

УДК 520.272.2

## РАЗРАБОТКА УПРОЩЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

Д.А. Филиппов, А.С. Завгородний

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
*demyan\_school@mail.ru*

*Аннотация.* Предложен упрощённый метод оценки параметров амплитудной диаграммы направленности крупноапертурной двухзеркальной антенной системы по распределению поля по апертуре рупорного облучателя и геометрическим характеристикам антенны. Результаты моделирования сравнены с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* двухзеркальная антenna, диаграмма направленности, дальняя зона, амплитудное распределение поля.

## DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL OF A DUAL-RERLECTOR ANTENNA RADIATION PATTERN

D.A. Philippov, A.S. Zavgorodniy

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
*demyan\_school@mail.ru*

*Abstract.* A simplified method is proposed for estimating the parameters of the amplitude radiation pattern of a large-aperture two-mirror antenna system based on the field distribution over the aperture of the horn irradiator and the geometric characteristics of the antenna. The simulation results are compared with experimental data.

*Keywords:* two-reflector antenna, radiation pattern, far zone, amplitude distribution of the field.

### Введение

В настоящее время, когда технологии глобальных навигационных спутниковых систем активно развиваются, внедряясь жизнь современного общества, возрастают требования, предъявляемые к обеспечению единства измерений в области навигационных сигналов. Измерить параметры радионавигационного поля возможно при помощи метрологических комплексов на основе крупноапертурных антенн. В связи с этим важно проводить калибровку и юстировку используемых антенн, так как их характеристики оказывают непосредственное влияние на результаты измерений.

Как правило, основные требования предъявляются к направленным свойствам антennы, а именно к её диаграмме направленности (ДН), форма которой обычно выражена такими параметрами, как ширина главного лепестка и уровень боковых лепестков.

Одним из способов определения ДН больших наземных антенн является радиоастрономический метод [1], при котором объектами излучения служат небесные тела с заранее известными спектральными характеристиками, например Солнце. Космические объекты расположены на достаточном расстоянии, чтобы соответствовать условию дальней зоны [2]. Несмотря на очевидные преимущества метода прямых измерений ДН, он связан с некоторыми трудностями. Солнце, как и другие небесные тела, находится на небе ограниченное время и на определённых углах возвышения (например, максимальный угол возвышения Солнца в конце декабря не превышает  $10\text{--}12^\circ$  при наблюдении из Московской области). Если говорить о прочих вариантах определения ДН, обеспечить хорошую точность способны измерения, проводимые в безэховых камерах (БЭК) [3]. Но безэховых полигонов, способных вместить крупногабаритные антенны, не так много, а измерения на них дорогостоящие. К тому же измерения в БЭК могут быть не осуществимы вовсе, когда демонтаж антенн не возможен из-за особенностей её конструкции. Поэтому возникает необходимость в точных, но менее трудозатратных измерениях, например, когда диаграмма направленности антенны зеркального типа определяется путём пересчёта из распределения поля её облучателя. Размеры облучателя позволяют поместить его в БЭК и измерить ДН с наилучшей точностью. Далее следует использовать математическую модель, описывающую распределение электромагнитного поля между элементами зеркальной антенны. При помощи пересчёта, основанного на законах геометрической оптики, рассчитывается амплитудное распределение в раскрыве зеркала антенны [4]. После чего амплитудное распределение пересчитывается в диаграмму направленности в дальней зоне [5]. В данной работе развивается подобный подход к определению диаграммы направленности на примере двухзеркальных антенн спутниковой связи.

### **Апертурный метод**

Диаграмма направленности является пространственной характеристикой, то есть зависящей от двух угловых координат. Как упрощение, возможно рассматривать одно из сечений ДН (рис. 1) плоскостью, проходящей по оси симметрии антенны. Обычно эта плоскость ориентирована горизонтально либо вертикально, а полученную ДН называют плоской и определяют выражением [5]:

$$f_c(\theta) = \int_{-L/2}^{L/2} I(x) \cos(kx \sin \theta) dx,$$

где  $\theta$  — угловая координата, отсчитываемая от нормали к излучающей поверхности (апертуре),  $k$  — волновое число и  $I(x)$  — амплитудное распределение поля в раскрыве антенны. Так как плоская ДН является сечением пространственной, то и рассматривать её формирование следует не излучающей поверхностью, а сечением этой поверхности — прямолинейной непрерывной системой излучателей общей длиной  $L$ .

