

УДК 621.396.677

М.И. Редин, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, Севастополь, Украина, 99053.

E-mail: max_redin@land.ru, max.redin@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНИЧЕСКОГО СПИРАЛЬНОГО ОБЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКИХ АНТЕНН

Представлены результаты оптимизации геометрических параметров конического спирального облучателя сферической антенны, требуемые для его производства.

На сегодняшний день построение недорогих сканирующих антенных систем, способных работать если не в широкой полосе частот, то перекрываемом определённом рабочем диапазоне, остаётся актуальной. Полосовые свойства сканирующих антенных систем на базе сферического зеркала обеспечиваются применением диапазонных конических спиралей (КС). Известно, что КС, сохраняя форму диаграммы направленности (ДН) во всей рабочей полосе, является квазичастотнонезависимой антенной [1 – 3]. Однако, до настоящего времени конический спиральный облучатель рассматривался только как самостоятельная антенна [1 – 3] и не рассматривался с точки зрения возможности облучения сферического зеркала. Особенность самой геометрической структуры конической спирали – это наличие нескольких параметров. Поэтому использование конического спирального излучателя в качестве облучателей сферической антенны требует предварительной оптимизации его геометрических параметров (удобных для производства) для создания поля, облучающего зеркало, с требуемыми характеристиками. А это значит, что применение КС при построении широкополосных сканирующих сферических антенн целесообразно.

Для этого необходимо путем расчета серии диаграмм направленности определить влияние изменения различных геометрических параметров на поле излучения антенны. По результатам расчета сделать вывод о возможности применения исследуемых структур для решения задач сканирования на базе сферического зеркала, т.е. решить задачу определения оптимальных геометрических параметров, задаваясь параметрами поля излучения.

Известно, что КС спирали характеризуется большим числом варьируемых геометрических параметров, а значит, можно достичь необходимых характеристики излучения после оптимизации. Известны различные виды КС, таких как простой круговой конус, эллиптический конус, а также со сложной формой образующей [3]. По виду намотки различают КС следующих типов: равношаговую, равноугольную с переменной плотностью витков. В статье уделено внимание равношаговой КС ввиду её преимуществ: простоты изготовления а значит и точности (что в диапазоне СВЧ существенно), постоянстве формы ДН в полосе рабочих частот. Это объясняется тем, что одинаковая плотность витков связана с равным вкладом каждого витка на характеристики излучения. Целью статьи является оптимизация геометрических параметров КС путём расчета её поля излучения для каждого случая.

Для данной КС основными геометрическими параметрами для оптимизации являются: угол конусности (половинный угол при вершине конуса θ_0); радиус основания конуса $R_{осн}$; начальный радиус намотки r_0 (радиус сечения конуса, от которого наматывается спираль); количество витков конической спирали n ; шаг спирали d (шаг спиральной линии по образующей конуса $d_{обп}$ – относительное приращение по поверхности вращения). При постоянном шаге спирали $d_{обп}$, получаем равношаговую (эквивалентную) спираль [1].

Задача оптимизации геометрических параметров КС как облучателя сферического зеркала проведена по критериям достижения максимального коэффициента эллиптичности (КЭ), уменьшения ширины главного лепестка ДН $\Delta\theta_{0,5}$ (режим однонаправленного осевого излучения [1, 2]) и уровня бокового излучения в диапазоне рабочих частот. Требуется сформировать при этом поле, облучающее эффективно освещаемую часть сферического зеркала, где фазовые ошибки ещё допустимы.

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.

