

УДК 681.3.07

СПЛАЙН- АППРОКСИМАЦИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ СОТОВОЙ СЕТИ

И. В. Стрелковская

Доктор технических наук, доцент

Кафедра высшей математики

Декан факультета «Информационные сети связи»*

Контактный тел.: (048) 723-55-95

E-mail : dekanat-is@rambler.ru

Э. А. Сукачёв

Доктор технических наук, профессор

Кафедра технической электродинамики и систем

радиосвязи*

Контактный тел.: (048) 720-77-89

E-mail : dekanat-is@rambler.ru

А. О. Макоганюк

Аспирант*

Контактный тел.: 050-391-36-43

E-mail: rabotarao2@mail.ru

*Одесская национальная академия связи

им. А. С. Попова

ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, 65029

Вирішується задача апроксимації форми діаграми спрямованості антени базової станції стільникової мережі радіозв'язку з рухомими об'єктами для дослідження зміни енергетичного потенціалу низхідній лінії при русі абонентської станції в межах соти

Ключові слова: сплайн-апроксимація, діаграма спрямованості, антена, базова станція

Решается задача аппроксимации формы диаграммы направленности антенны базовой станции сотовой сети радиосвязи с подвижными объектами для исследования изменения энергетического потенциала нисходящей линии при движении абонентской станции в пределах соты

Ключевые слова: сплайн-аппроксимация, диаграмма направленности, антенна, базовая станция

The problem of directional diagram form approximation of radio communication cellular network base station with mobiles for researching change of downlink power budget in user station motion within cell is solved

Key words: spline-approximation, direction graph, antenna, base station

Введение

Базовые станции являются основными звеньями любой сотовой сети радиосвязи с подвижными объектами.

Их количество, расположение на местности, способы соединения друг с другом, с центром коммутации и с другими сетями предоставляют широкий набор возможностей для выбора оптимальных решений на уровне проектирования сотовых сетей. Обычно одна базовая станция (БС) в соте обслуживает все множество мобильных станций (МС), которые в данный момент оказались в этой соте.

Радиоинтерфейс, определяющий взаимодействие оборудования в подсистеме БС – МС, учитывает все

особенности радиотракта и, в частности, технические характеристики антенны базовой станции [1].

Важным параметром, определяющим технические характеристики всей сети, является форма диаграммы направленности (ДН) антенны БС. От коэффициента усиления (КУ) антенны зависят эффективность и надежность системы, уровень внутрисистемных помех и др. На БС обычно используются два вида антенн: всенаправленные и панельные, которые делят соту на секторы (трехсекторные и шестисекторные). Во всех случаях на энергетический потенциал нисходящей линии БС – МС существенное влияние оказывает форма ДН антенны БС в вертикальной плоскости, даже если в горизонтальной плоскости эта антенна оказывается ненаправленной.

Цель настоящей статьи – разработка методики для исследования влияния характеристик излучения антенны БС на изменение энергетического потенциала нисходящей линии при движении МС по заданной трассе.

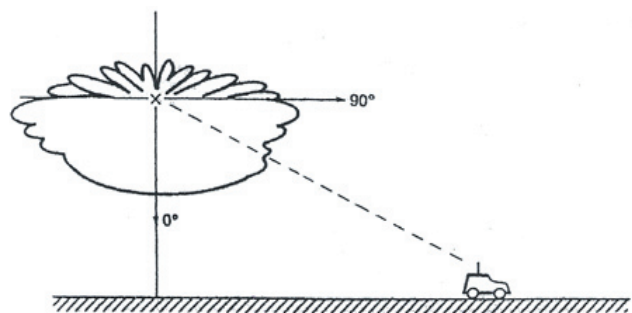
Особенности кубической сплайн-аппроксимации

Обычно антенны БС закрепляют на мачте либо на крыше здания на высоте 30 – 100 м над поверхностью земли. В качестве направленного излучателя, как правило, используется плоская многоэлементная антенная решетка. Тогда КУ такой антенны описывается функцией двух переменных $G(\theta, \varphi)$:

