

# АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ НАБЛЮДЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-4-10

Manuscript received 28 April 2021;  
Accepted 27 May 2021

**Шацкий Николай Витальевич**,  
АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца",  
Москва, Россия, [nshatsky@rti-mints.ru](mailto:nshatsky@rti-mints.ru)

**Ключевые слова:** диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, ширина луча, уровень боковых лепестков, координатные линии

Предложен алгоритм оценки параметров диаграммы направленности антенной решетки с электрическим сканированием в системе координат наблюдения, связанной с направлением фазирования антенных элементов. Показано, что в этой системе координат концентрация координатных линий вблизи направления фазирования максимальна. Это позволяет при относительно небольшом числе точек наблюдения подробно исследовать параметры главного луча и первых боковых лепестков антенной решетки, а также оценивать коэффициент направленного действия. Для расчета коэффициента направленного действия в выбранной системе координат наблюдения приемлема наиболее простая квадратурная формула. Приведены соотношения для расчета диаграммы направленности антенной решетки с учетом направленности уходов луча. Показано, что учет направленности отдельных элементов при сканировании приводит к уходам луча, которые удобно отслеживать в системе координат наблюдения. Предложены процедуры для оценки ширины луча на основе линейной интерполяции участков диаграммы направленности, на котором происходит пересечение уровня  $-3$ дБ. Предложена процедура оценки уровня боковых лепестков в которой отсутствует процедура поиска области главного луча боковых лепестков. Приведены соотношения, устанавливающие взаимосвязь между системой координат наблюдения и координатными системами, используемыми в радиолокации. Приведены результаты численных исследований, демонстрирующие возможность визуализации диаграммы направленности и ее сечений в местной системе координат радиолокационной системы, в системе координат антенны и системе координат наблюдения. Данная статья является первой в линейке исследований в части определения научно-методического аппарата построения адаптивных алгоритмов диаграммообразующей схемы цифровой антенной решетки радиолокационных станций и помогающей определить потенциальные достижимые характеристики вновь разрабатываемых радиолокационных станций.

#### Информация об авторе:

**Шацкий Николай Витальевич**, к.т.н., доцент, начальник комплексного отдела АО РТИ (заместитель главного конструктора), АО "Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца", Москва; Ростовский филиал АО РТИ, г. Ростов-на-Дону, Россия

#### Для цитирования:

Шацкий Н.В. Алгоритм оценки характеристик направленности антенной решетки с электрическим сканированием в системе координат наблюдения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №10. С. 4-10.

#### For citation:

Shatskiy N.V. (2021) Algorithm for evaluating the directional characteristics of an antenna array with electric scanning in the observation coordinate system. *T-Comm*, vol. 15, no.10, pp. 4-10. (in Russian)

## Введение

На современном этапе развития радиолокационных станций на этапах проектирования и создания новых образцов радиоэлектронных систем различного назначения все чаще приходится сталкиваться с качественно новыми системными проблемами, которые качественно отличаются от проблем, возникавших при создании радиотехнических систем первых поколений и их отдельных устройств. Это в свою очередь требует разработки новых подходов к схемотехническому анализу и синтезу, к определению на этапах эскизотехнического проекта возможных путей оптимизации и обоснования тактико-технических характеристик новых комплексов.

Радиотехнические комплексы образуют особый класс сложных технических систем, к которому применимы все принципы и методы общей теории систем и системотехники. Природа исследуемого поля, граничные поверхности или особенности распределения поля часто помогают выбрать «естественную» систему координат, в которой необходимые вычисления становятся наиболее простыми и доступными [1]. Так, поле, создаваемое антенной в дальней зоне, принято рассматривать вдоль сферической поверхности и описывать в сферической системе координат, орты которой связывают с плоскостью раскрытия антенны. В этой системе координат наиболее плотная концентрация координатных линий соответствует направлению нормали к раскрытию. В этой же области размеры элементарных площадок минимальны, а точность вычисления интегралов вдоль сферической поверхности наиболее высока. Это свойство сферической системы координат удобно для оценки коэффициента направленного действия (КНД) и ширины луча диаграммы направленности (ДН) антенны с лучом, ориентированным по нормали к раскрытию. Для оценки характеристик направленности антенных решеток (АР) с электрическим сканированием целесообразно использовать системы координат, в которых координатные плоскости пересекаются вдоль прямой, соответствующей направлению на главный максимум ДН. Одна из возможных систем координат, обладающая этим свойством рассмотрена в монографии [2].