Представим себе пространственную коническую спираль, проекция которой есть плоская архимедова спираль. Запишем проекции данной пространственной структуры по координатным осям декартовой системы в виде

$$z(\alpha) = (d_{обп} \cdot \alpha \cdot \sin\theta_0 + r_0) \cdot \operatorname{ctg}\theta_0;$$

$$y(\alpha) = (d_{обп} \cdot \alpha \cdot \sin\theta_0 + r_0) \cdot \sin\alpha;$$

$$x(\alpha) = (d_{обп} \cdot \alpha \cdot \sin\theta_0 + r_0) \cdot \cos\alpha,$$

где $d_{обп}$ – шаг спирали, α – параметрический угол намотки, r_0 – начальный радиус спирали, θ_0 – угол конусности

Используя обозначение $b(\alpha) = 1 + \alpha^2 + \frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{обп} \cdot \sin\alpha} + \frac{r_0^2}{d_{обп}^2 \cdot \sin^2\alpha}$, соотношение для угла наклона витка

представим в виде

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

Запишем выражение для текущей длины спирали

$$S_{\kappa\kappa}(\alpha_{\max}) = d_{\text{обп}} \cdot \sin \theta_0 \cdot \int_0^{\alpha_{\max}} \sqrt{\frac{2\alpha \cdot r_0}{d_{\text{обп}} \cdot \sin \theta_0} + \frac{r_0^2}{d_{\text{обп}}^2 \cdot \sin^2 \theta_0} + B d\alpha},$$

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 $H_{\kappa\kappa} = n \cdot d_{\text{ос}}$.

Таким образом, полученные соотношения для КС-структур позволяют провести оптимальный выбор геометрических параметров конической спиральной антенны.

Далее для определения поля излучения КС воспользуемся определением векторного потенциала, подробно изложенным в [4] в представлении бегущей волны тока по проводнику спирали $\vec{I}(s)$, т.е.

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\mu_0\epsilon_0} \text{rot rot } \vec{A} = -j\omega\vec{A} - j \frac{1}{\omega\mu_0\epsilon_0} \text{grad div } \vec{A}, \quad (1)$$

где μ_0, ϵ_0 – соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости среды; ω – круговая частота излучаемых (принимаемых) сигналов.

В выражении (1) градиент дивергенции близок к нулю $\text{grad div } \vec{A} \approx 0$ в дальней зоне, таким образом с точностью до коэффициентов поле излучения пропорционально векторному потенциалу $\vec{A}$:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \vec{I}(s) \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} ds, \quad (2)$$

где k – волновое число; S – полная длина спирали.

Для расчета $\vec{E}$ можно использовать формулу (1) в виде

$$\vec{E} = -j\omega \cdot (A_\theta \cdot \vec{\theta} + A_\phi \cdot \vec{\phi}),$$

где

$$A_\theta = A_x \cdot \cos \theta \cos \phi + A_y \cdot \cos \theta \sin \phi - A_z \sin \theta,$$

$$A_\phi = -A_x \cdot \sin \phi + A_y \cdot \cos \phi.$$

Таким образом, асимптотическое приближение для векторного потенциала запишется в виде [4]:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{\exp(-jkR)}{R} \int_S \vec{I}(s) \cdot \exp\{jk[x \cdot \sin \theta \cos \phi + y \cdot \sin \theta \sin \phi + z \cdot \cos \theta]\} ds. \quad (3)$$

Для вычисления интеграла (3) удобно векторное представление $\vec{I}(s)ds = I(s)d\vec{s}$ [4], где элемент дуги $d\vec{s}$, который можно представить в виде

$$d\vec{s} = \vec{i} \cdot dx + \vec{j} \cdot dy + \vec{k} \cdot dz,$$

где ток $I(s)$ может быть задан на каждом элементе $d\vec{s}$ в виде бегущей волны, как функция от s .

То есть $I(S) = I_0 \cdot \exp(-j \cdot k_\phi \cdot S)$ – бегущая волна тока по спиральной антенне, S – текущая длина спирального проводника; $k_\phi = k \cdot \xi$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства, $\xi = c/v_\phi > 1$ – характеризует замедление волны в спиральной структуре, ξ – коэффициент замедления, v_ϕ – фазовая скорость распространения волны.

