

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 621.371:550.388.1

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В. Б. Авдеев, Л. М. Ерухимов, С. А. Метелев, А. В. Раухин, А. П. Ярыгин

Высокие возможности радиолокационного метода успешно используются для исследования пространственно-временных характеристик искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) [1-3], однако детальных сведений о параметрах мелкомасштабной ИИТ (МИИТ), получаемых с помощью высокочастотных радиолокационных станций, имеется еще недостаточно.

В 1986 году проведен эксперимент по радиолокационному зондированию МИИТ, создаваемой в F -слое ионосферы мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда «Сура». Нагрев проводился меандром (цикл: 2 мин — нагрев, 2 мин — пауза) на σ -компоненте с эквивалентной мощностью ~ 80 МВт. Для обеспечения лучших энергетических условий возбуждения МИИТ в местном геомагнитном поле H ось излучения была наклонена на $\sim 9^\circ$ к югу в плоскости магнитного меридиана NS .

Радиолокационная станция (РЛС) когерентного рассеяния, зондирующая на частоте $f \approx 170$ МГц, находилась к югу от стенда на расстоянии $r \approx 900$ км в плоскости NS в зоне обратного ракурсного рассеяния сигналов от МИИТ с размерами поперек H , равными $l_{\perp} = (c/2)f \approx 0,88$ м. Во всех циклах нагрева, когда МИИТ создавалась на расчетной зеркальной поверхности над стенду, на радиолокационном индикаторе кругового обзора (ИКО) и индикаторе дальности (ИД) наблюдались обратно рассеянные от МИИТ сигналы РЛС.

Сигнал появлялся и пропадал с задержкой менее 1 с (лучшую точность достичь не удалось) после включения и, соответственно, выключения нагревного излучения стенда.

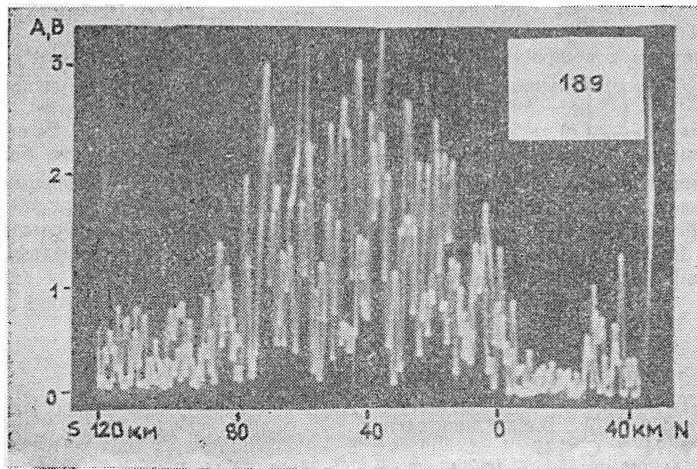


Рис. 1.

Максимальные размеры рассеивающей области (РО), измеренные по показаниям ИКО и ИД в каждом цикле, слабо увеличивались от цикла к циклу и достигали стационарного значения на третьем-четвертом циклах. Для примера на рис. 1 приведены показания ИД в четвертом цикле при азимуте луча РЛС на центр РО (0 км соответствует дальности до точки на высоте $h_{\text{азир}} = 235$ км точно над стенду). Как следует из рис. 1 и других показаний ИД, максимальные размеры РО вдоль меридиана NS составляли $L = 50-80$ км, а ее центр находился на 30—40 км южнее стендса и примерно совпадал с центром максимума нагревного излучения. Северная кромка РО выражена резко, границы южного края размыты, что, по-видимому, связано с уменьшением порога возникновения МИИТ при малых углах $\alpha = \pi - (K_i H)$ (K_i — волновой вектор падающей волны, в эксперименте $\alpha_{\text{юж}} \approx 0$, $\alpha_{\text{сев}} \approx 20^\circ$). На рис. 1 приведены показания ИД для двух сигналов, принятых последовательно через время $\tau_{\text{повор}} = 8 \cdot 10^{-3}$ с.

По хорошо заметным различиям в осцилляциях сигналов можно заключить, что

время корреляции сигналов $\tau_{\text{кор}} \ll \tau_{\text{попт}}$, по теоретическим оценкам [4] — $\tau_{\text{кор}} \sim \tau = 1,7 \cdot 10^{-5}$ с (τ — длительность зондирующего импульса).

Высокое разрешение по дальности, равное толщине импульсного объема $ct/2 \approx 2,5$ км, позволило обнаружить изрезанность формы сигнала, принятого от различных частей РО, что свидетельствует о наличии отдельных рассеивающих центров (РЦ) в РО. Размер РЦ вдоль NS составлял 2,5—15 км. По показаниям ИД, снятых при различных азимутах луча РЛС, размер РО поперек NS составлял $D \approx 60 \div 80$ км (здесь вычен поперечный размер луча $D_L \approx 50$ км на дальности до МИИТ).