В этом случае каждую из координатных плоскостей образуют прямая, задающая направление на максимум ДН и прямая, вдоль которой расположен раскрыв эквивалентной линейной антенной решетки. Анализ характеристик направленности совокупности эквивалентных линейных антенных решеток позволяет оценить ширину луча, уровень боковых лепестков (УБЛ) объемной ДН в наиболее интересных сечениях. Однако оценку КНД в подобной системе координат можно назвать «затруднительной», поскольку переход к эквивалентным линейным антеннам приводит к потере информации об эффективной поверхности раскрытия. В работах [3,4] был предложен алгоритм оценки КНД, в которой сетка наблюдения и размеры элементарных площадок уточнялись в ходе итерационного процесса в зависимости от уровня ДН в точках наблюдения на предыдущем итерационном шаге. Реализация этого алгоритма позволяла получать достаточно точное представление о ДН во всех областях пространства видимых углов и рассчитывать КНД антенн любых волновых размеров, но число точек наблюдения от итерации к итерации возрастало очень быстро, что сказывалось на вре-

мени оценки КНД. Кроме того, данный подход неудобен для точной оценки ширины луча и УБЛ.

Цель работы состоит в разработке алгоритма оценки характеристик направленности АР с электрическим сканированием в системе координат, позволяющей оценить основные параметры ДН АР: КНД, ширину луча и УБЛ ДН антенны.

## 1. Обоснование алгоритма

В радиолокации принято использовать несколько различных сферических и декартовых систем координат, ориентация ортов которых подобрана таким образом, чтобы упростить пересчет измеренных координат целей в данные для других систем и подсистем информационно-измерительных комплексов.

Так, применительно к радиолокационной системе наземного базирования могут быть введены местная земная декартова система координат (ДСКМ) и декартова система координат антенны (ДСКА) с общим началом в точке  $O$ , совпадающей с фазовым и геометрическим центром антенного полотна.

ДСКМ представляет собой правую координатную систему, в которой оси  $Ox$  и  $Oz$  лежат в горизонтальной плоскости (ось  $Ox$  – на север, а ось  $Oz$  – на восток), а ось  $Oy$  – направлена вертикально вверх в направлении зенита.

ДСКА также представляет собой правую координатную систему, у которой ось  $OX$  направлена вдоль вектора  $\mathbf{n}$  нормали к раскрытию, а оси  $OY$  и  $OZ$  ориентированы в плоскости раскрытия антенны таким образом, что ось  $OZ$  также лежит в плоскости  $Oxz$ , а угол  $\alpha$  между осями  $OY$  и  $Oy$  является острым.

Для оценки характеристик антенн с электрическим сканированием в большинстве случаев можно считать, что оси  $OX$  и  $Ox$  совпадают, что сводит преобразование координат из ДСКМ в ДСКА к аффинной операции поворота координатной системы на угол  $\alpha$  вокруг оси  $Oz$ . Этот случай соответствует исходной ориентации опорно-поворотного устройства (ОПУ) в направлении на север. В более общем случае может быть задано значение угла  $\Delta$ , которое соответствует повороту ОПУ в азимутальной плоскости и представляет собой угол между направлением на север и проекцией нормали антенны на плоскость  $xOz$  ДСКМ.

В ДСКМ вводят сферическую систему координат  $OR\beta\xi$ , где  $R$  – расстояние до точки наблюдения;  $\beta$  угол места между направлением на точку наблюдения и горизонтальной плоскостью, а угол  $\xi$  соответствует азимутальному углу, отсчитываемому от оси  $Ox$  до проекции направления на точку наблюдения на горизонтальную плоскость. В этом случае связь между сферической системой координат и ДСКМ определяют соотношения:

$$x = R \cos \beta \cos \xi; y = R \sin \beta; z = R \cos \beta \sin \xi. \quad (1)$$

В ДСКА антенны принято использовать биконическую систему координат  $OR\theta_z\theta_y$ , в которой

$$X = R \cos \theta_y \cos \theta_z; Y = R \sin \theta_y; Z = R \cos \theta_y \sin \theta_z, \quad (2)$$

угол  $\theta_z$  отсчитывают от оси  $OX$  в плоскости  $XOZ$ , а угол  $\theta_y$  – угол между линией визирования на точку наблюдения и плоскостью  $XOZ$ .

Несложно видеть, что в общем случае  $\beta = \alpha + \theta_y$ , а  $\xi = \Delta + \theta_z$ , где  $\Delta$  – угол между направлением на север и проекцией нормали антенны на плоскость  $xOz$  ДСКМ.

В то же время для анализа характеристик направленно-сти антенны эти системы координат неудобны.