Окончательное соотношение для $\vec{A}$ можно представить в виде

$$\vec{A} = \vec{i} \cdot A_x + \vec{j} \cdot A_y + \vec{k} \cdot A_z,$$

$$\text{где } \begin{cases} A_x = u \cdot \int_S I(s) \exp\{jk[x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \theta]\} dx; \\ A_y = u \cdot \int_S I(s) \exp\{jk[x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \theta]\} dy; \\ A_z = u \cdot \int_S I(s) \exp\{jk[x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \theta]\} dz, \end{cases}$$

$$\text{где } u = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\exp(-jkR)}{R}.$$

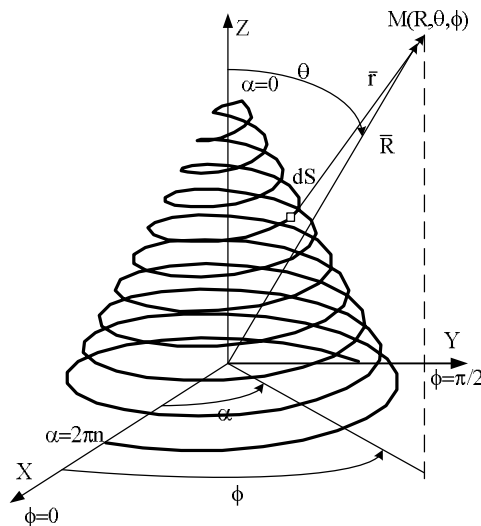


Рисунок 1 – Геометрия эквивалентной конической спиральной антенны

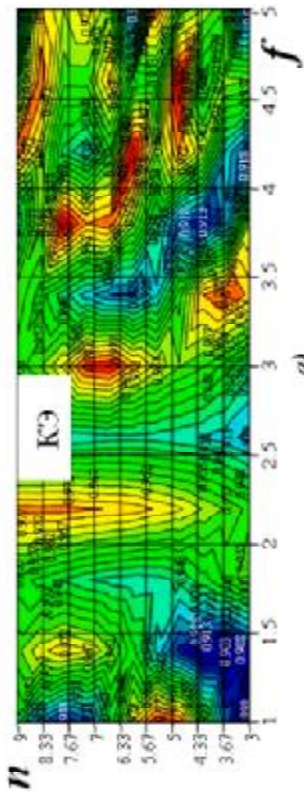
Для обеспечения работы КСИ в исследуемом частотном диапазоне были сразу зафиксированы радиусы большего и меньшего оснований, учитывая, что периметр первого и последнего витков соответствует длинам волн на краях диапазона. В таком случае варьируемыми становятся оставшиеся геометрические параметры: θ_0 , d , n .

В связи с относительной простотой вычислений и анализа полученных результатов в качестве оптимизационного алгоритма использован *метод полного перебора* [1].

Расчёт (моделирование) проводился по следующему принципу. На начальном этапе фиксировались все геометрические параметры, кроме одного, который, являясь исследуемой переменной, меняется от $\min$ до $\max$ одновременно во всём диапазоне исследуемых частот. Результатом такого поиска является получение 3-х мерных карт уровня (для искомых параметров поля излучения), по осям которых отложены исследуемый геометрический параметр и диапазон рабочих частот. На рисунке 2 приведены панорамные зависимости: а) 3-х мерная карта уровня для КЭ; б) 2-х мерная карта уровня для диаграммы направленности КС; в) сечение 2-х мерной карты уровня диаграммы направленности на фиксированной частоте $f_{\text{фикс}}$.

На основании полученных результатов выбиралось значение данного параметра наиболее удовлетворяющего (эффективно работающего) поставленным задачам.

