

УДК 621.396.67

Л.М. Лобкова, проф., д-р техн. наук; В.В. Головин; М.А. Бормекова

Севастопольский национальный технический университет

Кафедра радиотехники, Студгородок, Стрелецкая балка, г. Севастополь, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОБЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОДНО- ЗЕРКАЛЬНОЙ ГИБРИДНО-ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Проведен анализ распределения тока на зеркале однозеркальной гибридно-зеркальной антенны, создаваемого облучателем, составленным из спиральных излучателей. Показано, что использование этих структур в составе гибридно-зеркальных антенн позволяет сформировать разнообразные распределения тока при малом числе излучающих элементов.

Задача исследования гибридно-зеркальных антенн (ГЗА) является условно актуальной, так как она сочетает в себе множество особенностей, связанных с зеркальными антеннами и антенными решетками. Это обуславливает во многом сложность, громоздкость или малую информационную емкость тех или иных методов исследования ГЗА. При этом на практике предпочтение отдается простым методам геометрической оптики, которые позволяют проводить расчеты для ограниченного числа простейших типов излучателей. Следствие этого – конструктивная сложность антенной решетки и особенно – ее системы возбуждения. Поэтому использование таких элементов решетки, как проволочные спиральные излучатели, позволит при наличии соответствующей математической модели поля излучения разработать ГЗА с простым облучателем.

Одной из основных характеристик зеркальной антенны, ее облучающей системы является коэффициент использования поверхности (КИП), характеризующий эффективность использования поверхности зеркала. Его наибольшие значения получаются при построении зеркальной антенны по двухзеркальной схеме. Для однозеркальной антенны это связано с большими трудностями в реализации облучателя, который следует разрабатывать как антенную решетку.

Проведем предварительный анализ влияния формы амплитудного распределения поля в раскрыве зеркала $f(\rho)$ на направленные свойства зеркальной антенны. Для этого воспользуемся упрощенным представлением $f(\rho)$, полагая, что фаза поля во всех точках на поверхности зеркала одинакова и равна 0. Тогда для описания распределения $f(\rho)$ воспользуемся соотношением:

$$f(\rho) = \Delta_1 + (1 - \Delta_1) \cdot \left[1 - \left(\frac{\rho}{r_a} \right)^2 \right] \cdot \left| \cos \left(\frac{2\rho}{r_a} - \frac{3\pi}{2} \right) \right| \cdot \Delta_2,$$

где r_a – радиус апертуры зеркала, Δ_1 , Δ_2 – коэффициенты, определяющие уровень поля на краю и в центре зеркала.

Тогда поле излучения ЗА можно представить в виде:

$$F(\theta, \phi) = (1 + \cos(\theta)) \int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} [f(\rho, \psi_1) \exp(jk \cdot \rho \cdot \sin(\theta) \cos(\psi_1 - \psi))] \cdot \rho \, d\rho \, d\psi_1.$$

Для случая осесимметричного распределения $f(\rho)$ преобразуется к виду:

$$F(\theta) = (1 + \cos(\theta)) \int_0^{r_a} [f(\rho) J_0(jk \cdot \rho \cdot \sin(\theta))] \cdot \rho \, d\rho \, d\psi,$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Наиболее узкий главный лепесток ДН возможен при амплитуде поля на краю зеркала $\Delta_k = 1$, а наименьший уровень бокового излучения – при отсутствии затекания поля за края зеркала, когда $\Delta_k = 1$. Во избежание рассогласования облучателя необходимо обеспечить спад поля в направлении фокальной оси зеркала, что приводит к незначительному расширению ДН и увеличению бокового излучения, которое тем ниже, чем меньше пьедестал Δ_k . Появление на краю зеркала вторичных экстремумов приводит к снижению КИП антенны, уменьшению бокового излучения и недопустимой деформации главного лепестка ДН, которая прямо пропорциональна относительному уровню вторичного экстремума.

