

УДК 621.396.67.091 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.75.80

## Расчет коэффициента усиления антенн через трехмерное представление диаграмм направленности и оценка их взаимного влияния

**В. И. Толкачев**, к. воен. н., [tolkachev\\_1707@mail.ru](mailto:tolkachev_1707@mail.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**О. Г. Пикалов**, к. т. н., [pikalov-og@bk.ru](mailto:pikalov-og@bk.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**С. В. Паньчев**, к. т. н., [sergey\\_p76@mail.ru](mailto:sergey_p76@mail.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**И. Г. Новиков**, [novige@mail.ru](mailto:novige@mail.ru)

ФГБОУ «Московский технологический университет» (МИРЭА), Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье рассматривается задача определения коэффициента усиления произвольно ориентированной известной антенны в заданном направлении. Решение такой задачи необходимо при оценке электромагнитной совместимости радиотехнических систем, содержащих одновременно приемные и передающие сегменты, оборудованные собственными антеннами. Основное внимание уделяется рассмотрению и анализу формы диаграммы направленности антенны (ДНА), которая представляется в виде трехмерной фигуры вращения.

Определение интенсивности пространственного взаимодействия приемной и передающей антенн посредством моделирования форм их диаграмм направленности с учетом их взаимной ориентации является одной из важнейших задач определения степени влияния передающего сегмента на приемные устройства радиотехнической системы.

Метод, рассмотренный в статье, предполагает несложную программную реализацию и рассчитан на применение в специальных программных продуктах, создаваемых для анализа электромагнитной обстановки в радиотехнических системах, а также для оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

**Ключевые слова:** диаграмма направленности антенны, коэффициент усиления антенны, электромагнитная совместимость

## Calculation of Antenna Gain via 3D Radiation Pattern and Estimation of Their Mutual Influence

**V. I. Tolkachev**, *Cand. Sci. (Military)*, [tolkachev\\_1707@mail.ru](mailto:tolkachev_1707@mail.ru)

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**O. G. Pikalov**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [pikalov-og@bk.ru](mailto:pikalov-og@bk.ru)

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**S. V. Pan'chev**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [sergey\\_p76@mail.ru](mailto:sergey_p76@mail.ru)

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**I. G. Novikov**, [novige@mail.ru](mailto:novige@mail.ru)

Federal State Budget Educational Institution "Moscow Technological University" (MIREA),  
Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers the task to determine the gain of the optionally beamed antenna on the set direction. It is necessary to solve the task when evaluating electromagnetic compatibility of radio engineering systems involving both receiving and transmitting segments equipped with in-house antennas. The main attention is focused on treatment and analysis of the form of the antenna radiation pattern appearing as a 3D rotation figure.

The determination of the intensity of the 3D interaction of receiving and transmitting antennas by means of simulating the radiation patterns considering their mutual orientation is one of the most important task of obtaining the degree of the influence of the transmitting segment on the reception devices of the radio engineering system.

The method given in the paper presumes a simple software realization and is slated to be applied in the special software product created for the analysis of the electromagnetic situation in radio engineering systems, as well as for evaluating electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities.

**Keywords:** antenna radiation pattern, antenna gain, electromagnetic compatibility

## Введение

Как известно, любая аппаратура, связанная с приемом или передачей информации посредством электромагнитных волн, снабжена антенной в том или ином виде.

Немало труда было потрачено инженерами, чтобы добиться от создаваемых антенн требуемых параметров, в первую очередь снижающих энергетические затраты на передачу полезных электромагнитных сигналов в нужном направлении, а также улучшающих прием полезных сигналов с интересующих направлений. Одним из таких параметров можно считать коэффициент усиления антенны (КУ), определяемый как отношение плотности потока излучаемой энергии в некотором направлении при помощи рассматриваемой антенны к плотности потока, которая излучалась бы в этом же направлении изотропной антенной (то есть воображаемой, идеальной антенной, излучающей с равномерной интенсивностью по всем направлениям). Отображение коэффициентов усиления антенны в сферической системе координат, где интенсивность излучения отображается радиальной координатой, а направление — азимутальной, называется диаграммой направленности антенны (ДНА). Разумеется, что каждый тип антенны, каждое ее габаритное исполнение, в зависимости от используемых частот излучения или приема, имеет свою характерную форму диаграммы направленности.

Формы диаграмм направленности имеют весьма разнообразный вид. Они могут как обладать главным лепестком, а также боковыми и обратными лепестками (что характерно для узконаправленных, например параболических антенн, рис. 1), так и не обладать ими, как, например, диаграммы направленности штыревых антенн (рис. 2).