3-х мерная карта уровня для КЭ в исследуемом диапазоне частот



2-х мерная карта уровня для диаграммы направленности

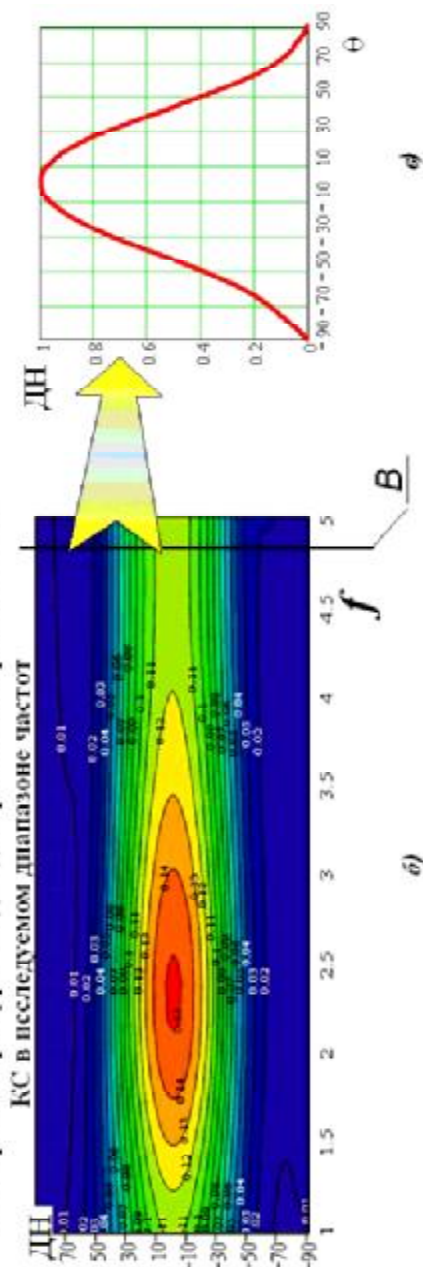


Рисунок 2 – Панорамные зависимости: а) для КЭ; б) для ДН; в) сечение ДН на частоте $f_{\text{фик}}$

Кроме того, при данном способе оптимизации возможно получить карты уровня для ДН в исследуемой полосе частот (см. рисунок 2, б). Такие графические зависимости наиболее удобны при оценке частотных свойств для предварительно зафиксированных геометрических параметров оптимизированной спиральной структуры. Следует отметить, что вертикально поперечный срез таких карт уровня представляет собой привычную ДН в декартовых координатах на фиксированной частоте. Так, поступая со всеми параметрами, т.е. поочередно перебирая исследуемый и фиксируя остальные, находим оптимальную геометрию, подходящую для наших условий.

При анализе результатов моделирования основное внимание уделялось получению направленных свойств при сохранении достаточно высокого $KЭ > 0,96$, при этом исследовалась и устойчивость параметров поля излучения КСИ в полосе частот и точности изготовления облучателя.

Далее необходимо определить центральную частоту, при которой наблюдаются оптимальные и устойчивые параметры поля излучения облучателя. Следующим этапом исследований являлось проведение моделирования и анализа поля излучения КСИ на фиксированной частоте при одновременном изменении двух любых других геометрических параметров. В этом случае возможно выбрать наиболее оптимальную модель излучателя, соответствующую нашим запросам с требуемыми характеристиками излучения.

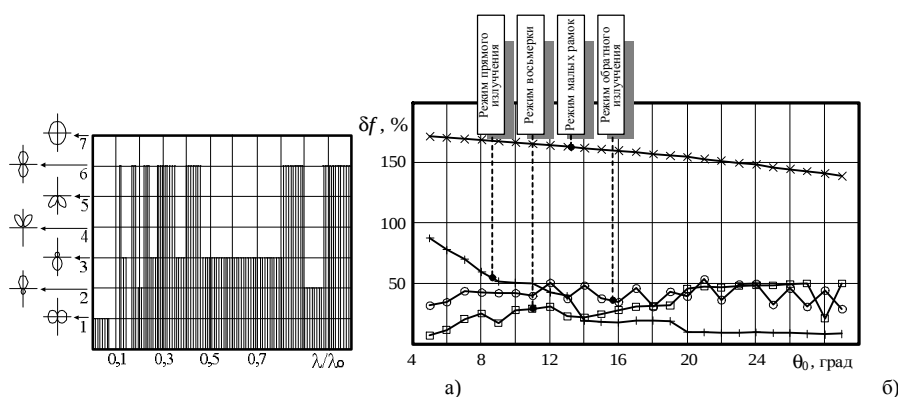


Рисунок 3 – Результаты проведенной оптимизации КС: а) классификация режимов излучения КС; б) диапазоновые свойства различных режимов излучения КС

Некоторые результаты проведенной оптимизации, в данном случае двухпараметрической, представлены на рисунке 3 [1]. На рисунке 3, а изображены основные режимы излучения, наблюдаемые у КС. Понятно, что для облучения зеркала потребуется режим направленного осевого излучения – 2, при котором основная излучаемая мощность сконцентрирована в переднем полупространстве (КС – слабонаправленная антенна) и заключена в его главном лепестке. На рисунке 3, б изображены зависимости достигнутых в результате оптимизации численных значений относительной полосы частот δf в пределах существования выделенных режимов.