Отметка от цели на ИКО при вращающемся по азимуту луче РЛС получалась путем интегрирования на каждом азимуте достаточно большого числа (~30) сигналов. Отметка на ИКО от МИИТ отличалась от отметок обычных целей: она имела вид неравномерной яркости пятна со средними размерами 60 км \div 50 км (азимут \div дальность), состоящего из многих десятков отдельных точек различной яркости и размерами $d \approx 2,5 \div 6$ км. Существенно, что размеры точек по азимуту были намного меньше разрешаемого размера D_L . Такая структура наблюдавшегося на ИКО пятна могла быть вызвана интерференцией сигналов, рассеянных отдельными РЦ в РО, вследствие относительного движения РЦ в пределах импульсного объема. В этом случае при вращении луча РЛС со скоростью $\Omega = 12$ град/с и интегрировании принятых сигналов быстрая компонента движения РЦ приводила к быстрой (с характерным временем $t \sim d/r\Omega \sim (1 \div 3) \cdot 10^{-2}$ с) интерференции, проявляющейся на ИКО в виде мелких, но ярких точек, а более медленная компонента — к более медленной интерференции и, соответственно, к более крупным, но менее ярким неравномерностям за- светки площади пятна.

Сравнение координат пятна на ИКО с координатами зеркальной поверхности рассеяния, рассчитанной на основе модели геомагнитного поля [8] с учетом ионосферной рефракции волн, показало, что на развитой стадии МИИТ занимает одновременно интервал высот $\Delta h_{\text{МИИТ}} = (235 \div 227)$ км = 8 км, что примерно совпадает с областью между высотой отражения нагревной волны и высотой верхнегибридного дезонанса в эксперименте ($\Delta h \approx 7$ км). Определено также, что угол β между вектором K и зеркальной поверхностью в РО составлял относительно малую величину $\beta \approx 11^\circ$. Поэтому растяжением масштаба $L_{\text{ист}} = L/\cos \beta$ на показаниях ИД в РО, возникающих из-за наклона в зеркальной поверхности, можно было пренебречь: $L_{\text{ист}} = 1,02 L \approx L$.

С помощью калибровки РЛС по эталонному отражателю, запущенному на метеозонде, были проведены измерения радиолокационного эффективного поперечника рассеяния (РЭПР)* σ МИИТ, который в импульсном объеме V составил: $\sigma_{\text{спр}} = -3 \cdot 10^2$ м², $\sigma_{\text{срд}} = 3 \cdot 10^3$ м². Для оценки полученного в эксперименте линфопеч-ционального РЭПР $\sigma_0 = \sigma/V$ можно в соответствии с [2, 6] считать продольный (относительно H) размер МИИТ равным $l_{\parallel} \sim 500$ м. Тогда эффективная толщина зеркальной поверхности рассеяния $\Delta h_{\text{срд}} \approx cr/\pi l_{\parallel}$, $f \approx 2$ км, импульсный объем $V = (ct/2) \times D \cdot \Delta h_{\text{срд}} \approx 3 \cdot 10^{11}$ м³ и, следовательно, $\sigma_0 \text{ сред} = \sigma_{\text{срд}}/V \approx 10^{-9}$ м⁻¹, $\sigma_0 \text{ max} = \sigma_{\text{срд}}/V \approx 10^{-8}$ м⁻¹.

С увеличением τ величина σ растет за счет увеличения V , достигая насыщения при $\tau \geq 2L/c$. В этом случае $\sigma = \int \sigma_0(r) d^3 r$ и оценка интеграла по эксперименталь-

РО

ным значениям $\sigma_0 \text{ сред}(r)$ в объеме РО дает: $\sigma_0 \text{ сред,п} = (2 \div 3) \cdot 10^3$ м². Если, как и в [1], ввести коэффициент рассеяния $b = \sigma_0 \text{ сред}/4\pi l_{\parallel}$, то $b \approx 10^{-13}$ м⁻², что близко к результату [1], полученному на близкой частоте РЛС ($f = 157,5$ МГц) в оптимальных нагревных условиях.

Таким образом, методом радиолокационного зондирования изучены рассеивающие свойства МИИТ и на этой основе выявлена ее сложная пространственно-временная структура.

ЛИТЕРАТУРА

1. Minkoff J. // Radio Sci. 1974. V. 9. № 11. P. 997.
2. Djuth F. T. // J. Atm. Terr. Phys. 1985. V. 47. № 12. P. 1225.
3. Алебастров В. А., Бенедиктов Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 2. С. 147.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. — М.: Наука, 1978.
5. Кейн Лж., Лангель Р., Гендрикс Ж. // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. № 1. С. 107.
6. Коровин А. В., Насыров А. М. и др. // В сб.: Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — Апатиты: КФ АН СССР, 1979. С. 5.

Поступила в редакцию
11 марта 1988 г.

* Отметим, что РЭПР в 4π раз больше поперечника, используемого обычно в радиофизике [4].