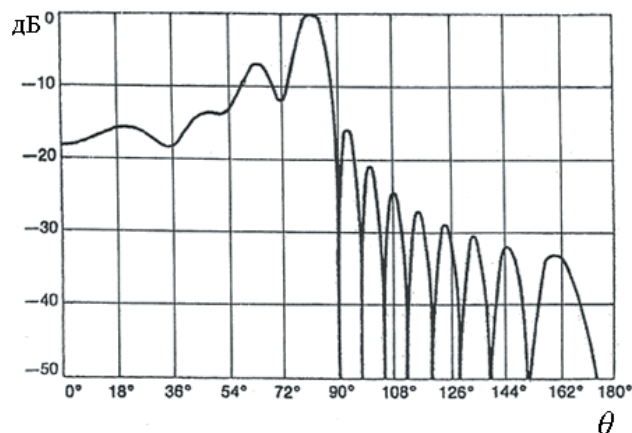
$$G(\theta, \varphi) = G_m \cdot f^2(\theta, \varphi),$$

где G_m - максимальный коэффициент усиления; $f^2(\theta, \varphi)$ - множитель, учитывающий форму ДН антенны БС; θ - угол возвышения; φ - азимутальный угол.

Для направленной антенны при фиксированных углах возвышения форму диаграммы направленности часто можно представить в виде концентрических окружностей, центром которых является точка размещения БС на местности. При фиксированном азимутальном угле φ , т.е. в любой вертикальной плоскости, нормированная ДН имеет вид, показанный на рис. 1. В этом случае форма диаграммы направленности становится функцией одной переменной θ .



а)



б)

Рис. 1. Форма диаграммы направленности антенны базовой станции в вертикальной плоскости

С учетом мест установки антенны подобные зависимости могут быть получены только экспериментальным путем. Поскольку применение графического представления ДН при расчетах энергетических параметров трассы связано со значительными неудобствами, то обычно стремятся получить адекватное аналитическое выражение.

Таким образом, в математическом аспекте задача сводится к аппроксимации кривой, представленной на рис. 1,б.

Выбор метода приближения определяется конфигурацией кривой и заданной точностью аппроксимации. Для данной одномерной задачи рассмотрим эрмитов кубический сплайн [2].

Пусть в узлах сетки $\Delta: a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b$ заданы значения некоторой функции $f(x): f_i = f(x_i), f'_i = f'(x_i), i = 0, 1, \dots, N$.

Согласно [2], эрмитовым кубическим сплайном будем называть функцию $S_3(x)$, удовлетворяющую условиям:

- 1) на каждом из промежутков $[x_i, x_{i+2}]$

$$S_3(x) = a_{i0} + a_{i1}(x - x_i) + a_{i2}(x - x_i)^2 + a_{i3}(x - x_i)^3;$$

- 2) $S_3(x_i) = f_i, S'_3(x_i) = f'_i, i = 0, \dots, N$.

Очевидно, что $S_3(x) \in C^1[a, b]$, где $C^1[a, b]$ – класс функций, имеющих на $[a, b]$ непрерывную производную первого порядка. Вторая производная эрмитова кубического сплайна, вообще говоря, разрывна в узлах сетки Δ .

Учитывая условия интерполяции, для вычисления коэффициентов $a_{i\alpha}, \alpha = 0, 1, 2, 3$, при каждом i имеем систему уравнений

$$S_3(x_i) = f_i, S_3(x_{i+1}) = f_{i+1}, S'_3(x_i) = f'_i, S'_3(x_{i+1}) = f'_{i+1}$$

Решив эту систему уравнений [2], получим на $[x_i, x_{i+1}]$

$$S_3(x) = f_i + (x - x_i) \cdot [f'_i + t(B + tA)], \tag{1}$$

$$\text{где } A = -2(f_{i+1} - f_i) / h_i + (f'_i + f'_{i+1}),$$

$$B = -A + (f_{i+1} - f_i) / h_i - f'_i, \tag{2}$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i, t = (x - x_i) / h_i.$$