Введем правую декартову систему координат наблюдения (ДСКН)  $Ox'Y'Z'$ , в которой ориентация оси  $OZ'$  совпадает с направлением на заданную точку наблюдения, ось  $OX'$  лежит в плоскости  $xOz$  ДСКМ, а ось  $OY'$  образует острый угол с осью  $Oy$ .

С системой координат ДСКН свяжем сферическую систему координат  $OR\theta\varphi$  таким образом, что

$$X' = R \sin \theta \cos \varphi; Y' = R \sin \theta \sin \varphi; Z' = R \cos \theta, \quad (3)$$

обеспечив максимальную концентрацию координатных линий в окрестности оси  $OZ'$ .

Исторически сложилось, что визуализация трехмерных сцен в компьютерных программах связана с декартовой системой координат визуализации (ДСКВ)  $Ox'y'z'$ , в которой плоскость  $x'Oy'$  является горизонтальной плоскостью. Очевидно, что расположение ее осей можно задать таким образом, чтобы они были связаны с ДСКМ при помощи оператора поворота на  $90^\circ$ .

Введем следующие обозначения:

$\mathbf{q}_{(t)m}$  – вектор-столбец, направление которого определяет положение фазового центра  $m$ -го канала АР ( $m = 1, 2, \dots, M$ ), а длина равна расстоянию от точки  $O$  до соответствующей точки;  $t = 1, 2, 3, 4$  определяет систему координат, в которой задан вектор. Будем считать, что индекс  $t = 1$  соответствует ДСКМ,  $t = 2$  – ДСКА,  $t = 3$  – ДСКН и  $t = 4$  – ДСКВ;

$\mathbf{r}_{(t)}$  – единичный вектор-столбец, определяющий положение главного максимума ДН;

$\mathbf{p}_{(t)}$  – единичные векторы, задающие направления на точки наблюдения в пространстве;

$\mathbf{n}_{(t)}$  – единичный вектор нормали к раскрыву АР;

$\mathbf{R}_{(t)}^{(t')}$  – матрица преобразования координат из декартовой системы координат (ДСК), обозначенной индексом  $t'$ , в ДСК, соответствующую индексу  $t$ .

Пусть в ДСКМ задано направление максимума ДН в виде вектора  $\mathbf{r}_{(1)}$ , а в ДСКА – векторы  $\mathbf{q}_{(2)m}$ , описывающие положения фазовых центров антенных элементов  $M$ -элементной АР.

Кроме того, заданы комплексные весовые коэффициенты в виде вектора-столбца

$$\mathbf{J} = \left\{ J_m = |J_m| \exp(-jk\mathbf{q}_{(2)m}^T \cdot \mathbf{R}_{(2)}^{(1)} \cdot \mathbf{r}_{(1)}) \mid m = 1, 2, \dots, M \right\}, \quad (4)$$

обеспечивающего формирование множителя направленности ДН с максимумом в направлении  $\mathbf{r}_{(1)}$ . Здесь  $k$  – волновое число, а  $T$  – символ транспонирования.

Заданным положениям фазовых центров антенных элементов  $M$ -элементной АР соответствуют комплексные ДН антенных элементов, определяемые вектор-функцией

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}_{(t)}) = \left\{ f_m(\mathbf{p}_{(t)}) = \exp(ik\mathbf{q}_{(2)m}^T \cdot \mathbf{p}_{(t)}) \mid m = 1, 2, \dots, M \right\}, \quad (5)$$

а ДН антенны в любой системе координат определяет выражение

$$F(\mathbf{p}_{(t)}) = f_0(\mathbf{p}_{(t)}) \mathbf{J}^T \mathbf{f}(\mathbf{p}_{(t)}), \quad (6)$$

где  $f_0(\mathbf{p}_{(t)})$  – ДН одиночного элемента, которую часто аппроксимируют при помощи функции вида

$$f_0(\mathbf{p}_{(t)}) = \begin{cases} \mathbf{p}_{(t)}^T \cdot \mathbf{n}_{(t)}, & \mathbf{p}_{(t)}^T \cdot \mathbf{n}_{(t)} > 0; \\ 0 & \mathbf{p}_{(t)}^T \cdot \mathbf{n}_{(t)} \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Требуется оценить КНД АР и найти параметры ДН АР: ширину луча, УБЛ и уходы максимума луча от заданного направления  $\mathbf{r}_{(1)}$  по сечениям ДН, заданным в ДСКН.