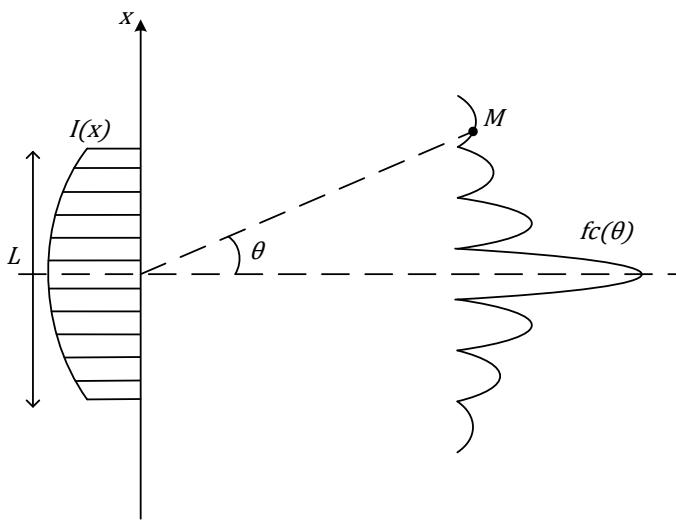


Рис. 1. Формирование поля в дальней зоне

Диаграмма направленности определяется формой амплитудного распределения в раскрыве антенны. На практике амплитудные распределения аппроксимируют различными простыми функциями, общей чертой которых является концентрация энергии по центру апертуры со спадом на краях. Для примера примем вид амплитудного распределения за:

$$I(x) = a + b \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right),$$

это так называемый «косинус на подставке». Тогда выражение для ДН примет вид некоторой функции аргумента  $\theta$  [5]:

$$f_c = aL \sin c\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right) + \frac{2\pi b}{\frac{\pi^2}{L} - k^2 L \sin^2 \theta} \cos\left(\frac{kL \sin \theta}{2}\right).$$

Коэффициенты  $a, b$  обычно не известны. Определить их можно, например, по методу наименьших квадратов [6] по результатам испытаний антенны в дальней зоне. Этот метод использует в своей работе нахождение минимума функции, являющейся разностью экспериментальных значений и значений аппроксимируемой функции (в данном случае  $f_c(\theta)$ ).

Таким образом, принимая вид амплитудного распределения за функцию определённой формы с некоторыми неизвестными параметрами, можно производить переход от известной, измеренной ДН к искомому амплитудному распределению, если это необходимо. Зачастую задача как раз обратная, тогда перейти от амплитудного распределения в раскрыве к ДН антенны возможно напрямую, используя приведённую выше интегральную зависимость.

Более совершенными антennами зеркального типа являются системы с двумя зеркалами. Двухзеркальные антennы активно применяются для построения радиотелескопов и других радиотехнических систем связи и радиолокации. По сравнению с однозеркальными они обладают рядом преимуществ, например:

- более простой системой подводки питания к облучателю и сравнительно малой длинной волноводных трактов от облучателя к приемопередающему устройству, что позволяет размещать приёмник вблизи поверхности рефлектора;
- возможностью размещения приёмника внутри терморегулируемого объёма, что значительно повышает стабильность его работы;
- лучшими электрическими характеристиками, в частности большим коэффициентом использования площади раскрытия антennы за счёт возможностей более равномерного облучения основного рефлектора.

Следует отметить, что недостатком таких систем является сравнительно большее затенение создаваемых контрапрефлектором и элементами крепления.

Схема Кассегрена — одна из классических схем, применяемых при построении двухзеркальных антenn (впервые предложена в 1672 г. для построения оптических систем). Как и в работе других двухзеркальных антenn, здесь используется геометрическое свойство поверхностей второго порядка: если поле облучателя представлено сферическим волновым фронтом с фазовым центром в точке расположения самого облучателя, которая совпадает с одним из фокусов поверхности второго порядка, то при отражении от неё сферичность волнового фронта сохраняется, а фазовый центр перемещается в другой фокус этой поверхности.