Таким образом, требуемая форма распределения поля на зеркале должна характеризоваться большей равномерностью в раскрыве зеркала и спаданием в направлении фокальной оси и на краях зеркала без вторичных экстремумов. В этом случае в раскрыве зеркала сосредотачивается наибольшая энергия от облучателя и обеспечивается его надежное согласование.

С учетом сделанных выводов проведены расчеты распределения тока на зеркале ГЗА (фокусное расстояние зеркала $F = 0,64$ м, эксцентриситет $e = 0,6$, диаметр $D = 1,78$ м; профиль конформной поверхности малого зеркала – гиперболид с $F = 0,059$ м, $e = 1,5$). Методика расчета связана с определением магнитного поля, создаваемого спиральными излучателями, для которых заданы их геометрические параметры и режим возбуждения, вблизи поверхности большого зеркала. На зеркале рассчитывается распределение тока по трем составляющим J_x, J_y, J_z , интегрируя которые по поверхности зеркала вычисляется поле излучения ГЗА в дальней зоне.

Расчеты тока проводились в ортогональных сечениях (плоскости XOZ и YOZ), на частоте 11,36 ГГц для одного и для решетки из 2 излучателей. Так как спиральные излучатели формируют поле эллиптической поляризации, то анализ проводился по составляющим тока J_x, J_y в каждой из плоскостей.

Рассмотрим простейший случай, когда зеркало облучается одиночным спиральным излучателем, расположенным в вершине малого зеркала, когда $\theta_1 = 180^\circ$ (см. рисунок 1).

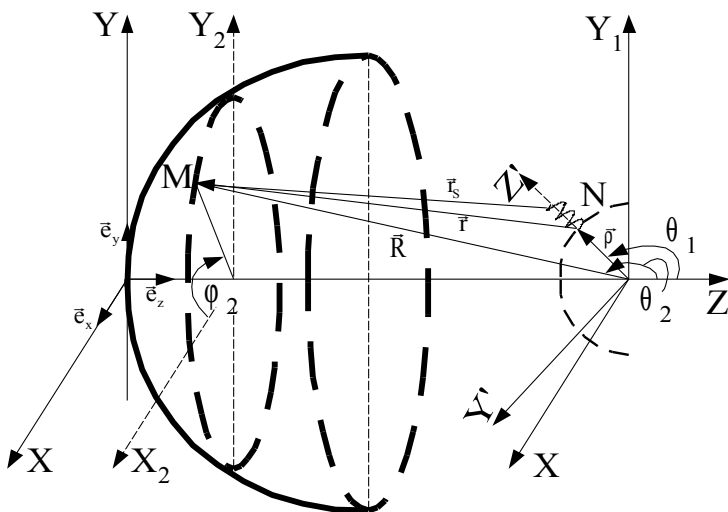


Рисунок 1 – Геометрия гибридно-зеркальной антенны:
 $\bar{\rho}$ – внутренний радиус гиперболической поверхности; $N(\rho, \varphi_1, \theta_1)$ – точка местоположения излучателя на поверхности малого зеркала;
 $M(R, \varphi_2, \theta_2)$ – текущая точка на поверхности параболоида;
 r – расстояние между точками N и M

Используя методику расчета характеристик поля излучения спиральных антенн, описанную в [1], была выделена область геометрических параметров, в пределах которой формируемая одиночной спиральной структурой, возбуждаемой током в режиме бегущей волны, ДН имеет по уровню – 10дБ ширину в пределах $90^\circ \geq 2\Delta\theta_{-10\text{дБ}} \geq 120^\circ$ и уровень бокового излучения не превышающий –10 дБ: радиус образующего цилиндра $a=0,006$ м, количество витков $n=2\dots 5$ и угол наклона витков спирали $\beta=12^\circ\dots 24^\circ$. При этом коэффициент эллиптичности принимает значения не ниже $KЭ=0,8$.

