

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.396.67.012.12

*Я.Н. ЧЕПУРНЫЙ, Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, Д.А. ИСКРА*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ПО ОТРАЖЕНИЯМ ОТ КАТАЛОГИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОГЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

### Введение

Антенны радаров некогерентного рассеяния (НР) характеризуются высокой направленностью, большой эффективной площадью и, соответственно, габаритами. В метровом диапазоне радиоволн диаметр рефлектора зеркальных антенн составляет от 25 до 100 м и более. Измерение экспериментальных характеристик таких антенн является сложной задачей, если антенна неподвижна и конструкцией не предусмотрена возможность отклонения ее диаграммы направленности (ДН). В этом случае используется либо очень дорогостоящий метод облета антенны специально оборудованным самолетом, либо радиоастрономический метод, основанный на наблюдении прохождения через ДН антенны внеземных радиоисточников (Кассиопея А, Лебедь А и др.). В последнем случае может быть получено одно сечение ДН – в плоскости географической параллели.

Используется также косвенный метод определения ДН – по измеренным токам на поверхности зеркала [1]. Метод измерения ДН на уменьшенных масштабных моделях применяется, как правило, на этапе разработки антенны и не учитывает технического состояния реальной антенны.

Известны случаи, когда неподвижные антенны радаров НР специально проектировались с наклонным расположением ДН – в направлении, соответствующем прохождению определенного радиоисточника через географический меридиан в месте расположения антенны. Так, первая антенна харьковского радара НР (НПА-30, параболическая, диаметром 30 м) имела отклонение ДН от зенита на  $9^\circ$  к северу (направление на Кассиопею А в момент ее верхней кульминации) [2]. Известная 67-метровая антенна радара НР в Милстон-Хилле имеет отклонение ДН от зенита на  $2^\circ$  [3]. Учитывая географическую широту расположения радара, легко определить, что она направлена на радиоисточник Лебедь А.

Антенна НДА-100 радара Института ионосферы является неподвижной двухзеркальной антенной с ДН, ориентированной в зенит. Главное зеркало антенны в плане представляет собой правильный восьмиугольник, описанный вокруг окружности диаметром 100 м. При рабочей длине волны  $\lambda = 1.9$  м расстояние до дальней зоны ДН (минимальная высота самолета при облете для корректного определения ДН) составляет более 10 км. При строительстве НДА-100 планировалось измерение ее ДН с помощью облета, однако по различным причинам это сделано не было. В настоящее время применение метода облета ДН является экономически сложно выполнимым.

Применение радиоастрономического метода в данном случае также затруднено. Наиболее близким к зениту (на географической широте радара) является радиоисточник 147<sup>b</sup> по Третьему Кембриджскому каталогу [4]. Отклонение радиоисточника от зенита составляет  $0.15^\circ$ , что является заметным при ширине ДН антенны около  $1^\circ$ . Кроме того, этот источник на два порядка слабее, чем Кассиопея А или Лебедь А, что не позволяет оценить уровень боковых лепестков ДН.

Между тем, в процессе проведения измерений ионосферных параметров на радаре НР периодически наблюдаются отражения от объектов космического мусора и действующих искусственных спутников Земли, находящихся на низких околоземных орбитах. Часть из них каталогизирована, и для таких космических объектов (КО) заранее могут быть определены время и направление пересечения ДН антенны радара НР, в том числе через максимум ее главного лепестка.

Цель работы – оценка возможности использования отражений от техногенных космических объектов для измерения ДН антенны радара НР и определения ряда ее технических характеристик.

### Методика проведения измерений ДН по отражениям от космических объектов

Возможность реализации рассматриваемой методики появилась после внедрения на радаре НР оцифровки принятых сигналов на протяжении множества радиолокационных разверток дальности в режиме реального времени с последующей записью. При частоте повторения зондирующих импульсов  $24.4 \text{ Гц}$  за время прохождения объекта, в зависимости от высоты его орбиты, фиксируется от 70 до 800 отсчетов напряжения отраженного сигнала, что обеспечивает достаточную угловую точность определения ДН.

