

УДК 621.396.677

М.И. Редин

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО СПИРАЛЬНОГО ОБЛУЧАТЕЛЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований для различных конических спиралей, предназначенных для облучения сферического зеркала в частотном диапазоне спутникового телевидения. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов с целью выбора оптимальной геометрии излучателя. Предложена оригинальная схема построения стенда антенных измерений.

До настоящего времени конический спиральный (КС) облучатель рассматривался только как самостоятельная антенна [1 – 3] и не рассматривался с точки зрения возможности облучения сферического зеркала. Для построения антенн с управляемой диаграммой направленности (ДН) целесообразно использовать сферическое зеркало в сочетании с коническим спиральным облучателем. Это обеспечивает возможность широкоугольного сканирования в достаточно широкой полосе частот.

Целью данных экспериментальных исследований является подтверждение основных теоретических результатов, полученных в результате оптимизации геометрических параметров конической спирали (КС). А именно для нескольких КС провести эксперимент и, получив параметры поля излучения таких как коэффициент эллиптичности и ширина ДН $\Delta\Theta_{0,5}$, выявить возможность использования КС как облучателя сферической антенны (радиусом 1 м, фокусным расстоянием 0,5 м, углом раскрытия 180° с центра сферы).

Необходимо подтвердить влияние изменения тех или иных геометрических параметров на поле излучения антенны, по результатам исследований сделать вывод о возможности применения КС-структур для решения задач сканирования на базе сферического зеркала. Рассмотрим различные варианты только равношаговой КС ввиду её преимуществ: простоты и точности изготовления (что в диапазоне СВЧ существенно), одинаковой плотности витков, которая связана с равным вкладом каждого витка на характеристики излучения (постоянство формы ДН в полосе рабочих частот).

В литературных источниках [1 – 3] уже рассмотрены КС достаточно подробно, но в данной статье расставлены акценты с точки зрения использования КС для облучения сферического зеркала.

Для эквишаговой КС основными геометрическими параметрами являются: угол конусности (половинный угол при вершине конуса θ_0); радиус

основания конуса $R_{\text{осн}}$; начальный радиус намотки r_0 (радиус сечения конуса, от которого наматывается спираль); количество витков конической спирали n ; шаг спиральной линии по образующей конуса $d_{\text{о\o\o p}}$ – относительное приращение по поверхности вращения [2].

В данной статье экспериментально исследованы наряду с КС гибридные спирали, представляющие собой композицию из двух более простых – цилиндрической и конической. При этом эти спирали рассматриваются в качестве облучателя сферического зеркала. Значит необходимо получить высокий коэффициент эллиптичности (КЭ) для данных однозаходных структур, добиться уменьшения ширины главного лепестка ДН $\Delta\Theta_{0,5}$ (режим однонаправленного осевого излучения [2]) и уровня бокового излучения в диапазоне рабочих частот.

При рассмотрении геометрии КС, изображённой на рисунке 1, представим себе пространственную коническую спираль, проекция которой есть плоская архимедова спираль. Запишем проекции данной пространственной структуры по координатным осям декартовой системы

$$\begin{cases} X(\alpha) = \left(r_0 + \frac{d_{\text{о\o\o p}} \sin(\theta_0)}{2 \cdot \pi} \alpha \right) \cos(\alpha); \\ Y(\alpha) = \left(r_0 + \frac{d_{\text{о\o\o p}} \sin(\theta_0)}{2 \cdot \pi} \alpha \right) \sin(\alpha); \\ Z(\alpha) = \frac{d_{\text{о\o\o p}} \cos(\theta_0) \alpha}{2\pi}, \end{cases}$$

где α – параметрический угол намотки, $d_{\text{о\o\o p}}$ – относительное приращение по поверхности вращения, θ_0 – половинный угол при вершине конуса, r_0 – начальный радиус намотки.

