного эксперимента на измерительном пункте, расположенном северо-западнее нагревного передатчика. Характерной особенностью приема в этом пункте рассеянных на искусственных магнитно-ориентированных неоднородностях (МОН) радиосигналов являлось то, что прием был возможен только при условии наличия значительной рефракции радиоволн в ионосфере.

Экспериментальные исследования проводились в утренние часы декабря и апреля. С этой целью принимались рассеянные сигналы радиовещательной станции, расположенной южнее пункта приема на расстоянии 900 км и излучающей на частоте 15,31 МГц с мощностью 100 кВт. Для возмущения ионосферы использовался нагревный передатчик с мощностью 120 кВт, излучающий на частотах 4,6 и 5,75 МГц с помощью зенитной антенны, имеющей коэффициент усиления порядка 20 дБ. Передатчик работал в следующих режимах: 7 минут включен, 8 минут выключен и т. д. в течение нескольких часов; одноминутные включения с полминутными паузами в течение 10 минут с последующей 5-минутной паузой. Прием рассеянных радиосигналов производился на антенну с коэффициентом усиления 17 дБ, направленную в сторону нагревного передатчика, сигналы усиливались радиоприемным устройством Р-250-М2, регистрировались на самописце и магнитной ленте. Ввиду того, что максимальная применимая частота (МПЧ) на радио-

трассе при эксперименте не превышала 15 МГц, прием прямых сигналов от радиовещательной станции практически был невозможен. Вместо этих сигналов обычно принимались слабые рассеянные земной поверхностью радиосигналы. Записанные на магнитную ленту сигналы в дальнейшем подвергались частотному анализу с помощью спектроанализатора, имеющего разрешение 0,1 Гц.

В течение всего эксперимента с помощью автоматической ионосферной станции регистрировались параметры ионосферы в районе нагревного передатчика. В декабре было проведено десять сеансов наблюдений, из которых в шести сеансах с 9 ч 30 мин до 10 ч 50 мин принимались рассеянные на искусственных МОН радиосигналы, в апреле из одиннадцати сеансов в семи принимались рассеянные радиосигналы с 8 ч 30 мин до 9 ч 50 мин. Анализ показал, что рассеянные радиосигналы наблюдались при значениях $f_0 F2$ в районе нагревного передатчика от 4,6 до 5,3 МГц в зимний период и от 5,1 до 6 МГц весной. Расчетный диапазон высот МОН, ответственных за рассеяние радиосигналов, соответствовал 203—243 км в декабре и 223—259 км — в апреле.

Анализ экспериментальных данных производился по следующим параметрам. Для каждого цикла включения и выключения нагревного передатчика определялось время появления рассеянных сигналов (τ_n), время установления их амплитуды, время релаксации (τ_p) этих сигналов после выключения передатчика. Определялись текущее и среднее значения доплеровской частоты (F_d) биений и соотношение амплитуд принимаемых радиосигналов до включения и в период работы передатчика. Рассмотрим вначале результаты эксперимента, проведенного в декабре. Текущие значения F_d находились в пределах 1,5—5,5 Гц, средние значения в течение утренних часов составили 2—4,2 Гц. Обычно наблюдалась практически линейная зависимость уменьшения F_d со временем суток, составляющая 1,5 Гц/ч. Время появления рассеянных сигналов соответствовало 8—40 с, время релаксации от цикла нагрева к циклу уменьшалось с 90 до 10—15 с. В процессе эксперимента было замечено, что при выключении передатчика вначале наблюдается быстрое уменьшение амплитуды рассеянных сигналов за время 7—8 с, а затем их полное исчезновение в течение десятков секунд. На рис. 1 в виде графиков представлены средние значения доплеровской частоты, времени появления и релаксации рассеянных сигналов, полученные в декабре, на рис. 2 — в апреле. В результате обработки экспериментальных данных за декабрь были получены следующие характерные параметры рассеянных радиосигналов: время появления 15 с, время начальной релаксации 8 с, время полной релаксации 27 с, время установления амплитуды 150 с, относительное увеличение уровней рассеянных сигналов 6 дБ, усредненное значение доплеровской частоты 2,8 Гц.

Анализ экспериментальных данных за апрель показал, что текущие значения доплеровской частоты составили 0,75—3,75 Гц. Средние значения F_d с течением времени уменьшались также со скоростью 1,5 Гц/ч. Время появления рассеянных сигналов после включения передатчика имело явно выраженную зависимость — уменьшалось при последовательных его включениях (1 мин нагрев — 0,5 мин пауза) с 30—60 с до 5—10 с. При выключении передатчика на 5 мин и более последующее время появления рассеянных сигналов практически восстанавливалось (рис. 2). Интересно отметить, что в некоторые дни наблюдений после выключения передатчика через 45—55 с в течение 2—4 с принимались рассеянные радиосигналы с доплеровскими частотами, примерно в 1,2—2 раза большими, чем при соответствующих циклах нагревного передатчика.

