Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского
Серия «Физика». Том 17-18 (56-57). 2005 г. № 1. С. 96-102

УДК 621.396.677

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАВНОШАГОВОЙ КОНИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Редин* М.И.

ВВЕДЕНИЕ

Существенные особенности эксплуатации радиооборудования летательных аппаратов и, в частности, антенн, по сравнению с наземными радиостанциями, а также требований к аппаратуре и организации мобильной связи обусловлены, прежде всего, ограниченными возможностями в размещении антенн на летательных аппаратах, довольно жесткими требованиями к аппаратуре по потребляемым мощностям, весам и габаритам, необходимостью работы аппаратуры в широком диапазоне частот и непрерывным изменением координат одного (при работе летательного аппарата с центром связи) или обоих корреспондентов (при работе воздушных судов между собой) [1].

При связи с летательными аппаратами, которые являются подвижными объектами, необходимо осуществить оптимальный выбор типа антенны для данного частотного диапазона с учетом изменений длины радиотрассы, а также географического положения объектов [2].

Таким образом, требуется разработка широкодиапазонной или многочастотной антенны, обеспечивающей возможность одновременной работы нескольких радиостанций.

Анализ данных, опубликованных в соответствующей научно-технической литературе последних лет, показывает, что предпочтение в настоящее время разработчики антенн отдают второму методу разработки антенн, основанном на использовании проводника в виде витка, длина которого равна длине волны и ток в котором изменяется по закону бегущей волны. Этот метод реализуется в многочисленных разновидностях спиральных антенн, пространственных и плоских.

Наряду с этим спиральные излучатели часто используются в качестве облучающей системы зеркальной антенны. Важной особенностью построения широкополосных облучающих систем зеркальных антенн точным токовым методом является учет магнитных составляющих поля излучения в ближней зоне. Необходимые требования по широкополосности можно реализовать с использованием конического спирального излучателя (КСИ), ввиду особенности его геометрической структуры [3, 4]. Для исследования поля в ближней зоне излучения на поверхности зеркала, создаваемого спиральными излучателями, с использование метода векторного потенциала [5], приступим к описанию геометрических параметров конической спиральной антенны.

* Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь.
E-mail: max_redin@land.ru

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Традиционно основные виды (эквиугольная, эквишаговая) КСИ могут быть получены на основе перехода от регулярной цилиндрической спирали к регулярной спирали, выполненной на конусе.

Для задания геометрии спирали на поверхности вращения, а также и на плоскости необходимо вводить ряд параметров, характеризующих как саму спиральную структуру, так и поверхность. Известны различные виды конических спиралей, таких как простой круговой конус, эллиптический конус, а также со сложной формой образующей.

В общем случае, такими параметрами для конической спирали являются:

r_0 - начальный радиус, определяющий расстояние между входными зажимами (например, для двух- и многозаходных спиралей);

β - угол подъема витков спирали (угол намотки), характеризующий плотность намотки спирали на заданную поверхность или в плоскости. При этом значение данного угла может быть выбрано как постоянным, тогда имеем дело с эквиугольной спиралью, так и переменным в зависимости от параметрического угла α, т.е. $\beta(\alpha)$.

Обратимся к рис. 1, будем различать шаг спиральной линии по образующей конуса $d_{обр}$ (относительное приращение по поверхности вращения) и шаг спиральной линии по его оси $d_{ос}$. Также будем использовать проекцию $d_{обр}$ на плоскость XOY – это будет шаг плоской спирали $d_{пл}$. Кроме того, значение данного параметра также может быть выбрано, как постоянным, так и переменным, зависящим от параметрического угла α. При постоянном шаге спирали $d_{обр}$, $d_{ос}$ или $d_{пл}$ получаем равношаговую (эквишаговую) спираль.