Для радара НР с ориентированной в зенит антенной НДА-100 предлагаемая методика включает в себя следующую последовательность действий:

- 1) определение точных географических координат антенны;
- 2) определение по каталогу космических объектов, проходящих за период проведения ионосферных измерений через зенит для географических координат антенны;
- 3) определение по каталогу точного расстояния до объекта в момент прохождения им зенита;
- 4) наблюдение и запись прохождения КО через ДН антенны;
- 5) пересчет времени наблюдения отражений от конкретного КО в угловые характеристики ДН;
- 6) построение измеренного сечения ДН в плоскости орбиты КО и определение характеристик антенны.

Определение географических координат антенны может быть проведено на основе общедоступных карт и космических снимков местности с точностью не хуже  $0.0001^\circ$ .

В настоящее время существуют достаточно подробные каталоги КО, позволяющие определить с точностью до секунды время их прохождения через ДН, направление движения и дальность до объекта в момент прохождения над антенной [5]. По каталогу выбираются объекты с орбитами, близкими к круговым, пересекающие ДН антенны через максимум ее главного лепестка. При этом известными являются время прохождения и высота орбиты  $h$  объекта в момент пересечения ДН. По известной высоте орбиты определяется скорость КО  $V$  и период его обращения  $T$  вокруг Земли в предположении невозмущенной круговой орбиты [6]:

$$V = \sqrt{\frac{\mu_0}{R}}, \quad (1)$$

$$T = 2\pi R/V, \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 3.98602 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  – гравитационный параметр Земли,  $R$  – радиус орбиты объекта, отсчитываемый от центра Земли.

Далее из соотношения наблюдаемого времени прохождения объекта  $t_{\text{пр}}$  через ДН и периода обращения  $T$  можно определить центральный угол  $\alpha$ , показанный на рис. 1

$$\alpha = \frac{t_{\text{пр}}}{T} 360^\circ. \quad (3)$$

Из геометрических соотношений (см. рис. 1) можно найти угол ДН  $2\theta$  ( $\angle BAC$ ), связанный с центральным углом  $\alpha$ :

$$2\theta = 2\arctg\left(\frac{R_3 + h}{h} \tg \frac{\alpha}{2}\right), \quad (4)$$

где  $h = AM$  – высота орбиты КО над поверхностью Земли,  $R_3 = 6371 \text{ км}$  – радиус Земли.

Указанным способом время наблюдения КО пересчитывается в угол ДН. Таким образом, шаг отсчетов ДН по углу индивидуален для каждого наблюдения и определяется высотой орбиты КО. В приведенных ниже результатах наблюдений шаг отсчетов по углу изменялся в пределах от  $0.0144^\circ$  (для SL-8 R/B) до  $0.033^\circ$  (для Cosmos 1340).

### Экспериментальные результаты

На рис. 2 схематически представлена ориентация антенны НДА-100 (вид сверху) относительно сторон света, а также нанесены траектории некоторых объектов, пересекавших ДН антенны в 2013 г.

