

УДК 621.396.67

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИРКУТСКОГО РАДАРА НР

В.П. Лебедев, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев

THE METHOD OF THE CALIBRATION OF IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR ANTENNA

V.P. Lebedev, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev

В статье описана методика калибровки диаграммы направленности (ДН) и фазовой характеристики антенны Иркутского радара НР по результатам наблюдений радиоисточника «Лебедь-А». Представлены результаты калибровки: зависимость угла наклона ДН от несущей частоты, фазовая характеристика антенны, ДН каждого полурупора и параметры распределения электромагнитного поля в раскрытие рупора. Исследуется возможность создания синтезированной ДН.

The method of the calibration of Irkutsk incoherent scatter radar antenna pattern and phase characteristic on the base of Cygnus-A radio source observations is described in the paper. The calibration results are presented in the manner of the antenna pattern angle dependence from carrier frequency, the antenna phase characteristic, the antenna pattern for each half-horn and the electromagnetic field distribution on the horn opening. The antenna pattern syntheses possibilities are investigated.

Введение

Иркутский радар НР (ИРНР) представляет собой моностатический импульсный радиолокатор с частотным сканированием (рис. 1). Сканирование осуществляется в направлении север–юг в секторе $\pm 30^\circ$ путем изменения несущей частоты в диапазоне 154–162 МГц. На рис. 2 показана ориентация антенной системы радара.

ДН антенны радара в направлении сканирования (азимутальное направление) формируется линейной решеткой щелевых излучателей. Формирование ДН в поперечном направлении (угломестная плоскость) осуществляется с помощью секториального рупора, разделенного металлической перегородкой на две равные части (два полурупора), каждая из которых связана со своим приемным и передающим трактом. При этом перегородка несколько короче рупора и составляет примерно $2/3$ его высоты [1].

В результате проведенной в 2005 г. технической модернизацией ИРНР появилась возможность проводить независимые наблюдения каждым полурупором и измерять фазовый сдвиг сигнала между ними. Таким образом, для обеспечения надежности штатных измерений встали следующие задачи: уточнить зависимость угла наклона ДН от несущей частоты для каждого канала; измерить ДН для каждого полурупора; провести калибровку параметров высших типов волн, формирующих поле в раскрытие рупора; измерить фазовую характеристику антенны; исследовать возможность синтеза ДН.

Для калибровки ДН необходим источник излучения, который удовлетворял бы следующим требованиям: расположен в зоне Фраунгофера (для ИРНР это порядка 30 км), точечный, мощный, его положение должно быть известно с высокой точностью. Как правило, этим требованиям удовлетворяют мощные вземные источники радиоизлучения [2]. Через сектор сканирования ИРНР в разное время проходит три таких радиоисточника: «Краб», «Кассиопея», «Лебедь-А». Для решения поставленных задач наиболее удобным является радиоисточник «Лебедь-А», его основные характеристики приведены в таблице.

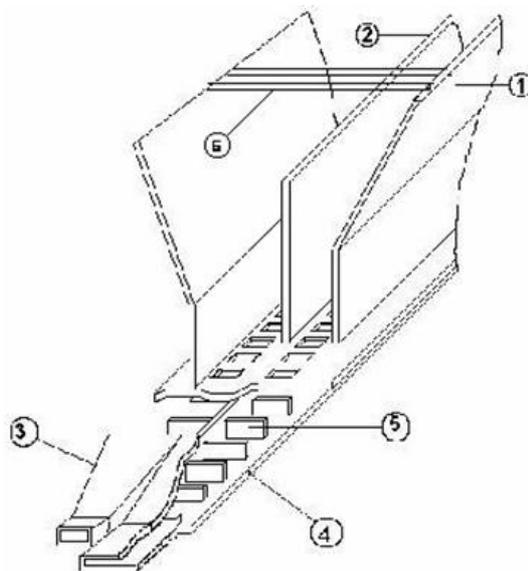


Рис. 1. Структура антенны: 1. Секториальный рупор. 2. Перегородка. 3. Возбуждающие рупоры. 4. Волноводнощелевые антенны. 5. Волноводнощелевые антенны. 6. Замедляющая структура. 6. Поляризационный фильтр, состоящий из металлических полос.