Проведенный анализ распределения модуля тока на зеркале показал, что при построении облучателя ГЗА для указанного диапазона частот следует использовать спиральные структуры с $a=0,006$ м и количеством витков $n=2\dots 4$, преимущественно при $\beta=18^\circ\dots 20^\circ$. При этом возможен вариант, когда для обеспечения направленного излучения одноэлементный облучатель придется смещать из вершины малого зеркала на некоторый угол θ_1 , что в то же время является переходом к рассмотрению двухэлементного облучателя.

Переходя к рассмотрению двухэлементной решетки спиральных излучателей, следует выбрать вариант их ориентации относительно друг друга и фокальной оси. Положение излучателя на малом зеркале характеризуется

тремя углами: θ_1 – смещение облучателя по поверхности малого зеркала от фокальной оси; θ_n – угол наклона оси спиральной структуры относительно фокальной оси; ϕ_1 – угол поворота излучателя в плоскости XOY. Пусть первый элемент в плоскости YOZ имеет положение с $\theta_1 = 180^\circ - \Delta\theta$ (будем рассматривать случай, когда ось спиральной структуры совпадает с направлением вектора $\vec{\rho}$, т.е. когда $\theta_1 = \theta_n$; $\Delta\theta$ – угол отклонения от фокальной оси), $\phi_1 = 0^\circ$, а второй элемент можно расположить в той же плоскости симметрично первому относительно фокальной оси путем поворота его в плоскости XOY на $\phi_1 = 180^\circ$ (рисунок 2,а) или перемещая в плоскости YOZ до $\theta_1 = 180^\circ + \Delta\theta$ (рисунок 2,б). Каждое из положений излучателей оказывается решающим по причине того, что точка возбуждения спирального излучателя смещена от оси образующего его поверхность цилиндра.

Поэтому при повороте второго излучателя на $\phi_1 = 180^\circ$ получаем симметричное отображение распределение тока, но только в обратном направлении

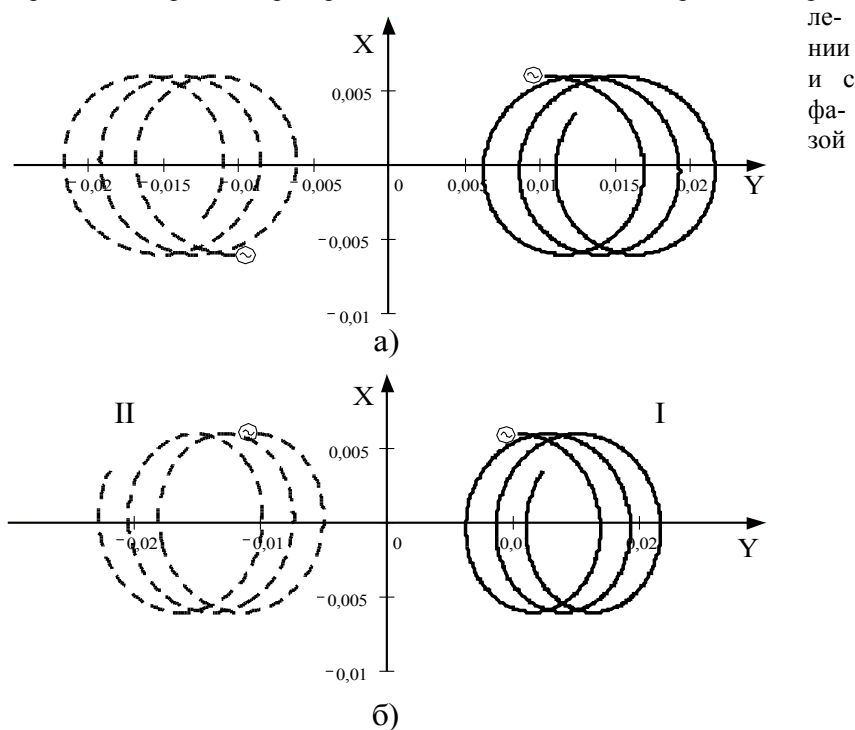


Рисунок 2 – Расположение спиральных излучателей на конформной поверхности малого зеркала:

- а) $\theta_1 = 170^\circ$; поворот второго элемента (II) относительно оси OX на $\phi_1 = 180^\circ$;
 б) $\phi_1 = 0^\circ$; поворот второго элемента (II) относительно оси OZ на $\theta_1 = 190^\circ$

противоположного знака. В двухэлементной решетке это приводит к формированию распределения тока на зеркале с нулем в осевом направлении зеркала при любой геометрии и положении излучателей, но при этом диаграмма направленности ГЗА распадается, излучение в осевом направлении отсутствует, этот способ размещения излучателей применим при формировании двухлепестковой ДН, но не пригоден для облучателя, формирующего однолепестковую ДН.

Рассмотрим случай, когда излучатели расположены параллельно вектору $\vec{\rho}$, т.е. когда $\theta_n = \theta_1$. Проведенный анализ расчетов распределения модуля тока на зеркале, создаваемого облучателем, построенным по схеме, показанной на рисунке 2,б, показал:

- 1) допустимый угол отклонения излучателей от фокальной оси составляет $\Delta\theta = 10^\circ \dots 15^\circ$ ($\theta_1 = 180^\circ \pm \Delta\theta$);
- 2) построение решетки из спиралей с одинаковой геометрией позволяет сформировать различные распределения составляющих тока на зеркале, которые в общем случае несимметричны в плоскости YOZ, в которой излучатели смещены по поверхности малого зеркала симметрично относительно фокальной оси большого зеркала (см. рисунок 2);
- 3) используя двухэлементный облучатель, состоящий из одинаковых излучателей, при увеличении n и β можно сформировать распределение тока с глубоким провалом в направлении близком к фокальной оси, однако это сопровождается ростом выбросов тока на краю зеркала, сохраняется колебательный характер распределений. Это неизбежно должно привести к росту бокового излучения, деформации или даже к распадению ДН ГЗА;
- 4) решение возникшей проблемы следует искать в построении решетки облучателя из элементов с различными геометрическими параметрами.

Здесь и далее индексы 1 и 2 соответствуют спиральной структуре I и II, соответственно (см. рисунок 2,б). Задавая для первого излучателя (по умолчанию смещенного от фокальной оси на угол $\theta_1 = 170^\circ$) угол наклона витков спирали $\beta_1 = 10^\circ$, с увеличением угла β_2 второго облучателя (смещенного относительно фокальной оси на угол $\theta_1 = 190^\circ$) от 15° до 20° , распределение амплитуды составляющих тока из равномерно спадающего от центра к краям в плоскости XOZ и с максимумом, смещенным от оси – в ортогональной плоскости, приобретает глубокий спад в направлении фокальной оси в первой плоскости и становится более симметричным в другой плоскости, при этом увеличение витков спирали позволяет снизить амплитуду тока на краю зеркала. Дальнейшее увеличение угла подъема и количества витков приводит к формированию в обеих плоскостях выбросов на краю

зеркала, которые, однако, исчезают в случае задания $\beta_2 = 22^\circ$ и $n = 5$, но в плоскости YOZ при этом амплитуда тока на краю зеркала растет в 2...3 раза, что вызвано распадением главного лепестка ДН первого излучателя и уменьшением ширины ДН второго.

С увеличением β_1 в пределах $10^\circ \dots 15^\circ$ для случаев $\beta_2 = 16^\circ \dots 19^\circ$ при $n = 3$ увеличивается асимметрия в распределении тока на зеркале, которое в плоскости XOZ при $\beta_1 = 13^\circ$ приобретает колебательный характер, усиливающийся с ростом β_1 , а в плоскости YOZ появление асимметрии в распределении сопровождается ростом бокового выброса поля на краю зеркала.