С учетом выбранных обозначений матрицы преобразования координат могут быть определены в виде:

$$\mathbf{R}_{(2)}^{(1)} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Delta & 0 & -\sin \Delta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta & 0 & \cos \Delta \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{(3)}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\xi - 0,5\pi) & 0 & \sin(\xi - 0,5\pi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\xi - 0,5\pi) & 0 & \cos(\xi - 0,5\pi) \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{(4)}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Данные матрицы являются унитарными. В связи с этим для выполнения обратных преобразований координат их достаточно транспонировать.

В ДСКН вектор  $\mathbf{r}_{(3)} = (0, 0, 1)$  и остается постоянным при изменении направления максимума ДН.

На этапе инициализации предлагаемого алгоритма должны быть определены параметры сетки наблюдения  $N_\theta$  и  $N_\varphi$  – число точек наблюдения в каждом азимутальном сечении и число азимутальных сечений соответственно. С учетом выбранных параметров множество точек наблюдения может быть рассчитано по формулам:

$$\theta_j = -180^\circ + 360^\circ \delta\theta(i-1); \quad (11)$$

$$\varphi_n = 0 + 180^\circ \delta\varphi(n-1), \quad (12)$$

где  $j = 1, 2, \dots, N_\theta$ ;  $\delta\theta = 1/(N_\theta - 1)$ ;  $n = 1, 2, \dots, N_\varphi$ ;  $\delta\varphi = 1/(N_\varphi - 1)$ .

Расчет характеристик направленности АР в соответствии с предлагаемым алгоритмом разделим на несколько последовательных шагов:

- расчет сечений ДН АР;
- оценка максимальных значений;
- оценка КНД АР;
- определение уходов луча;
- оценка ширины луча;
- оценка УБЛ и положения максимума лепестка с наибольшей амплитудой.

Остановимся на каждом из перечисленных этапов более детально.

Расчет сечений ДН АР выполняется по формулам (5)-(7). В результате получим выходной двумерный массив  $\mathbf{F} = \{F_{j,n} = |F(\theta_j, \varphi_n)|\}$ .

Массив  $\mathbf{F}$  является ненормированным. Для оценки характеристик направленности АР необходимо выполнить его нормировку. Как правило, при формировании ДН ее наибольшее значение соответствует главному лучу, который расположен в ближайшей окрестности точки, на которую указывает вектор  $\mathbf{r}_{(i)}$ . Уходы луча могут иметь место при наличии флуктуаций фазового распределения в раскрыве АР и при несовпадении направления фазирования с направлением максимума ДН одиночных антенных элементов. В то же время при значительных отклонениях луча и появлении дифракционных лепестков может возникнуть ситуация, при которой уровень главного луча окажется ниже уровня дифракционного лепестка. В связи с этим для нормировки массива  $\mathbf{F}$  требуется оценить максимальное значение  $F_0$  соответствующее выражению

$$F_0 = \max_{\substack{j=1,2,\dots,N_\theta \\ n=1,2,\dots,N_\varphi}} F_{j,n} \quad (13)$$

Как правило, поиск максимального значения массива данных требует выполнения стандартного алгоритма сортировки, при котором возможна оценка индексов  $j_0, n_0$ , для которых  $F_0 = F_{j_0, n_0}$ .

Поиск максимума в окрестности главного луча можно выполнить по формуле

$$F_r = \max_{\substack{j=1,2,\dots,N_\theta \\ n=1,2,\dots,N_\varphi}} \begin{cases} F_{j,n}, & \mathbf{p}_{(3)}(\theta_j, \varphi_n) \cdot \mathbf{r}_{(3)} \leq \cos \Omega \\ 0, & \mathbf{p}_{(3)}(\theta_j, \varphi_n) \cdot \mathbf{r}_{(3)} > \cos \Omega \end{cases} = \quad (14)$$

$$= \max_{\substack{j=1,2,\dots,N_\theta \\ n=1,2,\dots,N_\varphi}} \begin{cases} F_{j,n}, & \cos \theta_j \leq \cos \Omega \\ 0, & \cos \theta_j > \cos \Omega \end{cases}$$

где  $\mathbf{p}_{(3)}(\theta_j, \varphi_n) = (\sin \theta_j \cos \varphi_n, \sin \theta_j \sin \varphi_n, \cos \theta_j)$ ;

$\Omega$  ограничивает область поиска максимума главного луча, например, соответствует ширине луча АР по уровню половинной мощности, которую предварительно можно оценить по размерам раскрыва АР.

Как и в случае с поиском значения  $F_0$ , введем пару индексов  $jr, nr$  таких, что  $F_r = F_{jr, nr}$ .