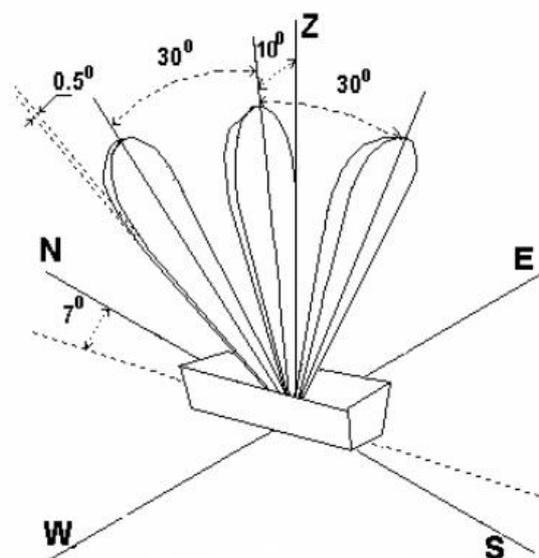


Рис. 2. Ориентация антенной системы радара и размеры суммарной ДН.

Геометрия эксперимента и измерения

Геометрия эксперимента и динамика шумового напряжения, измеренного на разных частотах, представлены на рис. 3, 4.

Уточнение зависимости угла наклона ДН от несущей частоты

В работе [4] уже была рассмотрена зависимость угла наклона ДН от рабочей частоты, но оказалось удобнее использовать следующее соотношение:

$$\varepsilon = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + a_3 f^3, \quad (1)$$

где $f = f_p - 154$, f_p – рабочая частота в МГц, используемая в наблюдениях. Коэффициенты a_i были получены методом наименьших квадратов ($a_0=0.042751$; $a_1=3.040120$; $a_2=0.058269$; $a_3=0.00374$).

Принцип построения пространственного распределения мощности по азимуту и углу места в антенной системе координат

Для того чтобы получить форму ДН в пространстве, было сделано предположение о том, что на близких частотах форма ДН меняется слабо. Следовательно, собирая разрезы ДН в координатах относительно их центров для разных рабочих частот, мы получим ряд сечений, по которым можно восстановить пространственный портрет ДН. Наглядно эта процедура приведена на рис. 5. На рис. 6 приведена восстановленная форма ДН для верхнего и нижнего рупоров для широкополосного и узкополосного сигналов. Видно, что максимумы ДН верхнего и нижнего рупоров смещены от центра примерно на $\theta_0 = \pm 1.5^\circ$ соответственно вверх и вниз. Также видно, что ДН широкополосного сигнала шире ДН узкополосного сигнала.