Когда речь идет о максимальном качестве передачи или приема сигнала, то исходя из приведенных рисунков можно интуитивно понять, что оно достигается ориентацией антенны таким образом, чтобы радиальная координата диаграммы направленности (другими словами, коэффициент усиления) была максимальна в направлении приемника (в случае передачи) или источника сигнала (в случае приема).

В данной статье предлагается рассмотреть другую задачу — **определение коэффициента**

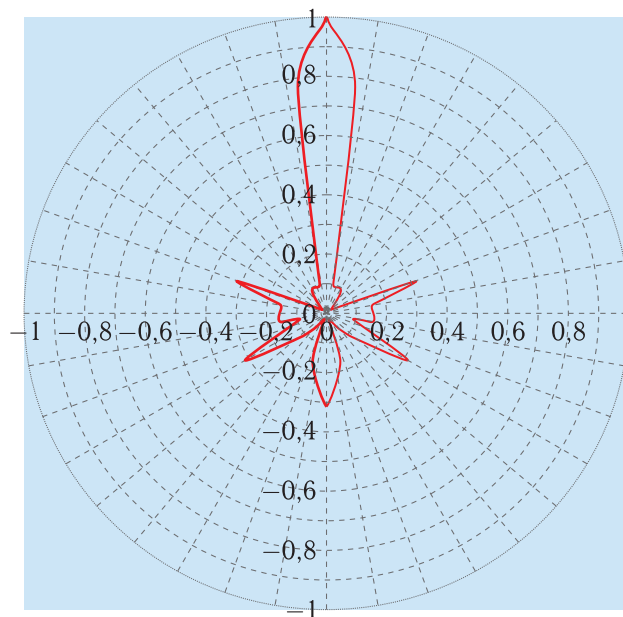


Рис. 1. Диаграмма направленности узконаправленной антенны

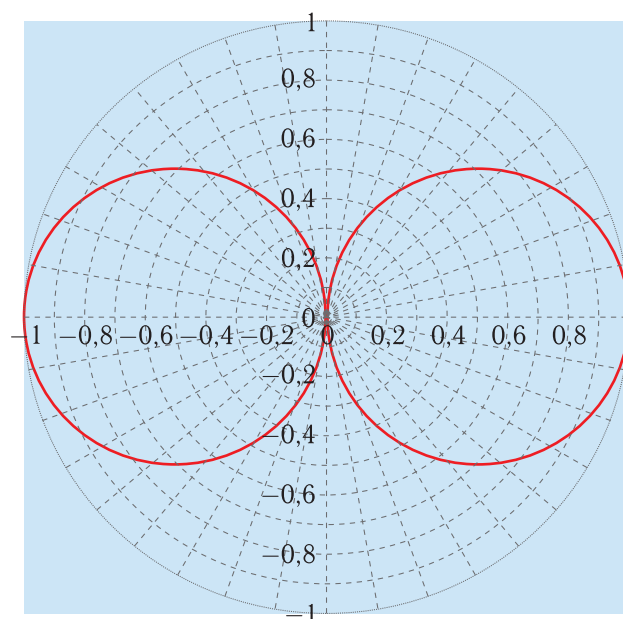


Рис. 2. Диаграмма направленности стержневой антенны

**усиления произвольно ориентированной известной антенны в заданном направлении.** Решение такой задачи необходимо, например, при оценке проблемы электромагнитной совместимости для систем, содержащих одновременно приемные и передающие сегменты, оборудованные собственными антеннами. В этом случае подразумевается, что приемные и передающие сегменты работают

по независимым друг от друга каналам. При этом возникает необходимость оценить паразитное влияние работы передающих сегментов на каналы приемных. Одна из составных частей такого расчета — оценка взаимных коэффициентов усиления передающих и приемных антенн.

В данной статье будет рассмотрен метод оценки взаимных коэффициентов усиления для одной пары антенн, одна из которых передающая, другая — приемная. Разумеется, для большой системы, содержащей по несколько приемных и передающих сегментов (например, для космического аппарата), необходимо будет проводить попарный анализ.

Необходимыми входными данными для решения данной задачи будем считать:

1. Координаты размещения передающей и приемной антенн (подразумеваются декартовы координаты  $x, y, z$ , заданные в произвольной, но единой для обеих антенн системе координат).

2. Углы поворота осей антенн — азимут и угол места (нулевым азимутом считаем ось  $OX$ , а поворотом по азимуту считаем поворот в плоскости  $XOY$ . Под углом места понимаем угол между осью антенны и плоскостью  $XOY$ ).