Поиск КНД выполним по формуле

$$D = \frac{4F_0^2 (N_\theta - 1)(N_\varphi - 1)}{\pi \sum_{n=1}^{N_\varphi} \sum_{j=1}^{N_\theta} F_{j,n}^2 \sin \theta_j} \quad (15)$$

Выражение (15) представляет собой дискретное представление известной формулы для расчета КНД по ДН антенны, в которой учтена дискретность сетки наблюдения, а при интегрировании ДН по мощности использована «формула прямоугольников». Повышение точности интегрирования возможно при использовании более сложных квадратурных формул для интегрирования [5], однако, в выражении (15) требуемая точность достигается за счет высокой концентрации координатных линий в области главного луча. Это означает, что выражение (15) целесообразно использовать только в системе координат наблюдения. Условием корректности выражения (15) является отсутствие высоких дифракционных лепестков.

Определение уходов луча сводится к расчету скалярного произведения

$$\mathbf{p}_{(3)}(\theta_{jr}, \varphi_{nr}) \cdot \mathbf{r}_{(3)} = \cos \theta_{jr} \quad (16)$$

Ширина луча ДН АР изменяется в каждом  $n$ -ом сечении. При этом в общем случае луч ДН может иметь заметную асимметрию относительно направления сканирования.

В связи с этим оценка ширины луча должна выполняться путем уточнения направления, в котором ДН, нормированная к значению  $F_r$  имеет уровень 0,707. Для решения этой задачи необходимо найти в каждом сечении ДН значения ДН в окрестности уровня 0,707. Как правило, крутизна луча в окрестности данного уровня достаточно высока и для интерполяции сечения ДН  $F(\theta, \varphi_n)$  достаточно использовать линейную функцию

$$F(\theta, \varphi_n) = a(\varphi_n)\theta + b(\varphi_n), \quad (17)$$

где

$$a(\varphi_n) = \frac{F_{j_2, n} - F_{j_1, n}}{\theta_{j_2} - \theta_{j_1}};$$

$$b(\varphi_n) = a(\varphi_n)\theta_{j_1} - F(\theta_{j_1}, \varphi_n), \quad (18)$$

а индексы  $j_1, j_2$  ограничивают угловой сектор, в котором необходимо искать ширину луча по уровню половинной мощности.

Очевидно, что в каждом сечении ДН в окрестности главного луча необходимо найти координаты  $\theta$  двух точек, в которых луч пересекает уровень 0,707. Ширина луча  $\Delta_{\theta_n}$  по уровню -3 дБ будет представлять собой сумму абсолютных значений найденных координат  $\Delta_{\theta_n} = |\theta_{\Delta 1}| + |\theta_{\Delta 2}|$ , где

$$F(\theta_{\Delta 1} < 0, \varphi_n) = F(\theta_{\Delta 2} > 0, \varphi_n) = 0,707 \quad (19)$$

Поиск значения УБЛ обычно осуществляют при помощи алгоритмов, в которых сначала определяют ширину луча по уровню нуля ДН, а затем, выделив область боковых лепестков, оценивают значение максимума ДН вне области главного луча. В предлагаемом алгоритме воспользуемся другим способом.

Сначала на шаге  $\tau = 0$  отсортируем значения ДН в  $n$ -ом сечении по возрастанию абсолютных значений координаты  $\theta$  и найдем максимальное значение

$$F_{0,n}^{(\tau=0)} = \max_{j=1,2,\dots,N_\theta} F_{j,n} \quad (20)$$

Далее будем последовательно обнулять значения ДН, которые равноотстоят от направления  $\theta_r$  и повторно оценивать наибольшее из ненулевых значений по формуле (20) при  $\tau \neq 0$ . В результате при некотором  $\tau = 1, 2, \dots > 0$  возникнет справедливое равенство

$$F_{0,n}^{(\tau)} = F_{0,n}^{(\tau-1)} \quad (21)$$

Это значение будет соответствовать искомому уровню боковых лепестков АР.

Предлагаемая процедура оценки уровня боковых лепестков не требует поиска области главного луча и не может привести к ошибочным результатам в том случае, когда боковые лепестки отсутствуют вовсе или присутствуют только слева или справа от главного луча.

Таким образом, предложенный алгоритм оценки характеристик направленности плоской АР с электрическим сканированием отличается от известных использованием системы координат наблюдения, которая однозначным образом связана с ДСКМ, ДСКА и ДСКВ. В отличие от алгоритмов оценки характеристик направленности в ДСКА предлагаемый алгоритм обеспечивает высокую точность оценки КНД с использованием простейшей квадратурной формулы вида (15), реализующей метод «прямоугольников», за счет высокой концентрации координатных линий в области главного луча. В других системах координат, например, в системе координат, предложенной в [2], возможность оценки КНД не продемонстрирована, поскольку при переходе от плоского раскрыва к эквивалентному линейному раскрыву сложно сохранить информацию об эффективной площади антенны.