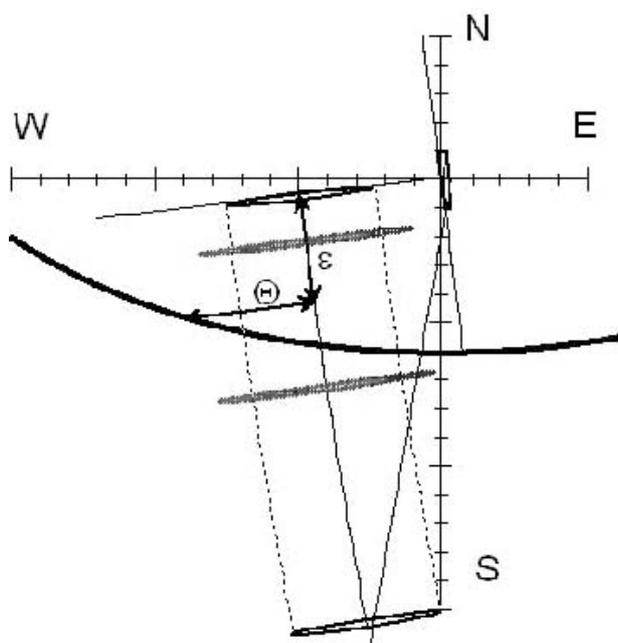


Рис. 3. Проекция на землю сектора сканирования и эфемериды радиостанции: ε – азимут в антенной СК, Θ – антенный угол места. Вытянутые эллипсы соответствуют крайним частотам наблюдения, разными тонами обозначены ДН верхнего и нижнего рупоров.

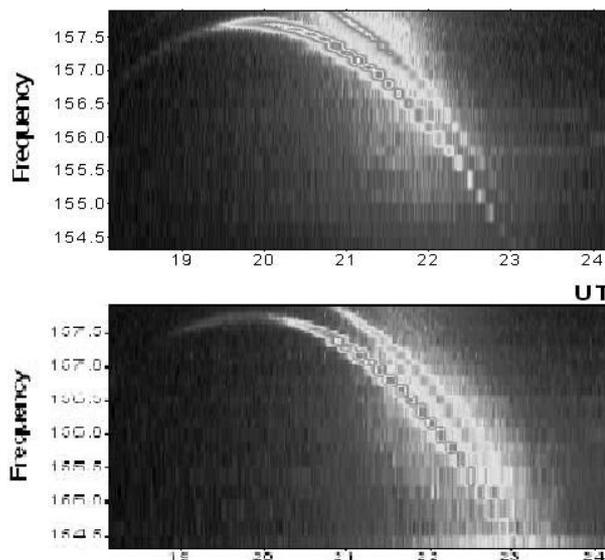


Рис. 4. Экспериментальные зависимости шумового напряжения, принимаемого на различных частотах, во время прохождения радиостанции «Лебедь-А» через ДН радара верхнего и нижнего полурупура. Измерения проводились в режиме циклического сканирования на 25 частотах в диапазоне 155.0–158.0 МГц – узкополосный фильтр и 155.3–158.3 МГц – широкополосный фильтр.

Определение параметров ДН в азимутальной плоскости

Выражение для ДН антенны в плоскости частотного сканирования имеет вид

$$|F(\delta\varepsilon)| = \frac{A}{L} \left(1 - \left(\Delta \cos(kL\delta\varepsilon) + \frac{\Delta^2}{2} \right) \right) \times \sqrt{\frac{1}{\alpha^2 + k^2(\delta\varepsilon)^2}}, \quad (2)$$

где $u = \frac{2\pi L}{\lambda} \sin \varepsilon$, $\delta\varepsilon = \varepsilon(f_p) - \varepsilon(f_p + \delta f)$, $\alpha = \frac{\ln \Delta}{L}$,

Δ – уровень поля в конце антенны в относительных единицах по отношению к началу, L – длина антенны, A – нормировочный коэффициент. Тогда амплитуда измеряемого шумового напряжения с учетом формы фильтра G_{ϕ_i}

$$U(\delta\varepsilon) \sim \int |F(\delta\varepsilon)| G_{\phi_i}(\delta f) d(\delta f). \quad (3)$$

В наших наблюдениях использовался гауссовый фильтр с шириной полосы 25 кГц и 100 кГц. Так как на предыдущем шаге была восстановлена функция $U(\delta\varepsilon)$, а модель ДН в азимутальной плоскости задана выражением (2), то методом наименьших квадратов можно определить параметр Δ , он оказался равен 0.15. На рис. 7 приведена восстановленная по данным четырех каналов форма ДН в азимутальной плоскости.