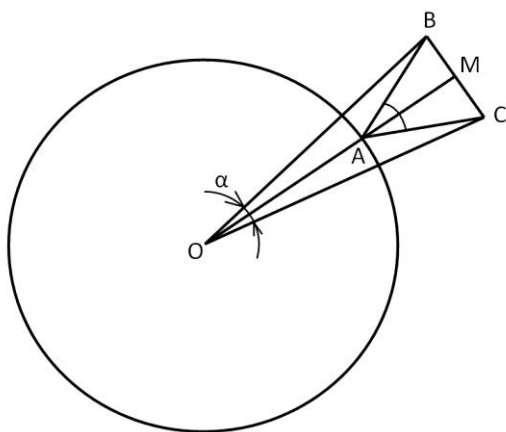


Рис. 1. К определению центрального угла  $\alpha$

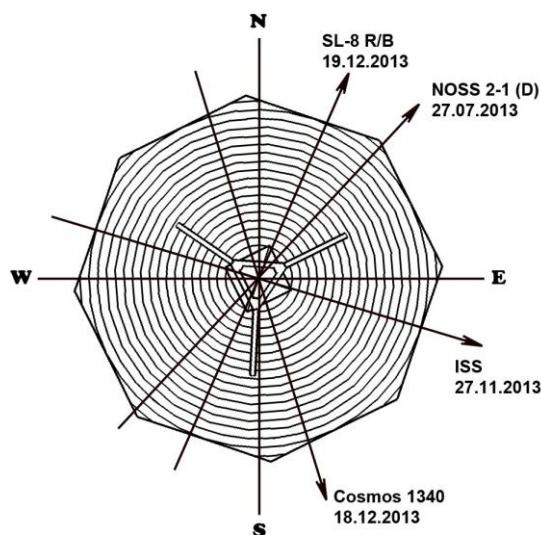


Рис. 2. Ориентация антенны НДА-100 и траектории некоторых космических объектов

Сигналы отражений от КО проходят через антенно-фидерный тракт дважды – первый раз на передачу, второй – на прием. Поэтому, измеренные зависимости соответствуют ДН антенны по мощности, что учитывается при использовании логарифмического масштаба.

Поскольку мощность отражений от КО превышает мощность НР-сигнала на порядок и более, в большинстве случаев происходит его ограничение аналого-цифровым преобразователем (АЦП) аппаратуры обработки. Для исключения ограничения главного лепестка ДН в специально выделенный канал радиоприемного устройства был введен дополнительный аттенюатор. Боковые лепестки ДН хорошо прослеживаются по основному каналу, работающему без аттенюатора. Измеренные ДН «сшиваются» по уровню  $-10\dots-15$  дБ.

На рис. 3 – 6 приведены измеренные сечения ДН антенны НДА-100, полученные по отражениям от некоторых КО. Плоскости орбит КО определяют сечения ДН соответствующими азимутальными плоскостями  $\varphi$  (угол  $\varphi$  отсчитывается к востоку от направления на север до линии входа КО в ДН антенны).

Следует отметить, что уровень отраженного сигнала зависит как от высоты орбиты КО, так и от его геометрических размеров. Так, например, в момент пересечения ДН антенны высота спутника Cosmos 1340 (см. рис. 6) составляла 539 км, а КО SL-8 R/B (см. рис. 4) – 1180 км. В последнем случае отраженный сигнал был значительно слабее и в области боковых лепестков лишь немного превышал шумы приемной системы. Тем не менее, полученные экспериментальные результаты дают представление о форме главного и первых боковых лепестков ДН антенны.

Обращает на себя внимание несимметричный характер ДН в области первых боковых лепестков. Это можно объяснить сложной конструкцией элементов антенны, влияющих на амплитудное и фазовое распределение поля в ее апертуре:

- облучателем является пирамидальный рупор с квадратным раскрытием;

- малое гиперболическое зеркало поддерживается с помощью трех ферм, одна из которых лежит в  $E$ -плоскости облучателя;
- в плане малое зеркало представляет собой круг с тремя вырезами под несущие фермы;
- главное зеркало в плане имеет форму правильного восьмиугольника.