На основании приведенных зависимостей можно синтезировать КС-излучатели с требуемыми направленными свойствами. В частности, при выборе угла конусности поверхности намотки спирального излучателя в пределах $\theta_0 = 5^\circ \dots 12^\circ$ можно достичь максимальной широкополосности для режима прямого осевого излучения. Но наряду с небольшим углом конусности необходимо выбирать и небольшое количество витков – 3...4, причём количество витков может быть дробным (кратным четверти волны).

Важным моментом является и определение нахождения точки питания однозаходного КСИ. Так, в свою очередь, были теоретически и экспериментально исследованы различные варианты размещения точки возбуждения КСИ, показанные на рисунке 4.

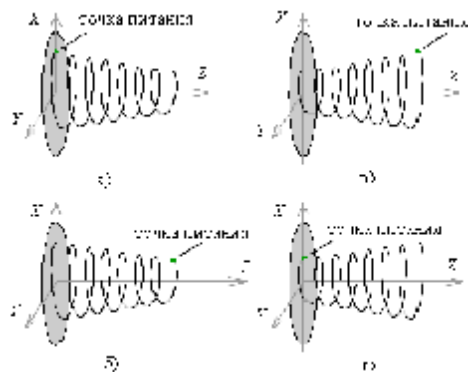


Рисунок 4 – Варианты взаимного расположения конической спирали, экрана и точки питания

После проведения расчётов для каждой из таких схем возбуждения были выбраны 2 возможных варианта, показанных на рисунке 4 а, г. Причём, вариант а является более широкополосным, чем вариант г. Варианты, же б, в непригодны для облучения сферического зеркала ввиду их широкой ДН, обусловленной появлением питающего проводника с током (штыря), негативно влияющим на ДН.

Таким образом, в результате проведённых расчётов и их анализа была проведена оптимизация КС, предназначенной для облучения сканирующей сферической зеркальной антенны. В результате выданы рекомендации по выбору геометрических параметров КС, которые могут быть исследованы в дальнейшем дополнительно экспериментально. Для облучения сферического зеркала подходящей структурой является КС обращённая меньшими витками к экрану, с точкой питания на экране, количеством витков n в пределах 4...5, углом конусности $5^\circ \dots 12^\circ$. Целью дальнейших исследований является изготовление оптимизированных КС, измерение их характеристик направленности, расчёт диаграмм

направленности сферического зеркала с оптимизированными КС-облучателями

Библиографический список

1. Проценко М. Б. Оптимизация геометрических параметров конических спиральных антенн по критерию требуемой ДН / М. Б. Проценко, А. В. Лукьянчиков, М. И. Редин // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 12 междунар. Крым. конф., Севастополь, 9 – 13 сентября 2002 г. — Севастополь, 2002 — С. 349 – 350.
2. Лукьянчиков А. В. Анализ влияния геометрических параметров конического спирального излучателя на характеристики излучения / А. В. Лукьянчиков, П. А. Комаров, М. И. Редин // Вест. СевГТУ. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 47. — С. 126 – 130.
3. Проценко М. Б. Принцип построения широкополосных антенн с вращающейся поляризацией на основе конического спирального излучателя / М. Б. Проценко, А. В. Лукьянчиков, М. И. Редин // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 13 междунар. Крым. конф., Севастополь, 8 – 12 сентября 2003 г. — Севастополь, 2003 — С. 434 – 435.
4. Лобкова Л. М. Математическая модель поля излучения спиральных антенн с заданной геометрией / Л. М. Лобкова, М. Б. Проценко, М. В. Ивашина // Вест. СевГТУ. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 1999. — Вып. 18. — С. 31 – 37.

Поступила в редакцию 13.02.2006