Продифференцировав эти уравнения по α , получим производные по координатам, необходимые в дальнейшем:

$$\begin{cases} \frac{dx(\alpha)}{d\alpha} = \frac{d_{\text{о\o\o p}} \sin \theta_0}{2\pi} \cos \alpha - \left(r_0 + \frac{d_{\text{о\o\o p}} \sin \theta_0}{2\pi} \alpha \right) \sin \alpha; \\ \frac{dy(\alpha)}{d\alpha} = \frac{d_{\text{о\o\o p}} \sin \theta_0}{2\pi} \sin \alpha + \left(r_0 + \frac{d_{\text{о\o\o p}} \sin \theta_0}{\pi} \right) \cos \alpha; \\ \frac{dz(\alpha)}{d\alpha} = \frac{d_{\text{о\o\o p}} \cos \theta_0}{2\pi}. \end{cases}$$

Тогда полная длина спирали определится соотношением

$$S = \int_0^{\alpha_{\text{max}}} \sqrt{dx(\alpha)^2 + dy(\alpha)^2 + dz(\alpha)^2} d\alpha,$$

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

Для эквишаговой спирали, выполненной на круговом конусе, получаем

$$S(\alpha) = \frac{\sqrt{a^2 \cdot C(\theta_a, \beta)^{2\alpha/\pi} (\ln(C(\theta_a, \beta)))^2 + 1 + \ln(C(\theta_a, \beta))^2 / \operatorname{tg}^2 \theta_a}}{\ln[C(\theta_a, \beta)]},$$

где $C(\theta, \beta) = \cos(\beta - \theta) / \cos(\beta + \theta)$.

Зависимость угла подъема витка КС от параметра α определяется как

$$\beta(\alpha) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\sqrt{1 - \sin^2(\alpha)}}\right),$$

где β – угол подъема витка в сечении XOZ.

Таким образом, полученные соотношения для КС-структур (после проведения расчетов) позволяют осуществить выбор геометрических параметров для дальнейшей экспериментальной проверки.

На основании определения векторного потенциала, изложенным в [4], в представлении бегущей волны тока по проводнику спирали получим рассчитанные ДН поля излучения КС.

С целью подтверждения достоверности результатов теоретических исследований облучающей системы на базе конической спирали приведены экспериментальные исследования. Проверяя сходимость теории и практики были выбраны наиболее простые с точки зрения расчётов, изготовления, возбуждения однозаходные спирали с экраном. Для них и проведены дальнейшие исследования.

Важным моментом является и определение расположения точки питания однозаходной КС. Так, в свою очередь, были теоретически исследованы и экспериментально проверены различные варианты размещения точки возбуждения КС (рисунок 2). Для них же проведена и экспериментальная проверка. Результаты эксперимента сведены в таблицы 1,2.

Любая спиральная антенна в режиме излучения работает таким образом: ТЕМ – волна, которая распространяется по питающему коаксиальному фидеру, приходит на вход спиральной антенны, на участке антенны размерами 1...2 витка трансформируется в пространственную волну типа T_1 , которая, распространяясь по спирали, формирует осевое излучение круговой поляризации в полосе частот. Наличие плоского отражающего экрана позво-

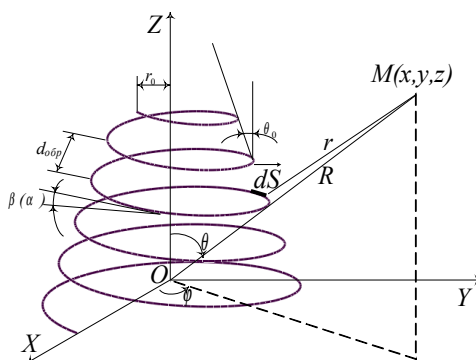


Рисунок 1 – Геометрическое представление однозаходной конической спирали в системе декартовых координат

ляет осуществить возбуждение однозаходной спиральной антенны и ограничить область излучения антенны в верхнем (переднем) полупространстве.