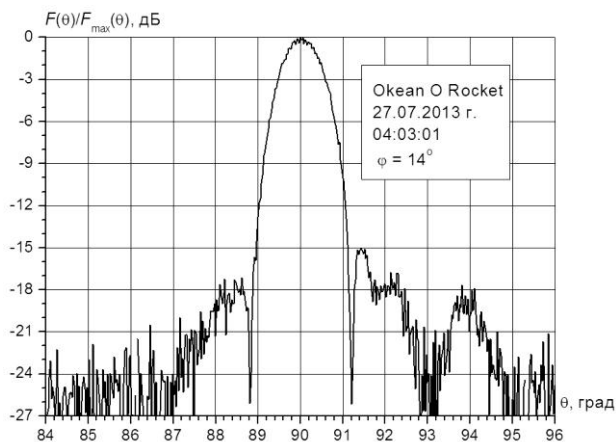


Рис. 3. ДН антенны в плоскости  $\varphi = 14^\circ$

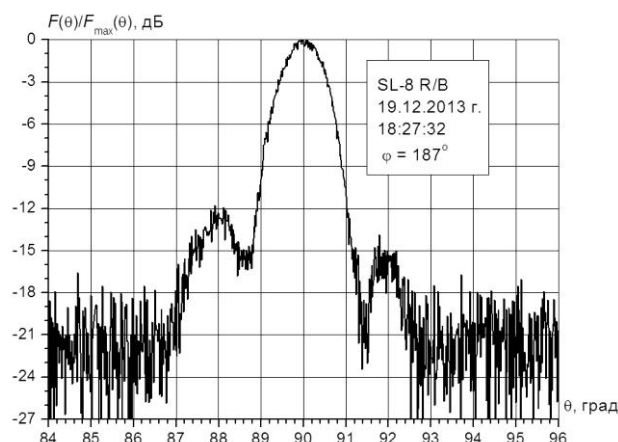


Рис. 4. ДН антенны в плоскости  $\varphi = 187^\circ$

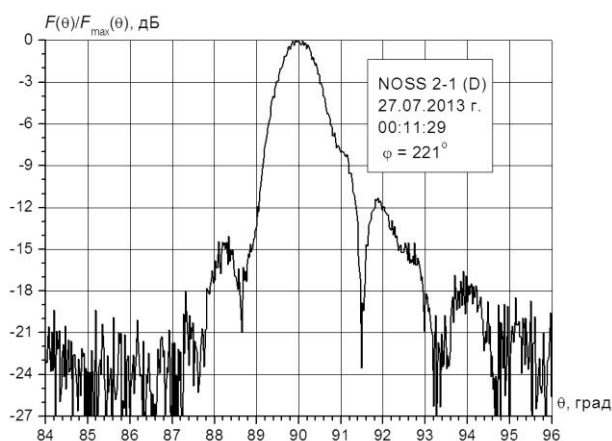


Рис. 5. ДН антенны в плоскости  $\varphi = 221^\circ$

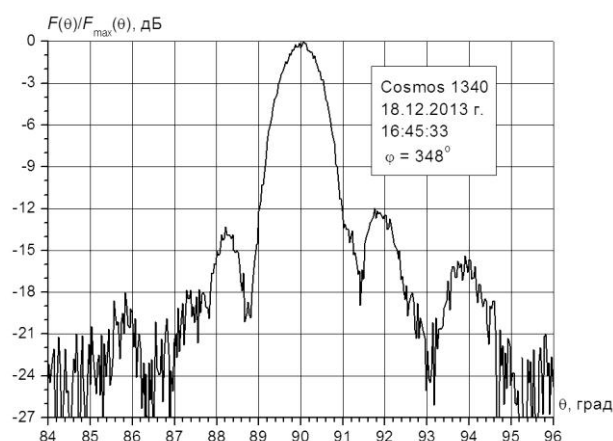


Рис. 6. ДН антенны в плоскости  $\varphi = 348^\circ$

Большие электрические размеры антенны (диаметр более  $52\lambda$ ) обуславливают малую ширину боковых лепестков (около  $2^\circ$ ) и, следовательно, большое их количество в верхней полусфере. Поэтому возможны значительные изменения формы и уровня боковых лепестков при изменении азимутальной плоскости сечения  $\varphi$  всего на несколько градусов. Результаты измерений характеристик ДН антенны приведены в таблице.