3. Форма диаграмм направленности рассматриваемых антенн.

Стоит заметить, что, независимо от формы диаграммы направленности, под осью мы будем понимать прямую, располагаемую по нулевому углу диаграммы. На рисунках, приведенных выше, осью является вертикальная прямая, проходящая через центр.

Для начала осуществим расчет коэффициента усиления некоторой заданной передающей антенны в направлении некоторой заданной приемной антенны.

Первым шагом нашего расчета будет нахождение угла между осью передающей антенны и направлением на приемную антенну (которую в данном случае мы упрощенно считаем точкой).

Угол направления между антеннами — это угол между тремя точками в пространстве:  $t1$  — местоположение антенны приемника,  $t2$  — местоположение антенны передатчика,  $t3$  — произвольная точка на оси ДНА передатчика (если мы ищем угол между осью антенны передатчика и направлением на антенну приемника, рис. 3).

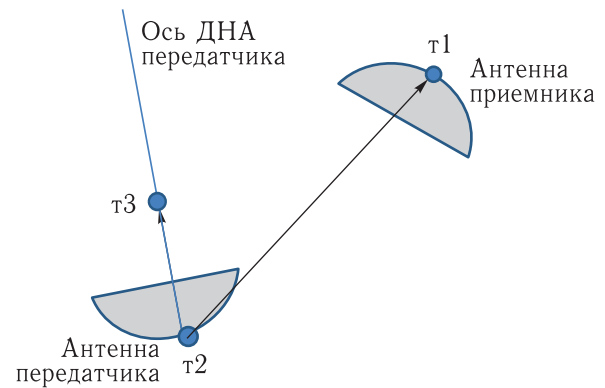


Рис. 3. Схематичное отображение расположения антенн

Как было сказано выше,  $t1$  задана декартовыми координатами,  $t2$  тоже декартовыми координатами. В качестве точки  $t3$  возьмем точку по оси диаграммы направленности передатчика, отстоящую от точки  $t2$  на 1 единицу (например, 1 м, при условии, что шкала системы координат задана в метрах). Таким образом, мы знаем координаты точек  $t1$  и  $t2$ , а координату точки  $t3$  нам предстоит определить.

При помощи несложных тригонометрических преобразований получим, что координаты точки  $t3$  численно равны:

$$x_3 = x_2 + \cos(a) \cdot \cos(b), \quad (1)$$

$$y_3 = y_2 - \sin(a) \cdot \cos(b), \quad (2)$$

$$z_3 = z_2 + \sin(b), \quad (3)$$

где  $a$  — азимут антенны передатчика;

$b$  — угол места антенны передатчика;

$x_2, y_2, z_2$  — декартовы координаты передатчика.

Теперь мы имеем координаты всех трех точек. Найти угол между ними можно как угол между векторами  $t2t1$  и  $t2t3$ .

Косинус угла между векторами находится как отношение скалярного произведения векторов к произведению их длин.

Соответственно сам угол (назовем его  $\alpha$ ) находится по формуле

$$\alpha = \arccos \left( \frac{(x_3 - x_2) \cdot (x_1 - x_2) + (y_3 - y_2) \cdot (y_1 - y_2) + (z_3 - z_2) \cdot (z_1 - z_2)}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} \times \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right). \quad (4)$$

В формуле (4) вычитание значений  $x_2$ ,  $y_2$ ,  $z_2$  из координат других интересующих нас точек показывает параллельный перенос рассматриваемой системы в начало координат.

Итак, угол между осью передающей антенны и направлением на приемную антенну определен. Теперь возникает задача определения коэффициента усиления передающей антенны, соответствующего данному углу. Для этого нам понадобится провести определенный анализ диаграммы направленности передающей антенны.

Для математического задания формы диаграммы направленности представим ее в виде двухмерной таблицы. Первое поле будет отражать отклонение в градусах от главной оси. Интервал, который необходимо рассмотреть в интервале  $0-180^\circ$ . Здесь мы делаем определенное допущение и считаем диаграмму направленности симметричной относительно оси антенны, а ее сечение перпендикулярной оси плоскостью соответственно круговым.

Второе поле таблицы будет отражать относительную мощность, излучаемую антенной в направлении, соответствующем значению первого поля. Максимальное значение такой относительной мощности примем за 1 (таблица).

Для наглядности эти табличные данные можно отобразить на графике, а также обозначить вершины полученной фигуры (рис. 4).

