

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ НОВОГО РАДАРА НР-МСТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

А.Г. Сетов, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев, Р.В. Васильев, В.П. Лебедев

INVESTIGATION OF CAPABILITIES OF NEW IS-MST RADAR ANTENNA SYSTEM FOR DIFFERENT OPERATION MODES

A.G. Setov, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev, R.V. Vasilyev, V.P. Lebedev

В ближайшие годы в Иркутском регионе будет построен радар НР-МСТ, сочетающий в себе возможности метода некогерентного рассеяния (НР) и мезосферно-стратосферно-тропосферного (МСТ) радара. В данной статье описывается конфигурация, характеристики и режимы работы антенной системы будущего радара. Оцениваются возможности антенной системы радара в задачах исследования ионосферы и нейтральной атмосферы.

Over the next years IS-MST radar fitted for operation in incoherent scatter (IS) and mesosphere-stratosphere-troposphere (MST) modes will be built in Irkutsk region. Antenna system configuration, characteristics and operation modes of future radar are described in this paper. Radar antenna system capabilities are estimated for research problems of studying ionosphere and neutral atmosphere.

Введение

Комплексное изучение атмосферы Земли требует применения множества различных инструментов. В рамках проекта национального гелиогеофизического комплекса планируется строительство радара НР-МСТ, который позволит проводить измерения параметров ионосферы на высотах 100–1000 км, а также параметров нейтральной атмосферы на высотах 10–100 км. Для исследования ионосферы применяются радары некогерентного рассеяния (НР), которые представляют из себя мощные антенны, обладающие узкой диаграммой направленности. Многие подобные установки позволяют проводить измерения параметров сигналов когерентного рассеяния от нижней и средней атмосферы, работая в мезосферно-стратосферно-тропосферном (МСТ) режиме [Hocking, 1997].

В данной статье описываются характеристики и конфигурация антенной системы будущего радара НР-МСТ и оценивается потенциал радара в задачах радиозондирования атмосферы методами когерентного и некогерентного рассеяния.

Конфигурация антенной системы

Радар НР-МСТ – это цифровая активная фазированная антенная решетка, состоящая из двух сегментов, находящихся на расстоянии 100 м друг от друга. Каждый сегмент состоит из 1536 крест-вибраторов, что позволяет одновременно принимать сигнал двух поляризаций. Передающий луч формируется только вертикальными вибраторами, поэтому излучение будет обладать линейной поляризацией. Один сегмент системы наклонен на 20° от горизонта в направлении на север, а второй сегмент – на 20° в направлении на юг. Характеристики радара приведены в таблице.

Диаграмма направленности сегмента определяется произведением диаграмм отдельных излучателей и множителя решетки. Так как радар НР-МСТ находится в стадии разработки, точная конструкция отдельных излучателей неизвестна, поэтому для оценки диаграммы направленности радара определяется множитель решетки [Хансен, 2012]. Сегменты систе-

мы наклонены на 20° , поэтому используется преобразование координат $v_d = v \cos 20^\circ + \sqrt{1 - u^2 - v^2} \sin 20^\circ$ и форма множителя решетки искажена (рис. 1, а), угловые координаты $u = \sin \theta \cos \varphi$, $v = \sin \theta \sin \varphi$.

Таблица
Характеристики радара НР-МСТ

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Пиковая мощность излучения	2 МВт	Эффективная площадь	2560 м ²
Диапазон рабочих частот	153–163 МГц	Ширина луча (1 сегмент)	2.5°×2.5°
Тип радара	Фазированная решетка	Чувствительность	658 Ян
Тип антенн	Крест-вибратор	Ширина полосы	625 кГц
Расположение антенн в решетке	Треугольное	Минимальная длина дискрета	1.6 мкс

Сектор обзора каждого сегмента (рис. 1, б) определяется положением луча, при котором не появляются дифракционные максимумы (боковые лепестки с амплитудой главного максимума). Стоит отметить, что по мере склонения к горизонту луч фазированной решетки расширяется, и допустимый сектор обзора уменьшается.