Для случая расположения широким основанием к экрану справедливо следующее. На нижних частотах не вся энергия волны тока на проводнике антенны успевает израсходоваться на излучение. Значительная её часть достигает конца спирали и либо отражается от него, в большинстве случаев, либо затухает, когда применены специальные методы подавления. В первом случае в антенне возникает стоячая волна, и её поляризация близка к линейной, во втором – антенна работает в режиме бегущей волны, поляризация близка к круговой. С уменьшением длины волны возрастает часть энергии, расходуемая на излучение. Тогда конца спирали достигает все меньшее количество энергии, а значит, при этом снижается отражение от конца проводника спирали. Кроме того, при кратном совпадении длин волн ($2,3,4 \lambda$) на одном витке длиной L (например, $L \approx 2\lambda$, где λ – длина волны) наблюдается воронкообразное излучение, показанное в работе [2].

Несколько иначе обстоят дела для случая расположения КС меньшим основанием к экрану. Согласно принципу отсечки тока осевое излучение происходит при совпадении длин волны λ и витка L ($L \approx \lambda$), причём не должно быть больше таких условий, где бы могло произойти кратное совпадение длин волн на витке, приводящего к негативному (воронкообразному) режиму излучения, как это возникает при расположении широким основанием к экрану.

На рисунке 3 приведены экспериментальные ДН в сравнении с теоретическими для гибридной спирали 2 (рисунок 2,е, таблица 1) на частоте 12 ГГц. Обращает на себя внимание совпадение по форме главного лепестка ДН соответствующих диаграмм компонентов поля E_θ , E_ϕ . Однако по уровню бокового излучения получены небольшие отклонения от теоретических, хотя направления боковых лепестков совпадают. Видно, что уровень боковых лепестков, полученных экспериментально, превышает рассчитанный. Это объясняется неточностью изготовления макета спиральной антенны (на частоте близкой к 12 ГГц довольно трудно выдержать точность изготовления ввиду размеров облучателя), неидеальностью измерительного полигона.

Чтобы обеспечить работу КС в исследуемом частотном диапазоне были сразу зафиксированы радиусы большего и меньшего оснований, учитывая, что периметр каждого из оснований соответствует длинам волн на краях диапазона. В таком случае варьируемыми становятся оставшиеся геометрические параметры.

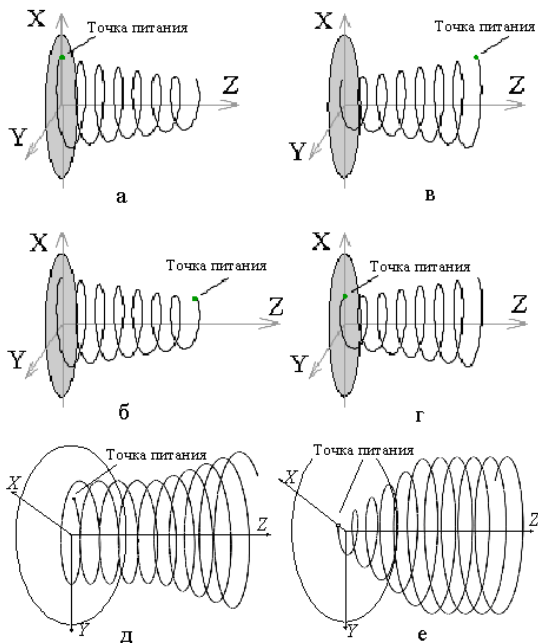


Рисунок 2 – Варианты взаимного расположения спирали, экрана и точки питания для исследуемых структур