Рассмотрим график формы диаграммы направленности антенны базовой станции при $\theta \in [0^\circ; 88^\circ]$ или в радианной мере при $x \in [0; 1,54]$. Разобьем отрезок $[0^\circ; 88^\circ]$ точками $\theta_i: 0 = \theta_0 < \theta_1 < \dots < \theta_7 = 88^\circ$ или, что соответственно, в радианной мере отрезок $[0; 1,54]$ точками $x_i: 0 = x_0 < x_1 < \dots < x_7 = 1,54$. Точки θ_i или x_i выбираются в качестве абсцисс точек экстремума функции, описывающую диаграмму направленности антенны базовой станции (рис. 2).

Учитывая то, что x_i – абсциссы точек экстремума функции, которая описывает диаграмму направленности антенны базовой станции, имеем $f'_i = 0, i = 0, 1, \dots, 7$.

Тогда эрмитов кубический сплайн (1) будет представлен в виде

$$S_3(x) = f_i + \frac{(x-x_i)^2}{h_i} \left(B + \frac{x-x_i}{h_i} A \right), \quad (3)$$

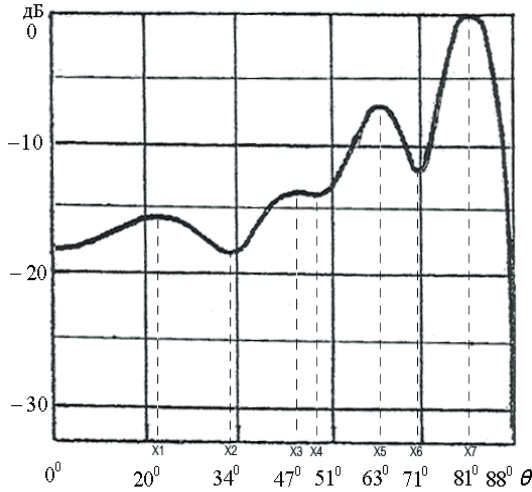


Рис. 2. Фрагмент формы диаграммы направленности антенны базовой станции в вертикальной плоскости

или

$$S_3(x) = f_i + B \frac{(x-x_i)^2}{h_i} + A \frac{(x-x_i)^3}{h_i^2}, \quad (4)$$

а коэффициенты (2) имеют вид

$$A = \frac{-2(f_{i+1} - f_i)}{h_i}, \quad B = -A + \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i}, \quad h_i = x_{i+1} - x_i. \quad (5)$$

Проведя несложные вычисления, получаем эрмитов кубический сплайн $S_3(x)$ в радианной мере вида

$$S_3(x) = \begin{cases} -\frac{6}{0,35^3} x^3 + \frac{9}{0,35^2} x^2 - 18, & x \in [0; 0,35]; \\ \frac{6}{0,24^3} (x-0,35)^3 + \frac{9}{0,24^2} (x-0,35)^2 - 15, & x \in [0,35; 0,59]; \\ -\frac{10}{0,23^3} (x-0,59)^3 + \frac{15}{0,23^2} (x-0,59)^2 - 18, & x \in [0,59; 0,82]; \\ \frac{2}{0,07^3} (x-0,82)^3 - \frac{3}{0,07^2} (x-0,82)^2 - 13, & x \in [0,82; 0,89]; \\ -\frac{14}{0,21^3} (x-0,89)^3 + \frac{21}{0,21^2} (x-0,89)^2 - 14, & x \in [0,89; 1,1]; \\ \frac{10}{0,14^3} (x-1,1)^3 - \frac{15}{0,14^2} (x-1,1)^2 - 7, & x \in [1,1; 1,24]; \\ -\frac{24}{0,17^3} (x-1,24)^3 + \frac{36}{0,17^2} (x-1,24)^2 - 12, & x \in [1,24; 1,41]; \\ \frac{24}{0,13^3} (x-1,41)^3 - \frac{36}{0,13^2} (x-1,41)^2, & x \in [1,41; 1,54] \end{cases}$$