Набор отражающих поверхностей в схеме Кассегрена — это гиперболоид вращения в качестве контрапрефлектора (малого зеркала) и параболоид вращения, являющийся основным рефлектором. Тогда по приведённому ранее свойству, после отражения волн от гиперболоида вращения, фазовый центр будет находиться в одном из его фокусов. Так как обе отражающие поверхности делают софокусными, то фазовый центр совпадёт и с фокусом параболоида вращения. Далее принцип работы совпадает с работой однозеркальных антenn: источник, располагаясь в фокусе параболоида вращения, создаёт поле со сферическим волновым фронтом, который при отражении от основного рефлектора (параболоида вращения) преобразуется в плоский.

Так как конструкция антennы Кассегрена осесимметрична, для упрощения весь расчёт проводится в одной из плоскостей, проходящей по оси симметрии (рис. 2). Воспользуемся уже готовой взаимосвязью между распределением поля облучателя  $F_0(\phi)$  и амплитудным распределением в раскрытии основного рефлектора  $I(\psi)$ , вычисленной по правилам геометрической оптики [4]:

$$I(\psi) = \frac{f}{F} \frac{(1+\mu) \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)^2}{1 + \mu \cos \psi} F_0(\phi),$$

где  $\phi$  и  $\psi$  — угловые координаты для одних и тех же точек, но отсчитываемые от разных фокусов гиперболоида (назовем их  $O$  и  $O1$ ).

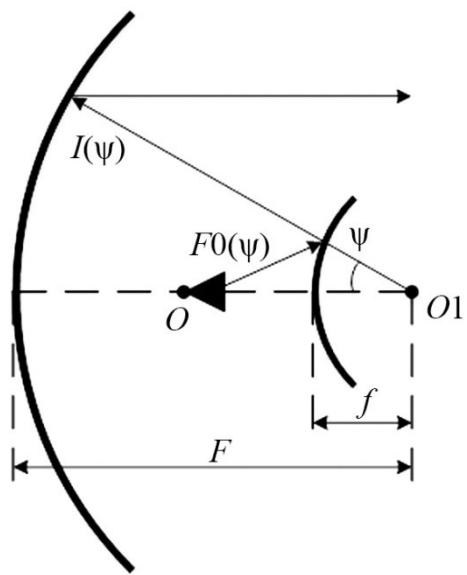


Рис. 2. Схема Кассегрена

Углы  $\varphi$  и  $\psi$  связаны соотношением [4]:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\psi}{2}\right) = \left|\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1}\right| \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right).$$

Расстояния от общего фокуса  $O1$  до вершины параболы и гиперболы соответственно обозначены  $F$  и  $f$ , облучатель же расположен в точке  $O$ ,  $\varepsilon$  — эксцентриситет гиперболоида,  $\mu$  — коэффициент, введённый для упрощения записи:

$$\mu = \frac{2\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}.$$

Таким образом, для составления математической модели распределения поля антенны достаточно иметь данные о её форме: знать параметры  $F, f, \varepsilon, D$  и  $d$  (диаметры основного рефлектора и контррефлектора соответственно).

Представленный метод иногда называют лучевым, так как он описывает поле излучения в виде траектории луча, проходящей между обеими отражающими поверхностями. Поле рассматривается вблизи излучающих поверхностей  $\frac{D^2}{10\lambda}$ , поэтому и применение моделей, использующих в своей основе законы геометрической оптики, будет оправдано. Этот метод является упрощённым и не учитывает затенение, создаваемое контррефлектором. Для более точной оценки можно применять модель, описанную в том же источнике [4].

### Результаты сравнения математической модели с экспериментальными данными

Для проверки разработанной математической модели потребуется знать диаграмму направленности и распределение поля облучателя реальной двухзеркальной антенны. В качестве объекта исследований выбрана антenna Метрологического комплекса оценки энергетических характеристик, расположенная во ФГУП «ВНИИФТРИ». У этой антенны полностью известны её геометрические параметры, а именно её размеры и форма. Распределение поля облучателя оценивалось по формулам для рупора конической формы [2]. Все необходимые параметры были учтены в предложенной выше модели, результат расчётов формы ДН сравнивался с заранее измеренной характеристикой (рис. 3). Следует обратить внимание, что метод разрабатывался для работы с результатами распределения поля в раскрыте рупора облучателя в качестве исходных данных, а не оценки по упрощённым формулам. Однако на этапе оценки состоятельности модели оценочных формул оказалось достаточно.