В ходе эксперимента в нескольких случаях принимались рассеянные на искусственных МОН сигналы радиовещательной станции, удаленной от пункта приема на 1200 км в южном направлении и работаю-

щей на частоте 15,24 МГц. В одном из сеансов удалось проследить появление вначале рассеянных сигналов на частоте 15,24 МГц с 7 ч 46 мин до 8 ч 23 мин, а затем в 8 ч 37 мин на частоте 15,31 МГц от более ближней станции. Доплеровские частоты в обоих случаях практически не отличались и были равными 1,2—1,25 Гц.

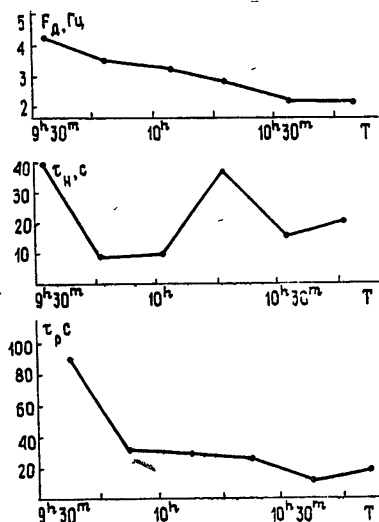


Рис. 1.

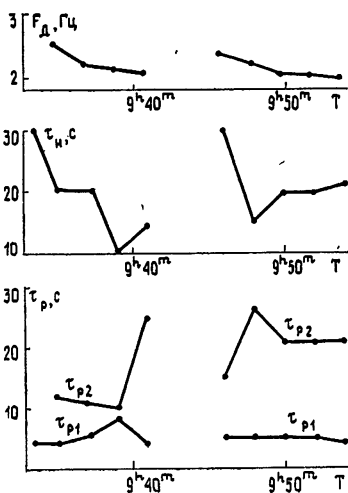


Рис. 2.

Характерные параметры рассеянных радиосигналов в апреле были следующими: время появления 20 с, время начальной релаксации 7 с, время полной релаксации 18 с, время установления амплитуды 100 с, относительное увеличение уровней 2,5 дБ, среднее значение доплеровской частоты 2,15 Гц. Полученные временные параметры практически не отличались от подобных в декабре. Значения доплеровских частот весной оказались несколько меньшими, чем в зимний период.

Анализ результатов эксперимента с точки зрения ракурсного рассеяния радиоволн показал, что без наличия рефракции радиоволн в ионосфере прием сигналов был бы невозможен. Для оценки условий распространения радиоволн за счет ракурсно-рефракционного механизма решалась модельная задача. Для случая трехслойной сферически-симметричной ионосферы, с учетом реальных ионосферных параметров производился расчет траекторий распространения радиоволн на трассе, проходящей через нагревный передатчик. Размеры области существования искусственных МОН, ответственных за ракурсное рассеяние, принимались равными 20—30 км по вертикали и примерно 100 км по горизонтали, при этом центр области считался находящимся на высоте, соответствовавшей уровню отражения волны возмущающего передатчика [1]. При проведении расчетов учитывалась конечная ширина индикатрисы рассеяния искусственных МОН 6—8°.

Расчеты показали, что в область существования МОН с 9 ч в декабре и с 8 ч в апреле попадают лучи с углами выхода 9—17°. Ракурсно-рефракционные условия приема рассеянных сигналов выполняются с 10 ч до 11 ч в декабре и с 8 ч 30 мин до 10 ч в апреле. В более раннее время, из-за недостаточно сильной ионосферной рефракции, зоны приема на поверхности Земли располагаются за приемным пунктом. Позже 11 ч в декабре и 10 ч в апреле все лучи вследствие сильной рефракции проходят ниже области существования МОН. Наличие рефракции вносит существенные изменения в геометрию рассеяния как на участке передатчик — ВО, так и на участке ВО — приемник.

При выполнении условий приема рассеянных сигналов во всех случаях расчетная точка отражения находится на несколько километров выше точки рассеяния и область существования МОН располагается на восходящем участке траектории радиоволны, т. е. волна падает на рассеивающие неоднородности снизу. Волновой вектор падающей волны составляет с горизонталью угол $-(2-3)^\circ$.

На рис. 3 представлены результаты расчетов зон приема на поверхности Земли для 9 апреля (а) и декабря (б) в координатах азимут — дальность. Радиовещательная станция расположена в точке «К», а приемник — в точке «Л». Цифры у средних контуров соответствуют углу, образованному волновым вектором рассеянного сигнала с горизонталью в направлении «зеркального» рассеяния в сторону приемного пункта (знак «—» — рассеяние вниз). Цифры у двух крайних контуров рассеяния соответствуют отклонению от направления «зеркального» рассеяния из-за конечной ширины индикатрисы рассеяния. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с проведенным экспериментом.