Определение параметров ДН в угломестной плоскости

Основное отличие поля в рупоре от поля в волноводе состоит в том, что фронт волны в рупоре является не плоским, а цилиндрическим. Тогда сдвиг фаз $\phi(y)$ между возбуждающими полями в центре раскрыва

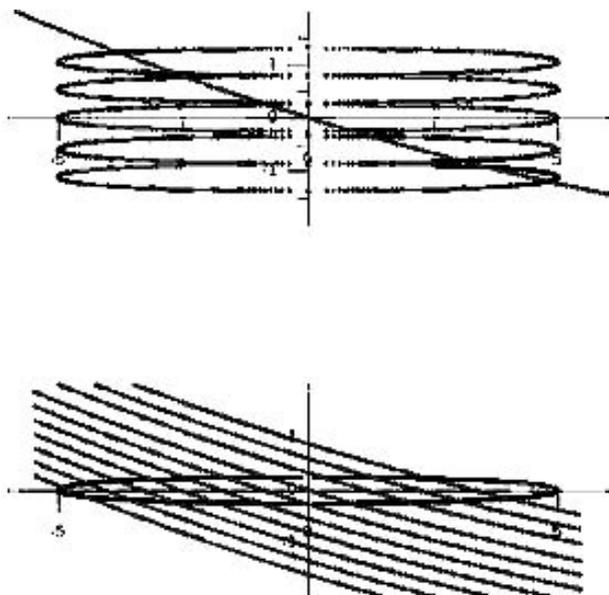


Рис. 5. Сечения ДН на разных частотах, пересчитанные для одночастотного режима наблюдения.

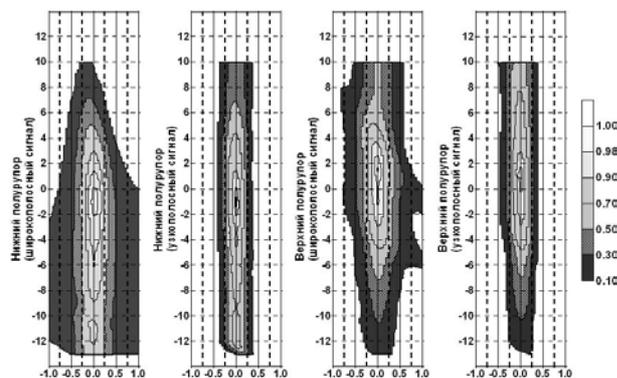


Рис. 6. Пространственное распределение относительной амплитуды поля для верхнего и нижнего рупоров, по оси абсцисс антенный азимут $\delta\varepsilon$, по оси ординат антенный угол места θ .

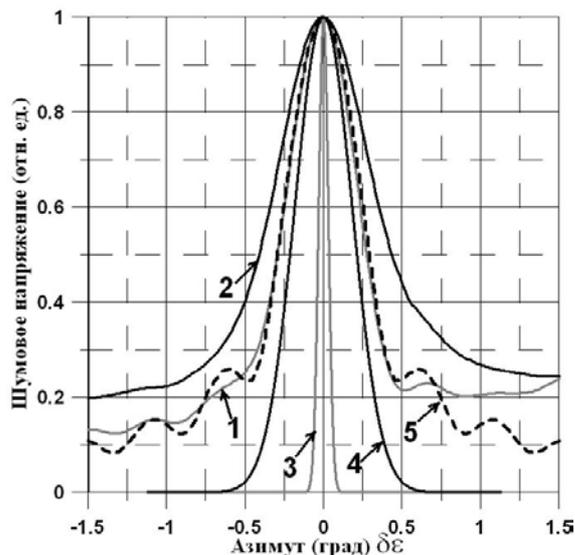


Рис. 7. Сечение пространственного распределения шумового напряжения $U_{\max}(\theta_0, \delta\varepsilon)$ (1 и 2); форма широкополосного и узкополосного фильтров (3 и 4); восстановленная ДН в азимутальной плоскости (5).