Теперь диаграмму направленности, заданную таблицей, можно представить как тело вращения

Таблица. Таблица приближенного описания диаграммы направленности

| Угол между осью антенны и направлением, град | Относительная мощность, раз |
|----------------------------------------------|-----------------------------|
| 0                                            | 1,00                        |
| 20                                           | 0,79                        |
| 40                                           | 0,32                        |
| 60                                           | 0,40                        |
| 80                                           | 0,32                        |
| 100                                          | 0,50                        |
| 120                                          | 0,32                        |
| 140                                          | 0,50                        |
| 160                                          | 0,32                        |
| 180                                          | 0,79                        |

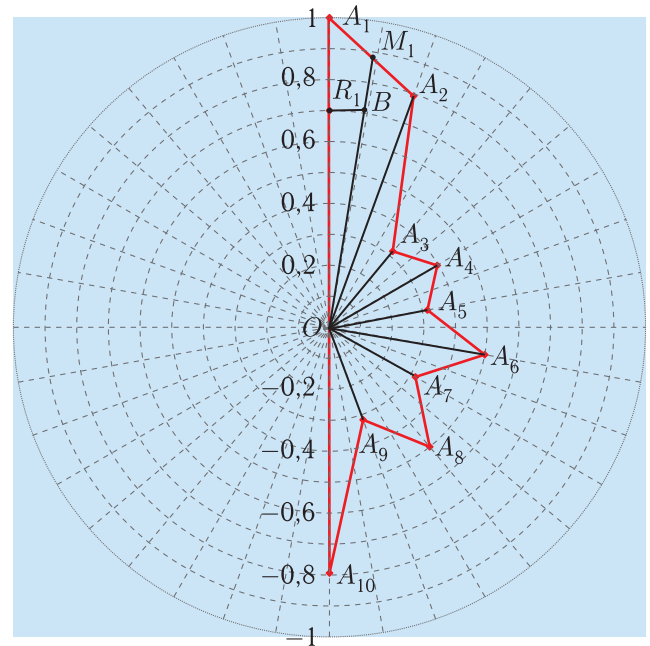


Рис. 4. Графическое отображение табличных данных

фигуры, изображенной на рис. 4 вокруг прямой  $OA_1$ . Как легко увидеть, фигура состоит из треугольников ( $A_1OA_2$ ,  $A_2OA_3$ ,  $A_3OA_4$  и т.д.), причем для каждого такого треугольника нам известны длины сторон, равные относительным мощностям, и углы между ними (равные разнице углов, заданных в таблице).

Общую мощность передатчика, излучаемую данной антенной, можно интерпретировать как объем диаграммы направленности (то есть тела вращения рассматриваемой фигуры). Для нахождения объема тела вращения воспользуемся **второй теоремой Гульдина–Паппа**, которая гласит:

*Объем тела, образованного вращением плоской фигуры вокруг оси, расположенной в той же плоскости и не пересекающей фигуру, равен площади фигуры, умноженной на длину окружности, радиусом которой служит расстояние от оси вращения до барицентра фигуры.*

Таким образом, можно сделать вывод, что общий объем тела вращения будет представлять собой композицию тел вращения указанных выше треугольников.

Возьмем первый треугольник —  $A_1OA_2$ .

Его площадь легко вычисляется по формуле

$$S_1 = 1/2 \cdot OA_1 \cdot OA_2 \cdot \sin(A_1OA_2). \quad (5)$$

Теперь необходимо найти барицентр (центр масс) рассматриваемого треугольника. Из геометрии известно, что барицентр треугольника лежит на пересечении медиан, а медианы пересекаются в отношении 2 : 1.

Сначала найдем длину стороны  $A_1A_2$  по теореме косинусов:

$$A_1A_2 = \sqrt{(OA_1^2 + OA_2^2 - 2 \cdot OA_1 \cdot OA_2 \cdot \cos(A_1OA_2))}. \quad (6)$$

Зная стороны треугольника, определяем длину медианы, проведенную к  $A_1A_2$  по формуле

$$OM_1 = 1/2 \cdot \sqrt{(OA_1^2 + OA_2^2 - A_1A_2^2)}, \quad (7)$$

а затем умножаем эту длину ( $OM_1$ ) на 2/3, определяя положение барицентра ( $B$ ) на медиане. Теперь необходимо определить расстояние от барицентра до оси  $OA_1$ , потому что для расчета объема нужно знать длину окружности, которую описывает барицентр при вращении. Радиус этой окружности — как раз длина перпендикуляра, опущенного из барицентра на ось  $OA_1$ .