Видно, что в различных сечениях ширина ДН по половинной мощности  $2\theta_{0,5P}$  находится в пределах  $1.1^\circ$ – $1.2^\circ$ , ширина ДН по уровню первых нулей – от  $2.4^\circ$  до  $2.85^\circ$ . Несимметричность ДН в плоскости  $\varphi = 221^\circ$  (см. рис. 5) в области главного и 1-го бокового лепестка объясняется влиянием фермы, поддерживающей малое зеркало и лежащей в  $E$ -плоскости рупорного облучателя антенны.

Уровень 1-го бокового лепестка ДН изменяется от  $-15$  до  $-11.3$  дБ, 2-го – от  $-20.3$  до  $-14.7$  дБ.

Таким образом, практическая реализация описанной выше методики позволила впервые получить ряд азимутальных сечений ДН крупногабаритной неподвижной антенны зенитной ориентации, определить ширину и форму главного лепестка ДН, а также уровень 1-го и 2-го боковых лепестков в этих сечениях.

Характеристики ДН антенны НДА-100, измеренные по отражениям от техногенных КО

№ п/п	Наименование КО, дата и время наблюдения	Азимут траектории КО $\varphi$ , град	Ширина ДН $2\theta_0$ , град	Ширина ДН $2\theta_{0.5P}$ , град	Уровень 1-го бокового лепестка, дБ	Уровень 2-го бокового лепестка, дБ
1	NOSS 2-1 (D) 27.07.2013 г. 00:10:59	221	2.85	1.1	-11.3	-16.7
2	Okean O Rocket 27.07.2013 г. 04:03:01	14	2.4	1.1	-15.0	-17.6
3	Cosmos 1340 18.12.2013 г. 16:45:33	348	2.6	1.1	-12.0	-14.7
4	DMSP 5D-2 F13 19.12.2013 г. 16:39:52	163	2.5	1.2	-14.5	-17.1
5	SL-08 R/B 19.12.2013 г. 18:27:32	187	2.6	1.15	-11.7	-20.3

### Выводы

Предложенная методика позволяет проводить измерения ДН антенны радара НР одновременно с определением ионосферных параметров. Достоинством предлагаемой методики является возможность измерения различных сечений ДН. При этом плоскость сечения ДН определяется траекторией космического объекта в момент его прохождения над антенной. Проведенные измерения позволили впервые экспериментально определить ряд характеристик ДН антенны НДА-100 (форму и ширину главного лепестка по половинной мощности и первым нулям, уровни 1-го и 2-го боковых лепестков в различных азимутальных сечениях).

**Список литературы:** 1. *Гукасов, Ю.Г., Ивченко, В.Н.* Измерение диаграмм направленности антенны НДА-100 по токам на поверхности зеркала // *Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния.* Вып. 1. – 1979, №155. – С. 29 – 33. 2. *Андренко, С.Д., Соляник, О.А., Булгаков, В.И.* Параболическая антенна диаметром 30 м // *Радиотехника.* – Харьков : ХГУ, 1971. Вып. 16. – С. 74 – 76. 3. *Armistead, G.W., Evans, J.V., and Reid, W.A.* Measurements of D- and E-region electron densities by the incoherent scatter technique at Millstone Hill // *Radio Science.* – 1972. – Vol. 7, No. 1, P. 153–162. 4. *Краус, Дж.Д.* Радиоастрономия ; пер. с англ. под ред. *Железнякова В.В.* – М. : Сов. радио, 1973. – 456 с. 5. *The DNA Ancestry Project* [Электронный ресурс] / Developed and maintained by Chris Peat, Heavens-Above GmbH-URL <http://www.heavens-above.com> (дата обращения 25.03.2014). 6. *Инженерный справочник по космической технике.* Изд. 2-е, перераб. и доп. ; под ред. *А.В. Соловьева.* – М. : Воениздат, 1977. – 430 с.

*Институт ионосферы НАН и МОН Украины*

*Поступила в редколлегию 12.08.2014*