и в произвольной точке y можно определить так:

$\varphi(y) = y^2/2H$ [5]. Учет нелинейности фазы на излучающей поверхности приведет к следующему выражению для ДН:

$$F(\theta) = \alpha_{11} \int_{-D/2}^{D/2} E(y) \cdot e^{iky \sin(\theta) + \frac{iky^2}{2H}} dy, \quad (4)$$

где D – размер раскрыва рупора, $H = 21.27\text{м}$, $E(y)$ – распределение поля в раскрыве рупора. За счет резкого изменения размеров рупора за языком кроме основной волны H_{10} возникают волны высших типов $H_{20}, H_{40}, H_{80}, \dots$. Эти волны, распространяясь далее по рупору с разными скоростями, приходят к его раскрыву с разными амплитудами и фазами. В результате в раскрыве рупора формируется поле вида

$$E(y) = \cos\left(\frac{\pi}{D}y\right) + \alpha_{21}e^{i\Delta\psi_{21}} \sin\left(\frac{2\pi}{D}y\right) + \dots + \alpha_{2n1}e^{i\Delta\psi_{2n1}} \sin\left(\frac{2n\pi}{D}y\right). \quad (5)$$

Задачей калибровки антенны в угломестной плоскости является определение параметров $\alpha_{2j1}, \Delta\psi_{2j1}$. Эта задача решалась численно методом наименьших квадратов путем вписывания $|F(\theta)|$ (рис. 8) в точки, соответствующие угломестному разрезу полученного пространственного распределения мощности (см. рис. 6) при $\delta\varepsilon = 0$. Таким образом были найдены параметры $a_{21} = 0.2$; $f_{21} = 18.9$ для верхнего рупора и $a_{21} = 0.2$; $f_{21} = 42.3$ для нижнего рупора.

Определение фазовой характеристики антенны

Фазовый сдвиг между рупорами определяется из условия

максимальной мощности суммы сигналов верхнего рупора U_{up} и сдвинутого на искомую фазу нижнего рупора $U_{\text{down}}e^{i\varphi}$:

$$\sum_{\text{отсчеты}} (U_{\text{up}} + U_{\text{down}} e^{i\varphi})^2 \rightarrow \max. \quad (6)$$

и нижнего рупоров, линии – восстановленные ДН соответственно для верхнего и нижнего рупоров.

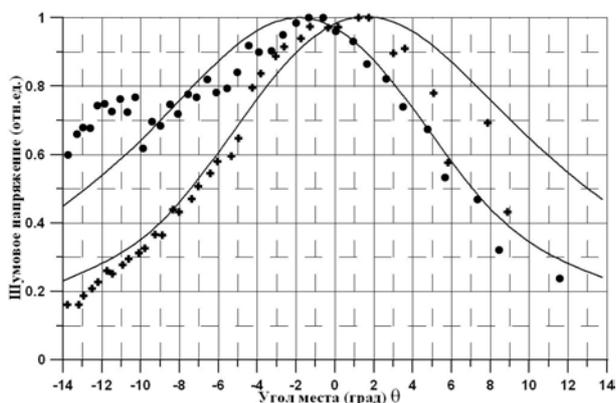


Рис. 8. Крестики и точки – сечение пространственного распределения $U_{\text{max}}(\theta, \delta\epsilon=0)$ соответственно для верхнего

и нижнего рупоров, линии – восстановленные ДН соответственно для верхнего и нижнего рупоров.

Основные характеристики радиосточника «Лебедь-А», [3]

Плотность потока на частоте 152–162 МГц	Поляризация	Координаты на эпоху 26 октября 2005 г.	
		Прямое восхождение	Склонение
10500 Ян ($10.5 \cdot 10^{-23} \text{ВтГм}^{-2}\text{Гц}^{-1}$ погрешность 4.2 %)	Неполяризованное излучение	$19^{\text{h}}59^{\text{m}}40.93^{\text{s}}$	$40^{\circ}44^{\text{m}}13.88^{\text{s}}$

Решая этот функционал относительно φ получим:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sum_{\text{отсчеты}} (a_u b_d - a_d b_u)}{\sum_{\text{отсчеты}} (a_u a_d + b_u b_d)}, \quad (7)$$

где $a_{u,d}$ и $b_{u,d}$ – квадратуры принятого сигнала от верхнего и нижнего рупоров. Так как эфемериды радиосточника известны с большой точностью, то в каждый момент времени найденному значению фазы можно поставить в соответствие угол места радиосточника, таким образом была получена фазовая характеристика антенны (рис. 9). Крутизна фазовой характеристики составляет 16 электр. град./1° угла места, что соответствует интерферометру с базой примерно 4.6 м.