Поэтому использование излучателей только с различными углами наклона не обеспечивает формирования требуемого распределения тока на зеркале, причем дополнительное изменение количества витков отдельно каждого из излучателей в решетке также не дает желаемого результата. Необходимо учесть, что спиральные структуры смещены из фокуса большого зеркала и смещены симметрично от его оси. Это неизбежно должно сказаться и на распределении создаваемого ими тока на зеркале и, как следствие, – на направленных свойствах антенны в целом. Поэтому можно предположить, что, скорректировав фазовую структуру, создаваемого спиральными антеннами поля вблизи зеркала, можно добиться и симметричного распределения тока на зеркале в обеих плоскостях, и снизить уровень бокового излучения ГЗА при реализации максимального КИП антенны.

Использование дополнительных фазосдвигающих устройств на входах спиральных антенн неизбежно приведет к дополнительным потерям мощности и сокращению рабочей полосы частот, а также может быть причиной снижения КИП антенны. Поэтому более перспективным является решение проблемы за счет пространственного расположения излучателей.

Как уже отмечалось ранее, точка возбуждения каждой из спиральных структур находится не на оси образующего их цилиндра, а на его периметре. Поэтому, в случае, показанном на рисунке 2,а, фаза тока, создаваемого первым и вторым излучателем имеет противоположный знак. Поэтому для коррекции фазовой структуры поля можно использовать как поворот одного или обоих излучателей вокруг своей оси, а также – продольное смещение их вдоль фокальной оси.

В последнем случае задавать смещение следует в связи с соотношениями, определяющими в декартовой системе координат положение спиральной структуры с учетом ее отклонения на углы θ_1 , θ_n и расположения на конформной поверхности малого зеркала. При пересчете в декартовую систему, ось OZ которой параллельна фокальной оси большого зеркала (см. рисунок 1), эти соотношения принимают вид:

$$x' = a \cdot \cos(\alpha - \psi) \cdot \cos(\varphi_1) - a \cdot \sin(\alpha - \psi) \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\varphi_1) +$$

$$+ a \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot (\alpha - \psi) \cdot \sin(\theta_n) \cdot \sin(\varphi_1) + \rho \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\varphi_1),$$

где ρ – модуль радиус вектора, описывающего профиль малого зеркала; ψ – угол смещения точки возбуждения спиральной проволочной структуры (при $\psi = 180^\circ$ точка возбуждения второго излучателя находится на оси OX , как показано на рисунке 2, б, при $\psi = 0^\circ$ – как на рисунке 2, а);

$$\begin{aligned} y' &= a \cdot \sin(\alpha - \psi) \cdot \cos(\theta_n) \cdot \cos(\varphi_1) + a \cdot \cos(\alpha - \psi) \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\varphi_1) + \\ &+ a \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot (\alpha - \psi) \cdot \sin(\theta_n) \cdot \cos(\varphi_1) + \rho \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\varphi_1); \\ z' &= a \cdot \sin(\alpha - \psi) \cdot \sin(\theta_n) + a \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot (\alpha - \psi) \cdot \cos(\theta_n) + \rho \cdot \cos(\theta_1). \end{aligned}$$

Тогда смещение вдоль оси OZ можно задавать равным при $\alpha = 0^\circ$:

$$\Delta z = a \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta_n) + a \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot (\psi) \cdot \cos(\theta_n). \quad (1)$$

На рисунке 3 показано распределение тока на зеркале, полученное в результате поворота излучателей вокруг своих осей из положения на рисунке 2, б на углы $\Delta\psi_1 = 40^\circ$, $\Delta\psi_2 = -70^\circ$ с учетом соотношения (1).