или в градусной мере

$$S_3(\theta) = \begin{cases} -\frac{6}{20^3} \theta^3 + \frac{9}{20^2} \theta^2 - 18, & \theta \in [0^\circ; 20^\circ]; \\ \frac{6}{14^3} (\theta-20^\circ)^3 + \frac{9}{14^2} (\theta-20^\circ)^2 - 15, & \theta \in [20^\circ; 34^\circ]; \\ -\frac{10}{13^3} (\theta-34^\circ)^3 + \frac{15}{13^2} (\theta-34^\circ)^2 - 18, & \theta \in [34^\circ; 47^\circ]; \\ \frac{2}{4^3} (\theta-47^\circ)^3 - \frac{3}{4^2} (\theta-47^\circ)^2 - 13, & \theta \in [47^\circ; 51^\circ]; \\ -\frac{14}{12^3} (\theta-51^\circ)^3 + \frac{21}{12^2} (\theta-51^\circ)^2 - 14, & \theta \in [51^\circ; 63^\circ]; \\ \frac{10}{8^3} (\theta-63^\circ)^3 - \frac{15}{8^2} (\theta-63^\circ)^2 - 7, & \theta \in [63^\circ; 71^\circ]; \\ -\frac{24}{10^3} (\theta-71^\circ)^3 + \frac{36}{10^2} (\theta-71^\circ)^2 - 12, & \theta \in [71^\circ; 81^\circ]; \\ \frac{24}{7^3} (\theta-81^\circ)^3 - \frac{36}{7^2} (\theta-81^\circ)^2, & \theta \in [81^\circ; 88^\circ]. \end{cases} \quad (6)$$

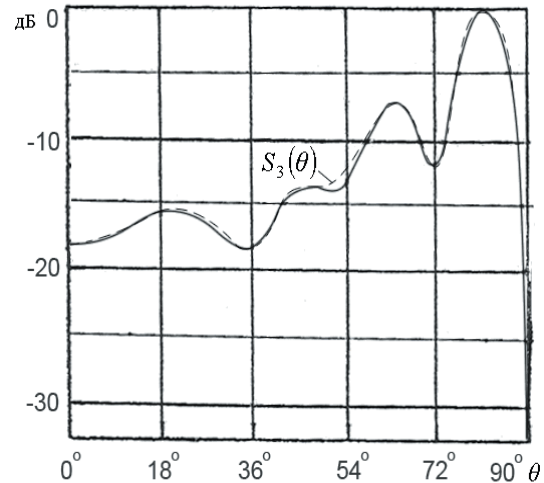


Рис. 3. Аппроксимация формы диаграммы направленности антенны базовой станции кубическим сплайном $S_3(\theta)$

Рис. 3 иллюстрирует предложенную сплайн-аппроксимацию формы диаграммы направленности антенны базовой станции кубическим сплайном $S_3(\theta)$. Заметим, что при фиксированном азимутальном угле φ

$$f^2(\theta, \varphi) \approx S_3(\theta).$$

Расчет энергетического потенциала нисходящей линии для движущейся абонентской станции

Известно, что для повышения эффективности использования частотного ресурса в сотовых сетях вся территория обслуживания разделяется на шестиугольные соты радиуса R , из которых, в свою очередь, формируются кластеры.

Образовавшуюся вследствие такого структурирования плоскую регулярную гексагональ-

ную решетку удобно исследовать, вводя декартову систему координат, где угол между осями OX и OY составляет 60° [1]. В качестве естественной единицы измерения вдоль осей принимают расстояние между центрами ячеек, которое равно $\sqrt{3}R$. Разделив все расстояния на это число, получаем нормированную декартову систему координат, которой и будем пользоваться для дальнейшего анализа.

Без потери общности предположим, что мобильная станция движется в пределах соты по линии AB (рис. 4).

Координаты точек A и B в выбранной системе координат составляют соответственно $A\left(-\frac{1}{3}; \frac{2}{3}\right)$ и $B\left(\frac{1}{2}; 0\right)$.