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

по рисунку 2 Тип спирали	Параметры спирали	Ширина ДН $2\Delta\Theta$				
		f	Частота f, ГГц			
			10,6	11	11,5	12
1.д	$n_{\text{цикл}}=3$ $n_{\text{кон}}=3$ $d=5$ мм $R_{\text{цикл}}=r_{\text{нач}}=4$ мм $R_{\text{кон}}=R_{\text{габ}}=5$ мм $\Theta_0=9^\circ$	$2\Delta\Theta_{\theta} _{-3\text{дБ}}$ $2\Delta\Theta_{\theta} _{-10\text{дБ}}$	55° 85°	55° 85°	55° 85°	55° 85°
		$2\Delta\Theta_{\phi} _{-3\text{дБ}}$ $2\Delta\Theta_{\phi} _{-10\text{дБ}}$	52° 105°	57° 107°	57° 105°	55° 100°
	$n_{\text{цикл}}=3$ $n_{\text{кон}}=3$	$\Delta\Theta_{\theta} _{-3\text{дБ}}$ $\Delta\Theta_{\theta} _{-10\text{дБ}}$	47° 80°	45° 75°	50° 75°	50° 85°

2.е	d=5 мм r _{нач} =2 мм R _{цил} =R _{габ} =5мм Θ ₀ =9°	$2\Delta\Theta_{\varphi} _{-3дБ}$	50°	50°	45°	40°
		$2\Delta\Theta_{\theta} _{-10дБ}$	90°	95°	92°	80°

Продолжение таблицы 1

3.а	n _{кон} =4 d=5 мм r _{нач} =2,5 мм R _{габ} =4,4 мм Θ ₀ =9°	$2\Delta\Theta_{\theta} _{-3дБ}$	62°	70°	75°	65°
		$2\Delta\Theta_{\theta} _{-10дБ}$	108°	110°	102°	105°
4.г	n _{кон} =3 d=4 мм r _{нач} =2,5 мм R _{габ} =5 мм Θ ₀ =9°	$2\Delta\Theta_{\theta} _{-3дБ}$	75°	75°	100°	90°
		$2\Delta\Theta_{\theta} _{-10дБ}$	112°	110°	120°	115°
5.г	n _{кон} =4 d=5 мм r _{нач} =2,5 мм R _{габ} =5 мм Θ ₀ =9°	$2\Delta\Theta_{\theta} _{-3дБ}$	55°	60°	55°	57°
		$2\Delta\Theta_{\theta} _{-10дБ}$	100°	100°	95°	105°
6.б	n _{кон} =4 d=5 мм r _{нач} =2,5 мм R _{габ} =5 мм Θ ₀ =9°	$2\Delta\Theta_{\theta} _{-3дБ}$	72°	-	-	-
		$2\Delta\Theta_{\theta} _{-10дБ}$	110°	-	-	-
6.б	n _{кон} =4 d=5 мм r _{нач} =2,5 мм R _{габ} =5 мм Θ ₀ =9°	$2\Delta\Theta_{\varphi} _{-3дБ}$	95°	-	-	-
		$2\Delta\Theta_{\varphi} _{-10дБ}$	140°	-	-	-

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований

спирали Тип	Геометрические параметры спирали	Ширина ДН на частоте f=10,6 ГГц	
		$2\Delta\Theta_{\theta} _{-3дБ}$	$2\Delta\Theta_{\theta} _{-10дБ}$
1.г	d=5 мм r _{нач} =2,5мм R _{габ} =5мм Θ ₀ =9°	n _{кон} =3	75° 95°
		n _{кон} =3,5	75° 110°
		n _{кон} =4	75° 110°

С точки зрения диаграммных характеристик с наилучшей стороны себя проявили образцы 1,2,5 в таблице 1. При оценке направленных свойств КС принимался во внимание параметр поля излучения $\Delta\theta_{0,5}$, так как необходимо будет облучать небольшую зону (аппроксимированную параболой) на сферическом зеркале, где фазовые ошибки ещё невелики.