Благодаря тому, что предложенный алгоритм содержит все необходимые операторы преобразования координат, он может оказаться полезным для оценки параметров АР с электрическим сканированием в ДСКМ для расчетов дальности действия РЛК.

## 2. Численный пример реализации алгоритма

В качестве примера рассмотрим задачу оценки характеристик направленности АР  $8 \times 8$  антенных элементов. Антенные элементы АР расположены в узлах прямоугольной сетки на расстояниях  $d_z = 0,6\lambda$  и  $d_y = 0,55\lambda$  вдоль осей  $OZ$  и  $OY$  ДСКА ( $\lambda$  – длина волны).

Угол наклона  $\alpha$  положим равным  $20^\circ$ , а  $\Delta = 0$ .

На рисунке 1 приведен пример визуализации трехмерной сцены, на которой изображены раскрыв антенны (символы «о») и увеличенное в 8 раз изображение ДН АР при равномерном возбуждении (точки черного цвета). На этом же рисунке показаны направления нормали к раскрыву (вектор  $\mathbf{n}$  – тонкая красная линия), направление фазирования антенных элементов (вектор  $\mathbf{r}$  – утолщенная синяя линия), фактическое направление максимума ДН (утолщенная красная линия, выходящая из центра раскрыва), линия уровня ДН

-3 дБ (утолщенная кривая, описывающая эллипс), направление на самый высокий боковой лепесток (утолщенная зеленая линия).

В этом примере положение точки фазирования антенных элементов было равно  $\beta = 60^\circ, \xi = 50^\circ$ .

Сетка точек наблюдения содержала  $N_\theta = 721$  точек по углу  $\theta$  с шагом  $0,5^\circ$  и  $N_\varphi = 19$  азимутальных сечений с шагом  $10^\circ$ . При построении объемных ДН такая сетка наблюдения может считаться достаточно разреженной.

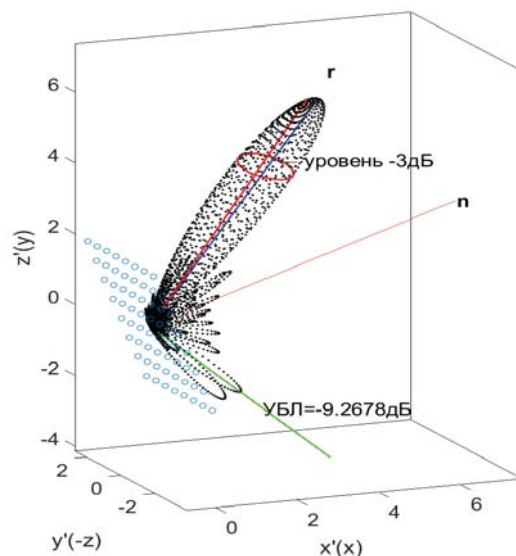
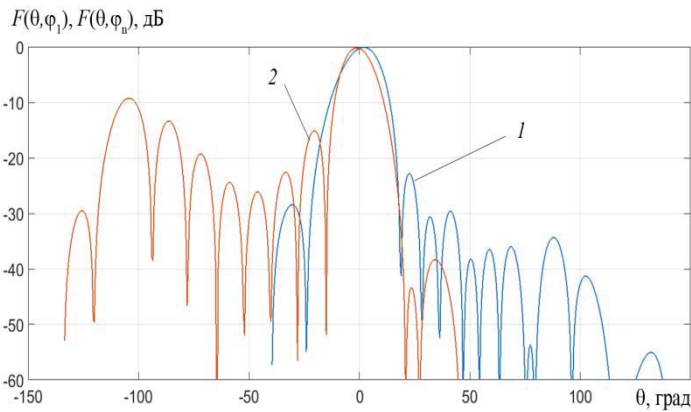


Рис. 1. Визуализация трехмерной сцены при  $\beta = 60^\circ, \xi = 50^\circ$  в ДСКВ (ДСКМ)

При переходе в ДСКА можно получить, что направление фазирования антенных элементов от направления нормали к плоскости раскрыва составляет  $53,25^\circ$ , а фактическое отклонение максимума от нормали к плоскости раскрыва составило  $50,77^\circ$  (уход луча порядка  $2,5^\circ$ ). Это объясняется формой ДН одиночного антенного элемента, описываемой выражением (7).