Легко видеть, что уравнение прямой AB имеет вид

$$y_M = -\frac{4}{5}x_M + \frac{2}{5}, \quad -\frac{1}{3} \leq x_M \leq \frac{1}{2}, \quad (7)$$

где x_M, y_M – координаты текущей точки M (мобильной станции) на прямой AB .

Для определения расстояния между антеннами BC и MC необходимо найти модуль наклонной дальности SM . Выразим высоту установки антенны BC через радиус соты, т.е. $h = \frac{a}{\sqrt{3}}$, где a – сторона соты, h – высота на которой установлена базовая станция.

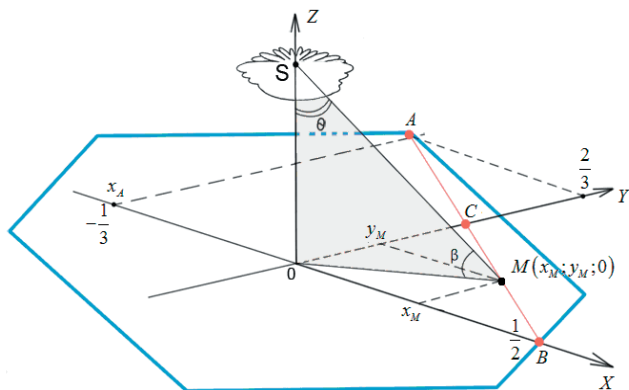


Рис. 4. Взаимное расположение мобильной и базовой станций

Тогда, учитывая, что $S\left(0; 0; \frac{a}{\sqrt{3}}\right)$, $M(x_M; y_M; 0)$ каноническое уравнение прямой SM в пространстве имеет вид

$$\frac{x}{x_M} = \frac{y}{y_M} = \frac{z - a/\sqrt{3}}{-a/\sqrt{3}}, \quad (8)$$

а модуль наклонной дальности можно представить как

$$|SM| = \sqrt{\frac{21}{25}x_M^2 - \frac{6}{25}x_M + \frac{4}{25} + \frac{a^2}{3}}. \quad (9)$$

Для определения угла β – угла между наклонной дальностью SM и плоскостью местного горизонта, необходимо найти угол между прямыми OM и SM (рис. 4).

Каноническое уравнение прямой OM имеет вид

$$\frac{x}{x_M} = \frac{y}{y_M}. \quad (10)$$

Угол β между прямыми OM и SM можно найти, используя определение скалярного произведения векторов [3].

Тогда, на основании того, что $\overrightarrow{OM}(x_M; y_M; 0)$, $\overrightarrow{SM}(x_M; y_M; 0)$, имеем

$$\beta = \arccos \frac{x^2 + y^2}{\sqrt{x_M^2 + y_M^2} \cdot \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + a^2/3}}. \quad (11)$$

Угол возвышения равен $\theta = 90^\circ - \beta$, а нормированное усиление антенны BC рассчитывается по формуле (6).

Для расчета энергетического потенциала нисходящей линии, т.е. определения величины мощности полезного сигнала на входе приемника MC , необходимо выбрать модель распространения радиоволн на трассе движения мобильной станции. Если радиус соты составляет 1-2 км и выполняются условия прямой видимости, то можно воспользоваться первым уравнением передачи для свободного пространства [4], которое записывается следующим образом

$$P_{np} = P_{пер} \frac{G_{пер}(\theta, \varphi) \cdot G_{пр}(\theta, \varphi) \cdot \lambda^2}{16\pi^2 |SM|^2} \text{ (Вт)}, \quad (12)$$

где P_{np} – мощность полезного сигнала на входе приемника мобильной станции, $P_{пер}$ – мощность передающей базовой станции, $G(\theta)$ – усиление антенны базовой станции, $G_{пер}$ – коэффициент усиления передающей антенны, $G_{пр}$ – коэффициент усиления приемной антенны, λ – длина волны.

Таким образом, выражение (6) позволяет анализировать совместное влияние пространственного положения MC и параметров антенны BC (высоты закрепления, диаграммы направленности) на энергетику нисходящего направления.