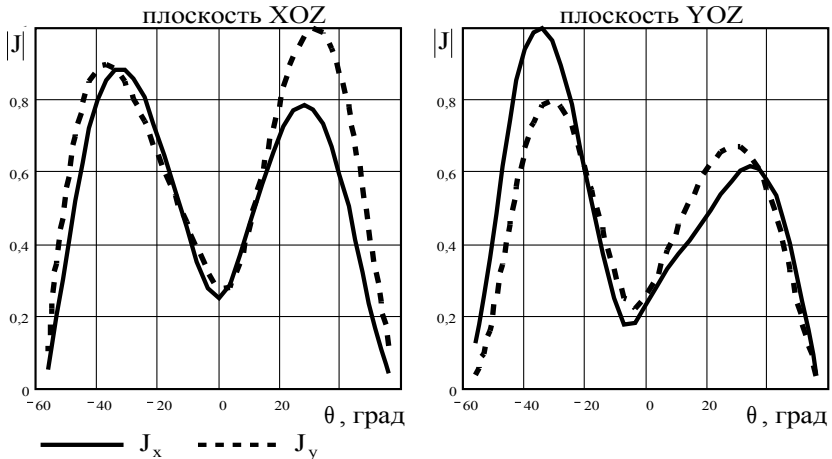


Рисунок 3 – Распределение тока на зеркале:
 $a = 0,006$ м; $n_1 = 3$, $n_2 = 4^\circ$; $\beta_1 = 13^\circ$; $\beta_2 = 19^\circ$; $\theta_{n1} = 180^\circ$; $\theta_{n2} = 180^\circ$,
 $\psi_{1,2} = 180^\circ$; $\Delta\psi_1 = 40^\circ$, $\Delta\psi_2 = -70^\circ$

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации к построению двухэлементной решетки облучателя однозеркальной ГЗА:

- 1) необходимо располагать излучатели симметрично фокальной оси только, как показано на рисунке 2, б, если требуется получить однолепестковую ДН;

- 2) количество витков спиралей не должно превышать $n=5$, желательно использовать излучатели с разными значениями параметра, из которых выделен случай $n_1=3$, $n_2=4$;
- 3) угол подъема витков спиралей выбирается в пределах $\beta=12^\circ\dots22^\circ$ и согласно требуемому условию $\beta_1<\beta_2$ область значений ограничена $\beta_1=12^\circ\dots17^\circ$ и $\beta_2=16^\circ\dots22^\circ$.
- 4) желательно располагать спиральные излучатели параллельно фокальной оси ($\theta_n=180^\circ$) или под углом не менее $\theta_n=175^\circ$, тогда как смещение по поверхности малого зеркала можно задавать равным $\theta_1=170^\circ\dots165^\circ$.
- 5) необходимо задавать смещение вдоль фокальной оси для каждого из излучателей согласно (1);
- 6) необходимо за счет поворота каждого из излучателей вокруг своей оси добиваться предельного выравнивания распределения тока на зеркале, его симметрии, глубины спадов на краях и в центре зеркала.

Соблюдение всех этих условий дает возможность реализовать облучающую систему на основе круговых цилиндрических спиральных антенн, расположенных на конформной поверхности малого зеркала антенны Кассегрена.

На основании сделанных заключений можно перейти к анализу характеристик поля излучения ГЗА.

Библиографический список

1. Лобкова Л.М. Математическая модель поля излучения эллиптических спиральных антенн и оптимизация их параметров / Л.М. Лобкова, М.Б. Проценко, М.В. Ивашина // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 1999. — Т. 42. — № 9. — С. 37–43.
2. Lobkova L.M. Generalized model of radiation field of elliptical helical antennas / L.M. Lobkova, M.B. Prozenko, M.V. Ivashina, V.V. Molchanov // Proc. Int. Symp. on Antenna Theory and Techniques, Davos, Switzerland, 9-14 April 2000 y. — Davos, 2000. — P. 76.

Поступила в редакцию 4.03.2003 г.