Сегмент радара разбит на 12 фрагментов по 4×32 антенны, поэтому диаграмма направленности каждого фрагмента имеет вытянутую горизонтальную форму и ширину луча по уровню половинной мощности $2\theta_{3dB} = 30^\circ \times 2.5^\circ$ (рис. 2, синяя линия). Конструкция радара позволяет одновременно сформировать несколько принимающих близкорасположенных лучей $2\theta_{3dB} = 2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (рис. 2, красная линия), изменяя фазу сигналов с фрагментов в соответствии с заданным направлением. Подобный режим работы возможен только в режиме приема, так как управлять фазой отдельных фрагментов в режиме передачи нельзя. Поэтому возможные применения данного режима ограничиваются совместной работой между двумя сегментами или при работе с другими инструментами, а также при радиоастрономических наблюдениях.

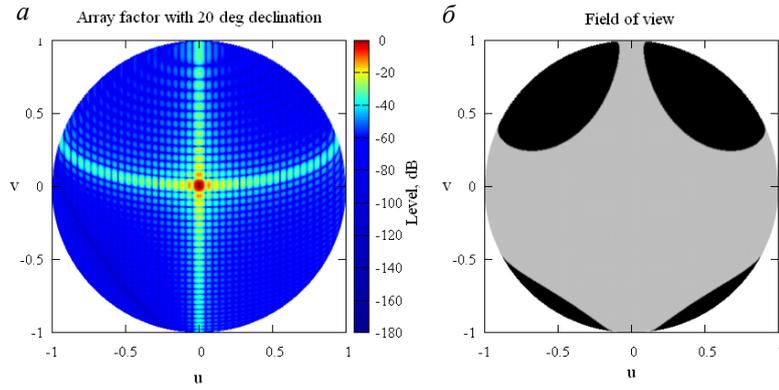


Рис. 1. Диаграмма направленности сегмента (а). Доступный сектор обзора (б). Черным отмечены направления, при которых появляются дополнительные боковые лепестки.

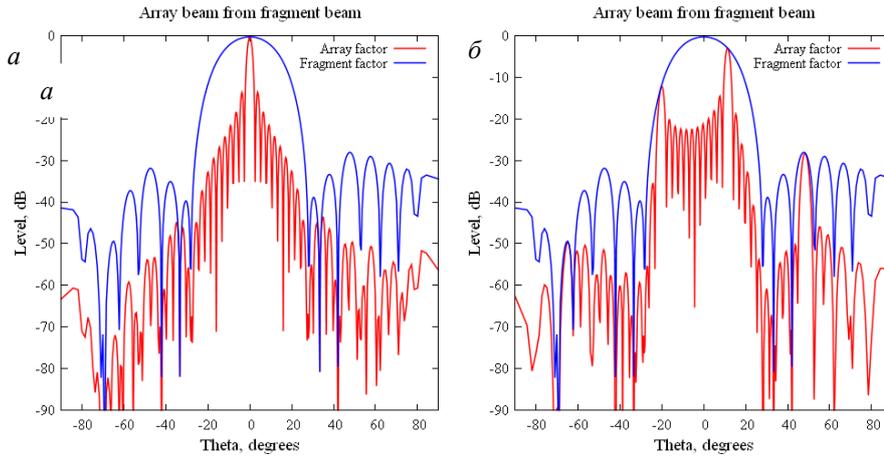


Рис. 2. Формирование луча сегмента из луча фрагмента. Лучи фрагмента и сегмента направлены вертикально (а). Луч решетки отклонен на 11.5° (б).