Однако с точки зрения поляризационных свойств наиболее близки к поставленной задаче получения КС с высоким осевым КЭ (0,8 и выше) исследуемые спирали 3,4. При этом разница уровней принимаемых сигналов разных компонент поля составляет не больше 2 дБ, при динамическом диапазоне ДН 30 дБ, что соответствует КЭ не менее 0,8. Исследуя гибридную спираль 1 (см. таблицу 1) зарегистрировано ещё меньшее изменение уровня измеряемого сигнала на входе стенда, при этом в более высокочастотном (12 ГГц) она составляет менее 1дБ, что несколько лучше чем в низкочастотной части диапазона (10,6 ГГц) – порядка 2,5 дБ. Однако, гибридная спираль 2 (таблица 1) показывает лучшие поляризационные свойства. Для неё принимаемая разница уровней сигнала значительно меньше предыдущей и составляет на 10,6 ГГц 1,5 дБ, а на 12 ГГц 0,3 дБ. При этом ширина ДН двух ортогональных компонент поля практически совпадает и отличается всего на $10^\circ \dots 15^\circ$. Вдобавок ко всему, для варианта спирали 2 ожидается лучшая картина с точки зрения входных характеристик, меньший и постоянный КСВ. Постоянство КСВ объясняется представлением спирали как замедляющей структуры. Начальный конический плавный переход не даёт резкого скачка, изменения проводника, поэтому волна (типа ТЕМ), распространяющаяся по питающему фидеру, не испытывает сильных отражений от такой неоднородности и трансформируется в поверхностную бегущую волну тока. Можно сказать, что использование такой антенны является целесообразным в системе облучения сферического зеркала.

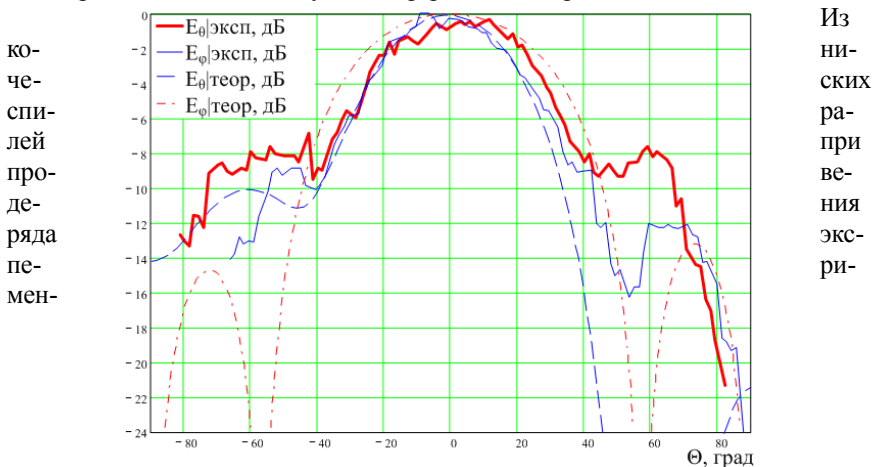


Рисунок 3 – Результат экспериментальных исследований для гибридной спирали 2 на частоте 12 ГГц

тальных проверок для каждой из таких схем возбуждения были выбраны два возможных варианта, показанных на рисунке 2, *а, з*. Причём, вариант *а* является более широкополосным, чем вариант *з*. Варианты, же *2,б,в* непригодны для облучения сферического зеркала ввиду их широкой ДН, обусловленного появлением питающего проводника с током (штыря), негативно влияющим на ДН.

Измерения проводились по стандартной методике, при измерениях конструкция исследуемой антенны располагалась на диэлектрической мачте, удаление от отражающих объектов составляло не менее 2м. Волновое сопротивление фидеров антенн составляло 75 Ом. Измерение внешних характеристик антенны, в частности амплитудных ДН, проводились с помощью специализированного антенного измерительного стенда-комплекса (АИК), реализующего метод вращающейся антенны линейной поляризации в дальней зоне (см. рисунок 4, *а*).