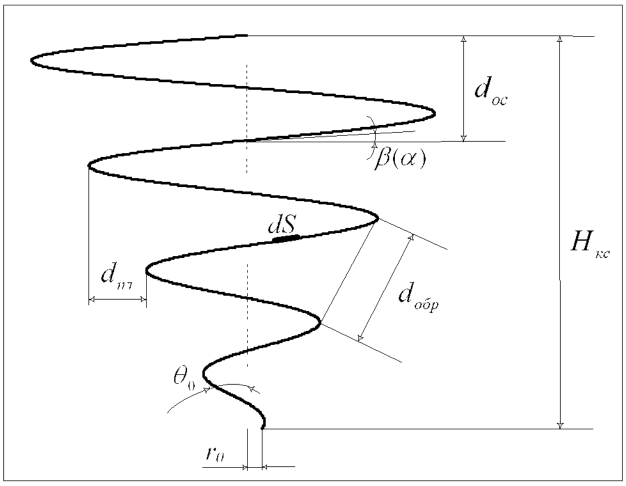

Рис. 1 Основные геометрические параметры конической спирали (проекция на плоскость XOZ).

Параметры β и h (угол намотки и шаг спирали) являются взаимозависимыми величинами, поэтому для геометрического представления спирали может быть использован только один из них.

Помимо описания спирали, например на плоскости, необходимо вводить геометрические параметры, характеризующие поверхность, на которую проецируется спираль с плоскости. Так, для кругового конуса это угол при вершине конуса $2\theta_0$. Но для удобства чаще всего говорят об угле между осью конуса и его образующей θ_0. Следует заметить, что коническая спираль по своим внешнему виду лежит между цилиндрической и плоской, что отражается и на её свойствах излучения. Параметр θ_0 позволяет обобщить геометрическое представление спирали, выполненной на конусе с углом между осью конуса и его образующей θ_0, так для случая цилиндрической спирали $\theta_0=0$ либо для плоской $\theta_0=\pi/2$.

Заметим, что параметры n – количество витков спирали, r_0 – начальный радиус спиральной линии и θ_0 не зависят от параметрического угла α, а параметр n наоборот, определяет его.

Под геометрическим представлением спирали понимается определение текущих координат спирали x_S, y_S, z_S, например, в декартовой системе координат и полной длины этой спирали S.

При рассмотрении геометрии конической спирали зададимся параметрическими выражениями, описывающими геометрию спирали на плоскости, для того чтобы спроецировать её в дальнейшем на коническую поверхность с заданными параметрами r_0 и θ_0. При этом рассмотрим варианты, как равношаговой (архимедовой), так и равноугольной (логарифмической) спирали.

Плоская архимедова спираль задаётся следующим выражением в полярных координатах:

$$\rho(\alpha) = d_{пл} \cdot \alpha + r_0, \tag{1}$$

где $\rho(\alpha)$- радиус-вектор в полярных координатах, описывающий спиральную линию, $d_{пл}$ – шаг плоской спирали, α – параметрический угол намотки, r_0 –начальный радиус спирали.

Запишем проекции данной линии на оси декартовой системы координат горизонтальной плоскости:

$$\begin{cases} x(\alpha) = \rho(\alpha) \cdot cos(\alpha) \\ y(\alpha) = \rho(\alpha) \cdot sin(\alpha) \end{cases} \tag{2}$$

Представим себе пространственную коническую спираль, проекция которой есть плоская архимедова спираль, заданная выражениями (1, 2). Запишем проекции данной пространственной структуры по координатным осям декартовой системы, учитывая, что проекции но осям OX, OY описаны соотношениям (2):

$$\begin{cases} z(\alpha)=(d_{пл}\cdot\alpha+r_0)\cdot ctg(\theta_0) \\ y(\alpha)=(d_{пл}\cdot\alpha+r_0)\cdot sin(\alpha) \\ y(\alpha)=(d_{пл}\cdot\alpha+r_0)\cdot cos(\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

Для вывода основных соотношений для конической спирали обратимся к рис. 2. На рисунке показаны в вертикальной плоскости элементарный участок длины спирали dS и его проекция на горизонтальную плоскость XOY dl, а также угол $\beta_{кс}(\alpha)$, заключённый между ними есть угол намотки спиральной линии или угол подъёма витков.