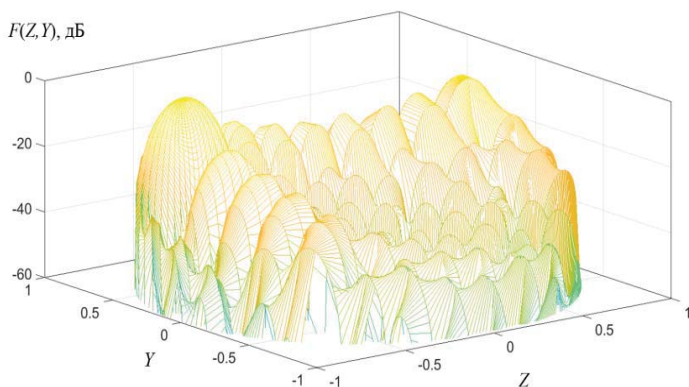
Оценке КНД по формуле (12) соответствовало значение 21,85 дБ. Это значение сравнивалось с оценкой КНД прямоугольного раскрыва с эффективной площадью  $64d_y d_z \cos 53,25^\circ$ , равной 22,0 дБ. Полученные отличия 0,15 дБ можно считать несущественными. Эти отличия практически сохраняются и при значительном увеличении числа точек сетки наблюдения, и при оценке КНД с неотклоненным лучом. Например, при увеличении числа азимутальных сечений до  $N_\varphi = 181$  оценка КНД увеличилась только на 0,01 дБ.

На рисунке 2 представлены два сечения объемной ДН в ДСКН. Кривая 1 соответствует  $\varphi_1 = 0$ , а кривая 2 – сечению  $\varphi_{10} = 110^\circ$  с максимальным боковым лепестком. Видно, что фактические максимумы ДН сечений смещены относительно направления  $\theta = 0$ , а развертка сечений в данной системе координат осуществляется путем вращения вокруг этого направления.



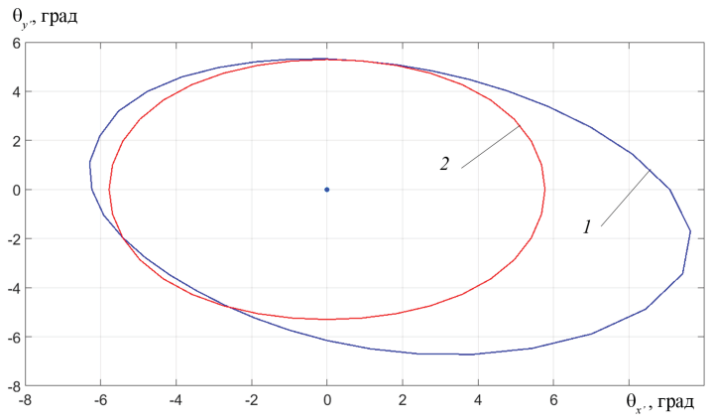
**Рис. 2.** Сечения объемной ДН:  
1 – сечение ДН при  $\varphi_1 = 0$ ; 2 – сечение ДН при  $\varphi_{10} = 110^\circ$

На рисунке 3 представлено более привычное изображение объемной ДН антенны в системе направляющих косинусов ДСКА. В отличие от стандартных построений в этом случае заметно, что координатные линии сходятся в точке фазирования антенных элементов. При этом малое число рассматриваемых азимутальных сечений делает построение боковых лепестков достаточно приближенным, что, однако, практически не сказывается на точности оценки КНД, ширины луча и уходах луча.



**Рис. 3.** Объемная ДН АР в ДСКА

На рисунке 4 приведена проекция линии уровня -3 дБ на плоскость, ортогональную направлению фазирования антенных элементов. Кривая 1 отражает форму главного луча для рассматриваемого примера отклоненного луча. Кривая 2 демонстрирует форму главного сечения при ориентации луча по нормали к раскрытию ( $\beta = 20^\circ, \xi = 0$ ).



**Рис. 4.** Форма главного луча по уровню -3 дБ: 1 – отклоненный луч при  $\beta = 60^\circ, \xi = 50^\circ$ , 2 – неотклоненный луч при  $\beta = 20^\circ, \xi = 0$

Приведенный пример подтверждает, что предложенный алгоритм оценки характеристик направленности ДН АР с электрическим сканированием в системе координат наблюдения является работоспособным. Позволяет оценивать достаточно широкий набор параметров и позволяет исследовать объемную ДН АР с учетом ее положения в составе РЛК.

### Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм оценки характеристик направленности АР с электрическим сканированием отличается от известных тем, что использует ДСКН, в которой концентрация координатных линий максимальна в окрестности главного луча. Это позволяет получать адекватную оценку КНД антенной решетки при незначительном числе азимутальных сечений и при любом отклонении луча от нормали, исследовать форму главного луча и его расширение при электрическом сканировании, оценивать уходы луча, обусловленные флуктуациями фазового распределения в раскрытии антенны и влиянием диаграммы направленности одиночного антенного элемента.

### Литература

1. Морс Ф.М., Фейсбах Г. Методы теоретической физики. Т.1. М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. 930 с.
2. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электронным движением луча (введение в теорию) / Под ред. Л.Д. Бахраха. М.: Сайнс-Пресс, 2002. 232 с.
3. Гаврилов М.В., Колесникова А.А., Литвинов А.В., Мищенко С.Е. Статистический алгоритм расчёта КНД для антенн больших электрических размеров // Сб. Докладов III Всероссийской микроволновой конференции, г. Москва, 25-27 ноября 2015 г. С. 105-109.
4. Безуглов А.А., Карапетян Д.Г., Колесникова А.А., Литвинов А.В., Мищенко С.Е. Алгоритм оценки интегральных параметров антенн по объемной диаграмме направленности на фрактальной сетке наблюдения // Сборник трудов XXII МНТК «Радиолокация, навигация, связь» 19-21 апреля 2016 г., Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2016, С. 889-897.
5. Самарский А.А. Введение в численные методы. СПб.: Издательство «Лань», 2005. 288 с.

## ALGORITHM FOR EVALUATING THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF AN ANTENNA ARRAY WITH ELECTRIC SCANNING IN THE OBSERVATION COORDINATE SYSTEM

**Nikolay V. Shatskiy,**

*Mints Radio-Technical Institute (RTI), Moscow, Moscow, Russia,*

[nshatsky@rti-mints.ru](mailto:nshatsky@rti-mints.ru)

### Abstract

An algorithm is proposed for estimating the parameters of the antenna array radiation pattern with electric scanning in the observation coordinate system associated with the phasing direction of the antenna elements. It is shown that in this coordinate system, the concentration of coordinate lines near the phasing direction is maximal. This allows for a relatively small number of observation points to study in detail the parameters of the main beam and the first side lobes of the antenna array, as well as to evaluate the coefficient directivity. The simplest quadrature formula is acceptable for calculating the coefficient directivity in the selected observation coordinate system. The relations for calculating the antenna array radiation pattern taking into account the direction of the beam departures are given. It is shown that taking into account the directivity of individual elements during scanning leads to beam departures, which are convenient to track in the observation coordinate system. Procedures are proposed for estimating the beam width based on linear interpolation of sections of the radiation pattern where the level -3dB intersects. A procedure for estimating the level of side lobes is proposed, which does not include a procedure for searching the area of side lobes. The relations that establish the relationship between the observation coordinate system and the coordinate systems used in radar are given. The results of numerical studies that demonstrate the possibility of visualizing the radiation pattern and its cross-sections in the local coordinate system of the radar system, in the antenna coordinate system, and in the observation coordinate system are presented. This article is the first in a line of research in terms of determining the scientific and methodological apparatus for constructing adaptive algorithms for the diagram-forming scheme of the digital antenna array of radar stations and helps to determine the potential achievable characteristics of newly developed radar stations.

**Keywords:** radiation pattern, directional coefficient, beam width, side lobe level, coordinate lines.

### References

1. F. M. Mors, G. Feshbach (1958). Methods of theoretical physics, vol. I. Moscow. Publishing house of foreign literature. 930 p. (In Russian)
2. O. G. Vendik, M. D. Parnes (2002). Antennas with electronic beam (introduction to theory), ed. by L. D. Bakhrakh. Moscow: Science-Press. 232 p. (In Russian)
3. M. V. Gavrilov, A. A. Kolesnikov, A. V. Litvinov, S. E. Mishchenko (2015). Statistical algorithm for the calculation of directivity for antennas of large electric dimensions [Proceedings of the third all-Russian microwave conference]. Moscow. 25-27 November 2015. Published by Kotelnikov IRE RAS. P. 105-109. (In Russian)
4. A. A. Bezuglov, D. G. Karapetyan, A. A. Kolesnikova, A. V. Litvinov, S. E. Mishchenko (2016). Algorithm for evaluating integral parameters of antennas based on a volume directional diagram on a fractal observation grid [Proceedings of the XXII ISTC "Radar, navigation, communication"] Voronezh. 19-21 April 2016. Published NPF "SAKVOEE" LLC. P. 889-897. (In Russian)
5. A. A. Samarsky (2005). Introduction to numerical methods. St. Petersburg: LAN publishing House. 288 p. (In Russian)