В качестве объекта экспериментальных исследований использована однозаходная эквизиговая коническая спиральная антенна (см. рисунок 2, *а, б*), расположенная над плоским проводящим экраном. Измерения проводились в диапазоне 10,6...12 ГГц. Измерения амплитудных ДН проводились в линейном поляризационном базисе (см. рисунок 3, *б*). Используемый полигон обеспечивает расстояния между исследуемой и вспомогательной антеннами $R=5-6$ метров, что вполне удовлетворяет условию дальней зоны во всем используемом диапазоне частот. На рисунке 4, *а* обозначено: Г – ВЧ генератор; LNB – стандартный облучатель спутникового ТВ; ИА – исследуемая антенна; СМВ – селективный милливольтметр; АИК – стенд автоматического измерительного комплекса.

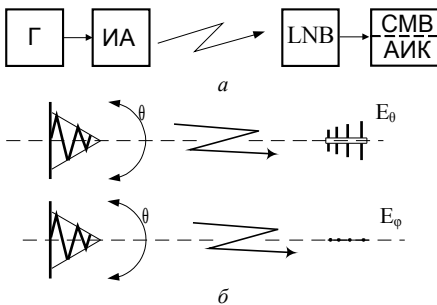


Рисунок 4 – Схема используемого стенда: а – упрощённая схема для измерения характеристик поля излучения; б – метод измерений амплитудных ДН в линейном базисе

Исследуемая антенна, установленная на ОПУ (имеющем горизонтальную ось вращения), работала в режиме передачи, возбуждалась от генератора (Г4-109) АМ-сигналом. В качестве вспомогательной приёмной антенны использовался стандартный облучатель спутникового телевидения (LNB), с встроенным малошумящим усилителем с коэффициентом усиления равным 65 дБ и преобразователем частоты. Причём, измерения проводились

для θ -, ϕ - компонентв поля, благодаря возможности переключения встроенных ортогональных штырей в LNB-блоке, соответствующих вертикальной и горизонтальной поляризации, с помощью спутникового ТВ приёмника, питающего,

управляющего LNB-блоком. Преобразователь частоты (в составе LNB-блока) осуществлял перенос на стандартную промежуточную частоту, на которой осуществлялось детектирование АМ-сигнала, измеренного селективным микровольтметром У2-8, работающего в составе АИК. Данная схема позволяет получить динамический диапазон сигналов порядка 50 дБ.

Используемый полигон (лаборатория № 414) содержит неоднородную подстилающую поверхность, где имеет место отражение от предметов, которые могут повлиять на результаты измерений характеристик излучения в соответствии с этим исследуемая и вспомогательная антенны устанавливались в стороне от затеняющих предметов на свободном пространстве лаборатории. Поэтому можно считать, что измерительные стенды и полигон обеспечивают приемлемую точность измерений при проведении экспериментальных исследований характеристик антенн.

При использовании указанных выше измерительных средств, максимальная погрешность измерения амплитуды составила 0,33 дБ. Погрешность отсчета угловых координат определяется типом соответствующих датчиков и для диапазона углов поворота (азимут) – 360° составляет не более 1° .

Таким образом, в результате натурных испытаний были проверены и выбраны как рекомендуемые несколько спиралей, среди которых есть и гибридные спиральные структуры. Эксперимент показал, что выбранные спиральные структуры сохраняют свои направленные и поляризационные свойства в исследуемой полосе частот. На этом основании можно говорить, что использование гибридных спиралей является целесообразным при построении диапазонных сканирующих антенных систем на сферическом зеркале. Тем не менее, следующим этапом исследований является проверка входных характеристик исследуемых спиральных излучателей в рабочей полосе частот. После чего можно сделать окончательный вывод о возможности применения данных спиральных антенн для облучения сферического зеркала.

Библиографический список

1. 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.

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. 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.

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 08.02.2006 г.