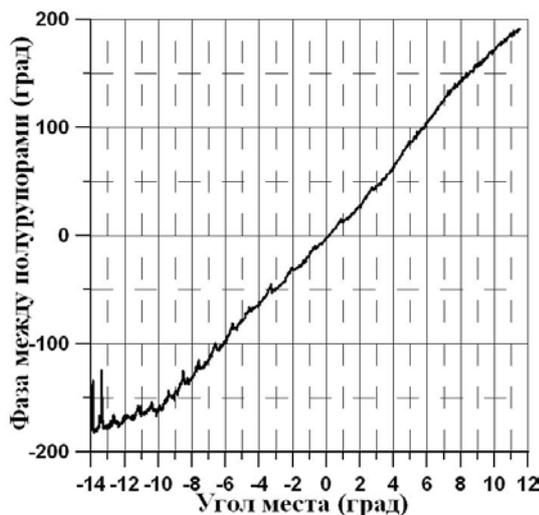


Рис. 9. Фазовая характеристика антенны ИРНР.

Исследование возможности синтеза ДН

Изменить форму ДН в угломестной плоскости можно, складывая сигналы двух антенных каналов с разными фазами. На рис. 10 приведена динамика изменения формы ДН в угломестном направлении в зависимости от разницы фаз между каналами φ_0 . Из рисунка видно, что если разность фаз изменять в пределах $[-90 \div 90^\circ]$, то в пространстве формируется однолепестковая ДН, причем максимум ДН смещается от центрального направления в пределах $[-5 \div 5^\circ]$. Если разность фаз φ_0 составляет 180° , то формируется двухлепестковая ДН. Таким образом, меняя фазу между каналами, можно осуществлять сканирование в угломестной плоскости (запад–восток) в пределах $\pm 5^\circ$.

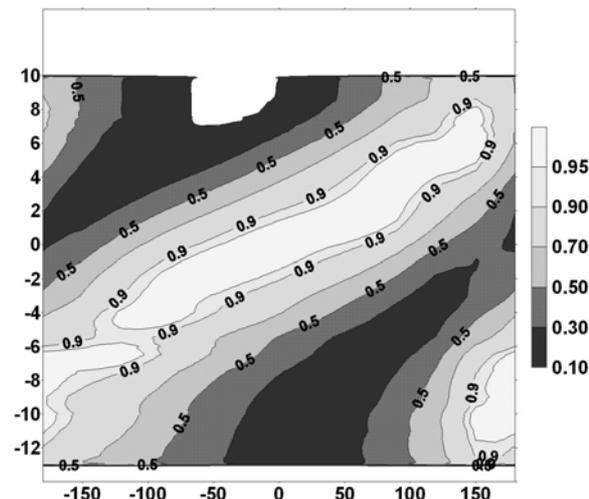


Рис. 10. Динамика изменения ДН в угломестном направлении, по оси абсцисс – разность фаз между рупорами, по оси ординат – угол места Θ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1–7.
2. Цейтлин Н.М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. М.: Советское радио, 1966. 216 с.
3. Поззи Дж.Л., Брейсуэлл Р.Н. Радиоастрономия. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 440 с.
4. Medvedev A.V., Zavorin A.V., Lebedev V.P., et al. Incoherent scatter radar directional pattern using radio astronomical observations // Eighth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric physics. Proceedings of SPIE. 2001. V. 4678. P. 586–591.
5. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1968. 484 с.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, lebedev@iszf.irk.ru