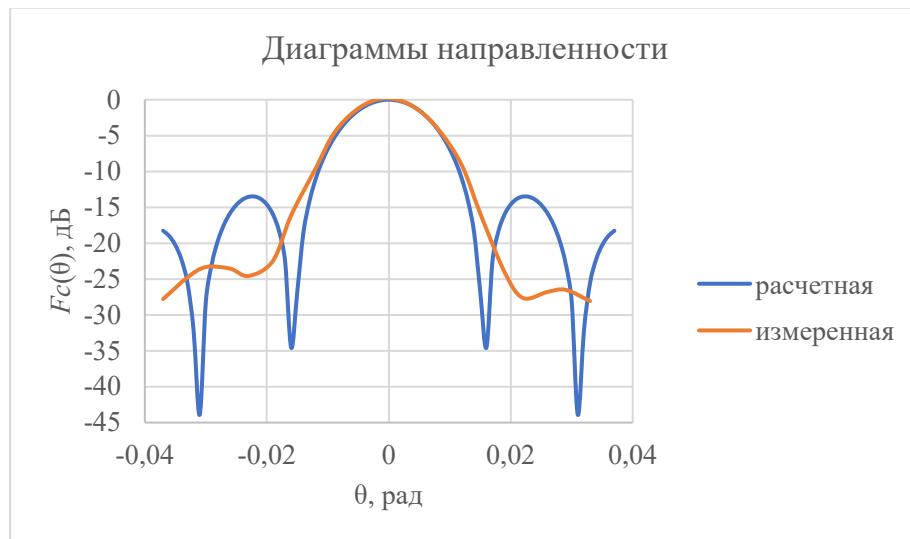


Рис. 3. Сравнение измеренной и расчётной ДН

Прямые измерения диаграммы направленности проводились радиоастрономическим методом, в качестве источника излучения было выбрано Солнце. Располагаясь на расстоянии около 1 а.е. (1,07 а.е. непосредственно в день выполнения измерений), оно удовлетворяет условию дальней зоны  $2D^2 / \lambda$ , а также условию точечности [7]. Солнечный спектр излучения охватывает широкий диапазон радиочастот, в том числе диапазон L1, в котором проводились измерения. При этом из всех небесных тел Солнце обладает наибольшей интенсивностью излучения, что снизило влияние помех на результаты измерений. Подробнее об определении диаграммы направленности радиоастрономическим методом изложено в статье [1]. Отличия двух ДН в пределах

главных лепестковпренебрежимо малы, максимумы смешены всего лишь на 0,007 рад. В области боковых лепестков расхождение существенное, разница составила около 10 дБ. Т.е. хорошее совпадение обеспечено только в пределах главного лепестка ДН. Расхождение может быть вызвано погрешностью измерений самой ДН, а также влиянием затенений от контррефлектора и элементов креплений. Учесть влияние затенений возможно, вводя необходимый поправочный коэффициент.

### **Выводы**

Предложенная модель выгодно отличается простотой от классического подхода, однако даёт хорошее совпадение лишь в пределах основного лепестка. Работа будет продолжена в части учёта эффектов затенения и краевых эффектов.

### **Список литературы**

1. Завгородний А.С., Воронов В.Л., Рябов И.В. Об определении поправок наведения антенной системы Метрологического комплекса оценки энергетических характеристик радионавигационных сигналов // Альманах современной метрологии. — 2017. — № 11. — С. 171–183.
2. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
3. Будай А.Г., Гринцук А.П., Громыко А.В. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне // Приборы и методы измерений. — 2017. — № 4. — С. 334–343.
4. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. Ч. 2. — М.: Связь, 1977. — 288 с.
5. Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А. и др. Антенны. — Тамбов: Издательство ТГТУ, 2014. — 128 с.
6. Метод наименьших квадратов: метод. указания / сост. Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. — Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. — 32 с.
7. Фролов О.П., Вальд В.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. — М.: Горячая линия-Телеком, 2008. — 496 с.

*Статья поступила в редакцию: 12.09.2022 г.*

*Статья прошла рецензирование: 01.11.2022 г.*

*Статья принята в работу: 07.11.2022 г.*