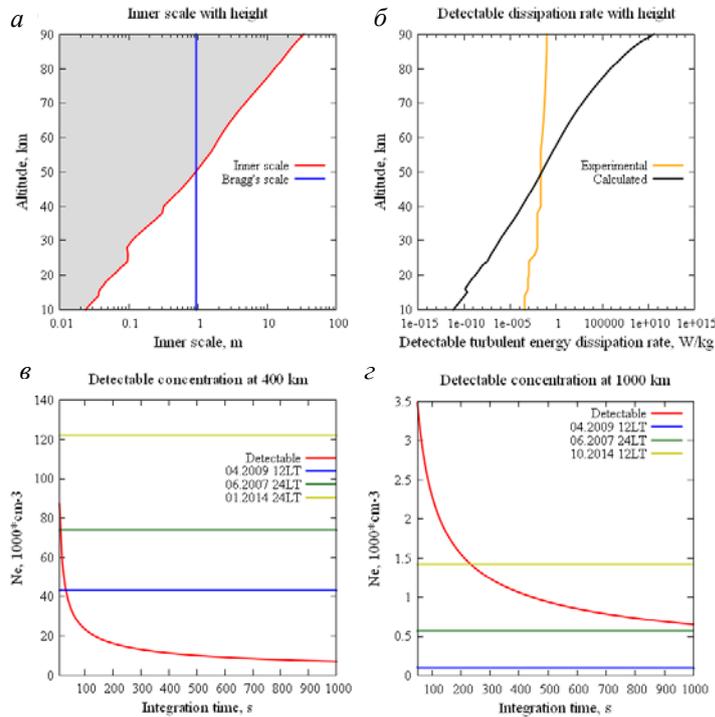


Рис. 3. Профиль характерного размера турбулентностей (а). Синяя линия показывает $\lambda/2$ радара. (б) Минимальная детектируемая ϵ в зависимости от высоты (черная линия) и экспериментально определенная ϵ (темно-желтая линия). Минимальная детектируемая N_e на высотах 400 и 1000 км. Горизонтальными линиями отмечены измеренные значения концентрации на радаре ИРНР (в, г).

Режимы работы радара

В нейтральной атмосфере на высотах до 100 км градиент показателя преломления создается за счет турбулентного движения среды, и отражение радиоволн происходит от вихрей с характерными размерами равными половине длины волны падающего излучения $\lambda/2$ (условие Брэгга). По мере удаления от поверхности Земли кинематическая вязкость атмосферы возрастает, что приводит к затуханию турбулентностей с характерным размером больше некоторого порогового значения.

Характерный размер можно определить по формуле [Hill, Clifford, 1977]:

$$l_0 = 7.4 \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4}$$

где ν – кинематическая вязкость, ϵ – скорость диссипации турбулентной энергии.

Турбулентности характеризуют скоростью, константой показателя преломления C_n^2 , характерным размером l_0 и скоростью диссипации турбулентной энергии ϵ . С помощью экспериментальных данных (например, [Zimmerman, Murphy, 1977]) для разных регионов МСТ построена зависимость l_0 от высоты (рис. 3, а). На высотах ~50 км турбулентности с размером 1 м начинают затухать. Основываясь на характеристиках радара и среды, можно получить минимальную детектируемую ϵ , которой должна обладать турбулентность. Данная зависимость построена на рис. 3, б по оценкам, представленным в [Hocking, 1985] для зависимости ϵ от C_n^2 . Помимо турбулентных потоков, дополнительными механизмами рассеяния служат зеркальные отражатели и когерентные эхо в мезосфере, которые обычно наблюдают в полярных широтах, но происходящие и в среднеширотном регионе.

Подобным образом можно оценить потенциал радара при работе в НР режиме. Для этого вычисляется минимальная детектируемая концентрация электронов на разных высотах и сравнивается с экспериментальными данными. На рис. 3, в, г представлено сравнение экспериментально полученной концентрации на высотах 400 и 1000 км по данным радара ИРНР (горизонтальные линии) и вычисленная зависимость детектируемой радаром НР-МСТ концентрации от времени накопления сигнала. Видно, что уровень концентрации оказывается ниже порогового только на высоте 1000 км.

Заключение

Радар НР-МСТ обладает характеристиками, сравнимыми с другими мировыми радарными подобными типа. Конструкция радара позволяет одновременно формировать 2 передающих луча (по одному лучу с каждого сегмента) и горизонтальный пучок узких приемных лучей. В работе показано, что данный инструмент позволит проводить измерения электронной концентрации в ионосфере на высотах до 1000 км и параметров турбулентностей на высотах до ~50 км. Кроме того, возможно наблюдение процессов в мезосфере, при которых существенно усиливается рассеянный сигнал – когерентных эхо [Hocking, 1997]. Разнос сегментов позволяет применять методы радиоинтерферометрии для увеличения разрешающей способности радара, что требует дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
- Hill R.J., Clifford S.F. Modified spectrum of atmospheric temperature fluctuations and its application to optical propagation // J. Opt. Soc. Am. 1978. V. 68, N 7. P. 892–899.
- Hocking W.K. Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: A review // Radio Science. 1985. V. 20, N 6. P. 1403–1422.
- Hocking W.K. Recent advances in radar instrumentation and techniques for studies of the mesosphere, stratosphere and troposphere // Radio Science. 1997. V. 32, N 6. P. 2241–2270.
- Zimmerman S.P., Murphy E.A. Stratospheric and mesospheric turbulence // Dynamical and Chemical Coupling Between the Neutral and Ionized Atmosphere. 1977. P. 35–47.

Институт Солнечно-Земной Физики, Иркутск, Россия