Понимая, что медиана делит треугольник пополам в смысле площади, и зная площадь треугольника  $OA_1A_2$  ( $S_1$ ), находим угол между медианой и осью  $OA_1$ :

$$A_1OM_1 = \arcsin \left( 1/2(S_1/(1/2 \cdot OA_1 \cdot OM_1)) \right). \quad (8)$$

Отсюда определяем расстояние от оси  $OA_1$  до барицентра (см. рис. 4):

$$R_1 = 2/3 \cdot OM_1 \cdot \sin(A_1OM_1). \quad (9)$$

Применяя вторую теорему Гульдина–Паппа, получаем, что объем тела вращения треугольника  $A_1OA_2$  равен

$$V_1 = S_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1. \quad (10)$$

Аналогичным образом находим объемы тел вращения других треугольников фигуры, после чего, сложив их, получаем общий объем тела вращения всей фигуры ( $V$ ).

При излучении той же мощности изотропной антенной (вспомним, что изотропная антенна —

это идеальная антенна, излучающая равномерно во всех направлениях) диаграмма направленности выглядела бы как шар того же объема  $V$  с радиусом, равным:

$$R_{\text{и}} = \sqrt[3]{3/4 \cdot V/\pi}. \quad (11)$$

Таким образом, мы геометрически интерпретировали мощность изотропного излучения величиной  $R_{\text{и}}$  и получили возможность определить коэффициент усиления антенны в направлении, угол которого рассчитан формулой (4). Для этого необходимо найти величину радиального параметра  $R$  по рис. 4 для этого угла ( $\alpha$ ). Это возможно сделать с помощью несложного линейного расчета по пропорциям. Сначала определяется треугольник, в который попадает луч угла  $\alpha$ , затем используется следующая формула:

$$R = (\alpha - A_1OA_n)/(A_1OA_{n+1} - A_1OA_n) \times (OA_{n+1} - OA_n) + OA_n, \quad (12)$$

где  $n$  — номер треугольника, в который попадает луч угла  $\alpha$ .

Теперь у нас есть возможность найти отношение радиальных параметров  $R$  и  $R_{\text{и}}$  и, таким образом, определить коэффициент усиления передающей антенны в направлении приемной антенны:

$$\text{GER} = R/R_{\text{и}}. \quad (13)$$

Обозначение *GER* основано на английских словах *gain* (усиление), *emitter* (излучатель), *receiver* (приемник) и показывает рассматриваемое направление усиления («от передатчика к приемнику», в противоположность *GRE* — коэффициента усиления приемной антенны в направлении передатчика).

Таким же образом вычисляется коэффициент усиления приемной антенны в направлении передатчика. Стоит напомнить, что полученные значения *GER* и *GRE* измеряются в «разах», поэтому коэффициентом передачи мощности от передатчика к приемнику можно считать произведение  $\text{GER} \times \text{GRE}$ . В некоторых случаях значения *GER* и *GRE* переводят в децибелы и тогда коэффициент передачи мощности от передатчика к приемнику представляет собой их сумму  $\text{GER} + \text{GRE}$ .

## Заключение

К достоинству приведенного метода можно отнести возможность учета трехмерной формы диаграммы направленности антенны наиболее распространенного кругового сечения и простоту его реализации электронно-вычислительными средствами. Метод не требует сложных программных средств и легко реализуется в таких распространенных приложениях, как, например, Excel.

К недостаткам метода можно отнести упрощение моделей диаграмм направленности (фигура вращения). Однако метод открыт для дальнейших модернизаций. В перспективе возможно функциональное расширение метода до расчета диаграмм направленностей эллиптического сечения. Также несложно развить данный метод до учета апертур взаимодействующих антенн. Для этого случая будет создан механизм интегрированного расчета по телесным углам и сопоставление полученных значений с коническими объемами — сегментами изотропного шара.

## Список литературы

1. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи / Под ред. Л. Я. Кантора и В. В. Ноздрина. М.: НИИР, 2009. 280 с.
2. Бадалов А. Л., Михайлов А. С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
3. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Под ред. проф. Ю. А. Феоктистова. М.: Радио и связь, 1988. 216 с.
4. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / Под ред. д. т. н. проф. М. А. Быховского. М.: Экотрендз, 2006. 377 с.
5. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ. М.: Радио-софт, 2016. 744 с.
6. Устройства СВЧ и антенны. Под ред. д. т. н, проф. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2006. 378 с.
7. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и радиоконтроль. Методы оценки эффективности / Под ред. П. А. Сая. М.: Радиотехника, 2015. 400 с.
8. Галимов Г. К. Антенны радиотелескопов, систем космической связи и РЛС. М.: Адвансед Солюшнз, 2013. 392 с.