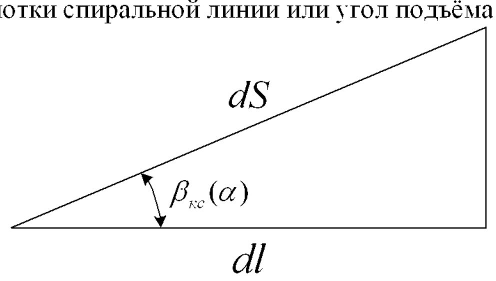

Рис. 2 К определению угла подъёма витков β.

Очевидно, что

$$dS = dl\,/\,cos(\beta) \quad (4).$$

Проекция элемента длины на горизонтальную плоскость:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (5),$$

где дифференциалы определяются так:

$$dx = \left[d_{пл}\cdot cos(\alpha) - (d_{пл}\cdot\alpha + r_0)\cdot sin(\alpha)\right]d\alpha$$

$$dy = \left[d_{пл}\cdot sin(\alpha) - (d_{пл}\cdot\alpha + r_0)\cdot cos(\alpha)\right]d\alpha$$

Подставляя полученные дифференциалы в выражение для элемента dl (5) и раскрывая квадраты, получим:

$$dl = d_{пл}\cdot\sqrt{1+\alpha^2+\frac{2\alpha\cdot r_0}{d_{пл}}+\frac{r_0^2}{d_{пл}^2}}\cdot d\alpha \quad (6).$$

Из (4) следует:

$$\beta(\alpha) = \arccos\left(\frac{dl}{dS}\right) \quad (7).$$

Представим выражение для элемента дуги dS:

$$dS = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}\,. \quad (8)$$

Выражение для дифференциала dz:

$$dz = d_{пл} \cdot ctg(\theta_0) \cdot d\alpha .$$

Подставляя в (8) выражения дифференциалов, имеем:

$$dS = \sqrt{d_{пл}^2 + (d_{пл} \cdot \alpha + r_0) + d_{пл}^2 \cdot ctg^2(\theta_0)} \cdot d\alpha .$$

Преобразовывая последнее выражение, получим соотношение для элемента спирали:

$$dS = d_{пл} \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + \frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{пл}} + \frac{r_0^2}{d_{пл}^2} + ctg^2(\theta_0)} \cdot d\alpha . \qquad (9)$$

Имея в виду, что $d_{пл} = d_{обр} \cdot sin(\theta_0)$, запишем соотношение для $\beta(\alpha)$ в следующем виде и дальнейшем будем использовать $d_{обр}$ для вывода окончательной формулы, ввиду удобства при изготовлении макета антенны на практике:

$$\beta(\alpha) = \arccos\left(\frac{d_{обр} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + \frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{обр} \cdot \sin(\alpha)} + \frac{r_0^2}{d_{обр}^2 \cdot \sin^2(\alpha)}}}{d_{обр} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + \frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{обр} \cdot \sin(\alpha)} + \frac{r_0^2}{d_{обр}^2 \cdot \sin^2(\alpha)} + ctg^2(\theta_0)}} \right).$$

Обозначим $b(\alpha) = 1 + \alpha^2 + \frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{обр} \cdot \sin(\alpha)} + \frac{r_0^2}{d_{обр}^2 \cdot \sin^2(\alpha)}$, тогда окончательное соотношение для (7) можно представить в виде:

$$\beta(\alpha) = \arccos\left(\sqrt{\frac{b(\alpha)}{b(\alpha) + ctg^2(\theta_0)}} \right) \qquad (10).$$

Полная длина $S_{кс}(\alpha_{\max})$ равношагового КСИ будет определяться следующим соотношением:

$$S_{кс}(\alpha_{\max}) = \int_{\alpha} dS \cdot d\alpha \qquad (11),$$

где $\alpha_{\max} = 2\pi n$, n- число витков спирали, причём, n может быть нецелым.