Для иллюстрации сказанного рассмотрим конкретный пример.

Пусть передающее оборудование базовой станции имеет следующие технические характеристики: $P_{пер} = 13$ дБ Вт; $G_m = 12$ дБ; $\lambda = 0,33$ м. Радиус соты равен $R = 1$ км, а высота закрепления антенны BC составляет $h_B = 72$ м.

Программа расчета для среды MATLAB позволяет воспроизвести картину изменения мощности сигнала на входе приемника при движении MC в соте по прямой от точки A к точке B (рис. 4).

На рис. 5 представлена графическая иллюстрация изменения уровня сигнала от координаты x_M MC для направленной антенны BC .

Для сравнения представлена аналогичная зависимость при использовании на BC всенаправленной антенны.

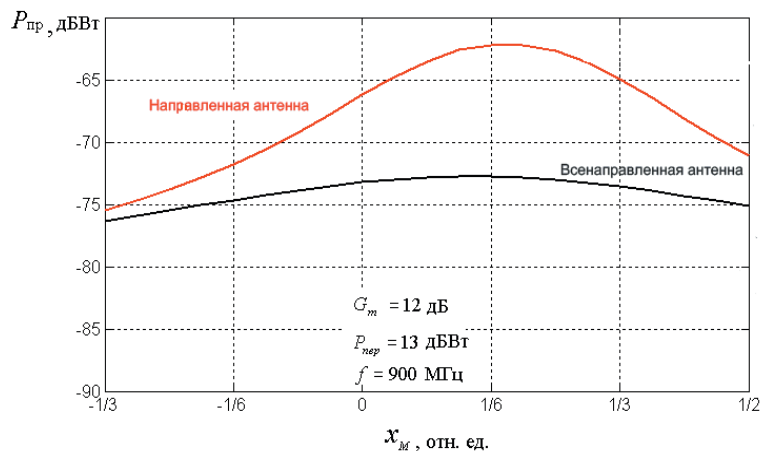


Рис. 5. Изменение мощности $P_{пр}$ полезного сигнала на входе приемника мобильной станции при движении мобильной станции по прямой АВ

Выводы

Аппроксимация диаграммы направленности антенны базовой станции является первым этапом при разработке конструктивного метода для анализа изме-

нения уровня сигнала на входе приемника мобильной станции при ее произвольном перемещении в пределах соты с учетом особенностей диаграммы направленности антенны базовой станции.

Кроме того, данный метод может быть использован для решения задач синтеза. В самом деле, предложенный метод анализа энергетического состояния сети позволяет получить исходные данные, необходимые для перестройки антенн базовых станций и создания диаграмм направленности такой формы, которая учитывает реальное распределение абонентов на территории соты. Подобные антенны с электрическим управлением диаграммы направленности называют адаптивными или интеллектуальными антеннами (Smart Antennas) [5].

Улучшение эксплуатационных характеристик сети на основе применения адаптивных антенных решеток достигается за счет уменьшения внутрисистемных помех, а также создания оптимального покрытия. Все это вместе взятое ведет к увеличению емкости сотовой сети связи с подвижными объектами и к улучшению электромагнитной обстановки в зоне покрытия.

Литература

1. Сукачев Э. А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами / Э. А. Сукачев. – Учебн. пособие. – Изд. 2-е, испр. и дополн. – Одесса: УГАС, 2000. – 119 с.
2. Завьялов Ю. С. Методы сплайн-функций. / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В.Л. Мирошниченко. – М., 1980. – 352 с.
3. Стрелковська І. В. Вища математика для фахівців в галузі зв'язку: [підруч. для студ. вищ. навч. зал.] / І. В. Стрелковська, А. Г. Буслаєв, В. М. Паскаленко; за ред. П.П. Воробієнка. – Одеса, 2010. – 620 с.
4. Маковеева М. М. Системы связи с подвижными объектами / М. М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
5. Строганова Е. Интеллектуальные антенны для сетей 3G / Е. Строганова // Технологии и средства связи. – 2008. – № 6. – С. 42 – 45.