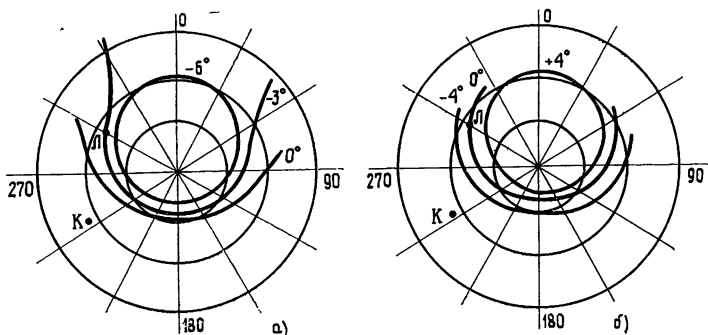


Рис. 3.

По измеренной напряженности поля рассеянных радиосигналов был рассчитан интегральный поперечник рассеяния σ , составивший $10^6 - 10^7 \text{ м}^2$, что на порядок меньше, чем полученный в работе [1]. Данный результат может быть объяснен тем, что условия ракурсного рассеяния в сторону приемного пункта выполнялись не для всего объема ВО, а только для определенной его части.

Проведенные экспериментальные исследования и их анализ позволили сформулировать условия приема рассеянных на искусственных МОН радиосигналов при расположении приемного пункта на более высоких широтах по сравнению с нагревным передатчиком. Основным условием является не превышение рабочей частоты f_0 максимально применимой частоты на трассе, проходящей через ВО и с длиной, равной удвоенному расстоянию D между передающим пунктом и нагревным передатчиком. Как указывалось выше, высота точки отражения радиоволны при наклонном падении практически совпадает с высотой ВО. В этом случае частота f_0 приближенно может быть определена по формуле

$$f_0 = f_n \sec \left\{ \arctg \left[\sin D \left(1 - \cos D + \frac{h_m}{R_3} - \frac{y_m}{R_3} \sqrt{1 - \frac{f_n^2}{f_m^2}} \right)^{-1} \right] \right\},$$

где f_n — частота нагрева, f_m , h_m , y_m — критическая частота, высота максимума, полутолщина слоя ионизации.

В ракурсной зоне приема существуют две сопряженные точки, положение которых на земной поверхности не зависит от наклона магнитного поля. Одна из точек определяется длиной скачка радиоволны, проходящей через ВО. Другая соответствует зеркальному отобра-

жению первой относительно плоскости магнитного меридиана, проходящего через ВО. Для ракурсного приема рассеянных на МОН радиосигналов наибольший интерес представляет вторая точка, которая может быть найдена чисто геометрически. В проведенном эксперименте расположение приемного пункта было близко к данной точке. При случайном расположении передающего, приемного пунктов и нагревного передатчика условия ракурсного приема могут быть выполнены путем подбора f_0 , f_H . Одним из путей реализации этих условий практически для любого случая расположения пунктов является локальное изменение параметров магнитного поля на высотах ВО.

Результаты анализа спектральных характеристик рассеянных на искусственных МОН радиосигналов будут представлены в дальнейшем отдельно.

Авторы глубоко признательны Л. М. Ерухимову, Ю. В. Чугунову, В. П. Урядову, В. Л. Фролову за обсуждение полученных результатов, ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленов А. Ф., Бубнов В. А. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1805.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
9 октября 1980 г.

SCATTERING OF SHORT RADIO WAVES BY ARTIFICIAL MAGNETICALLY ORIENTED IRREGULARITIES EXCITED BY A POWERFUL RADIATION IN THE IONOSPHERE

V. A. Bubnov, Yu. V. Kiselev, S. M. Kupriyanov, Eh. E. Mityakova

Results of experimental investigations are considered over foreshortening scattering of short radio waves by artificial magnetically oriented irregularities when the refraction of radio waves in the ionosphere is essential. Characteristic parameters of scattered signals are studied after switching on and switching off the heating transmitter: the time of their occurrence is 15—20 s, the time of the complete relaxation is 18—27 s, the time of the amplitude setting is 100—150 s, the relative increase of the level is 2,5—6 dB in comparison with a scattered radio signal by the earth surface, the Doppler frequency shift is 2.15—2.8 Hz. A calculation has been made for the reception zones of scattered radio signals which confirms the role of foreshortened refraction mechanism of radio signal propagation in the given experiment. An integral transverter of scattering by an artificial disturbed area over the measured data amounts 10^6 — 10^7 m².