Учитывая выражение (9) запишем:

$$S_{кс}(\alpha_{\max}) = d_{пл} \cdot \int_0^{\alpha_{\max}} \sqrt{1 + \alpha^2 + \frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{пл}} + \frac{r_0^2}{d_{пл}^2} + ctg^2(\theta_0)} \cdot d\alpha$$

Или

$$S_{кс}(\alpha_{max}) = d_{обр} \cdot sin\theta_0 \cdot \int_0^{\alpha_{max}} \sqrt{\frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{обр} \cdot sin\theta_0} + \frac{r_0^2}{d_{обр}^2 \cdot sin^2\theta_0} + B} \cdot d\alpha \qquad (12),$$

где $B = 1 + \alpha^2 + ctg^2\theta_0$; $\alpha_{max} = 2\pi n$, n – число витков спирали, причём, n может быть нецелым.

На практике иногда необходимо знать габаритные размеры излучающей структуры, поэтому определим и высоту архимедовой конической спирали:

$$H_{кс} = n \cdot d_{обр} \cdot cos(\theta_0) \qquad (13).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выражения, описывающие геометрию конических спиральных антенн позволяют в обобщенном виде проводить исследования поля излучения целого класса антенн, начиная с цилиндрических, до плоских. Таким образом, полученные соотношения для конических спиральных структур позволяют вести дальнейший анализ поля у поверхности сферического зеркала с помощью векторного потенциала [4], а также позволит провести оптимальный выбор геометрических параметров конической спиральной антенны.

Однако существует ещё несколько подходов к геометрическому описанию КСИ, которые необходимы для анализа их потенциальных свойств, например изложенные в [6].

Так, в [6] описывается наиболее распространенный метод, основанный на модели анизотропно-проводящего цилиндра, в соответствие, с которой спираль заменяется сплошной гладкой полу бесконечной поверхностью, проводящей ток только в направлении намотки проводника. С помощью приближенных граничных условий электромагнитное поле спирали представляется в виде ряда пространственных гармоник, каждой, из которой ставится в соответствие свой пространственный резонанс. Что подразумевает выделение главных (резонансных) членов ряда и пренебрежение всеми другими (нерезонансными) слагаемыми. Далее исследуются пределы существования данных гармоник, или иными словами, типы волн в спиральной антенне в зависимости от геометрических параметров антенны и определяются характеристики излучения для каждого типа волны. Данный метод хотя и является относительно строгим в математическом представлении, однако не описывает общего интегрального характера поля излучения спиральной антенны, непригоден для исследования мало витковых спиральных антенн и антенн, выполненных в виде спирали на других, отличных от кругового цилиндра, поверхностях.

Однако из-за большого количества геометрических параметров исследование конического спирального излучателя с целью построения широкополосных антенн с вращающейся поляризацией, затруднено. Потому использование данных выражений (3, 10, 12) при численном интегрировании значительно облегчает и ускоряет задачу проектирования широкополосных КСИ.

Список литературы

1. Л.Д. Бахрах, Л.М. Тимофеев Проблемы электромагнитной совместимости авиационных бортовых радиотехнических комплексов. // Антенны. – М.: «Радиотехника», 2003 - №5 –с. 15-19.
2. А.И. Канащенков, В.И. Меркулов, О.Ф. Самарин Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. // М.: Изд. Радиотехника, 2002.–176с.
3. М.Б. Проценко, А.В. Лукьянчиков Анализ геометрии коническо-эллиптических спиральных антенн // Вестник СевГТУ. Вып. 32: Информатика, электроника, связь: Сб. начн.тр. Севастоп. Гос. Тех. Ун-т.– Севастополь, 2001.–С. 71-76.
4. М. Б. Проценко, А. В. Лукьянчиков, А. И. Исаенко, М. И. Редин Принцип построения широкополсных антенн с вращающейся поляризацией на основе конического спирального излучателя. // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 13 Междунар. Крым. конф., Севастополь, 8-12 сентября 2003 г. – Севастополь, 2003 -- С. 434-435
5. Л.М. Лобкова, М.Б. Проценко, М.В. Ивашина Математическая модель поля излучения спиральных антенн с заданной геометрией. // Вестник СевГТУ. Вып. 18: Информатика, электроника, связь: Сб. начн.тр. Севастоп. Гос. Тех. Ун-т.– Севастополь, 1999.–С. 31-37.
6. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. - М.: Сов. радио, 1974. - 224 с.

Поступила в редакцию 19.10.2005 г.