

УДК 621.396.677

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА СФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА С КОНИЧЕСКИМ СПИРАЛЬНЫМ ОБЛУЧАТЕЛЕМ

Редин М.И.

*Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина
E-mail: max.redin@gmail.com*

В статье проанализировано распределение поверхностных токов на сферическом зеркале при облучении его конической спиралью. На основании анализа предложено использовать малоэлементную решетку конических спиральных излучателей для улучшения направленности антенны.

Ключевые слова: антенны, конические спиральные антенны, сферическое зеркало.

ВВЕДЕНИЕ

При расчете зеркальных антенн токовым методом одним из промежуточных этапов является расчет распределения плотности тока на рефлекторе антенны. Определение характеристик распределения плотности токов является одной из важнейших задач на стадии разработки зеркальной антенны. В частности, необходимо определить уровень до которого спадают все составляющие тока на краю рабочей зоны, чтобы сделать вывод о том, сколько лучей можно получить на зеркале при использовании определенного облучателя. Необходимо также определить размеры первой зоны Френеля. Затем требуется определить оптимальный уровень продольной и кросс-поляризационной составляющих тока, который позволит сделать вывод об уровне кросс-поляризационного излучения антенны и об уровне бокового излучения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве облучателя целесообразно использовать спиральный облучатель, излучающий поле эллиптической поляризации, близкой к круговой. Применение спирального облучателя, по сравнению с рупорными облучателями, позволяет снизить эффект реакции зеркала, уменьшить затенение, не приводит к появлению паразитной составляющей. При этом следует учитывать, что такой проволочный облучатель круговой поляризации — объёмное тело, не имеющее четкого фазового центра. Взаимное расположение такого облучателя и точки фокуса зеркала рассмотрено в данной работе.

Для минимизации сферической абберации в работах [1, 2] предложено использовать линейно распределённый источник излучения вдоль фокальной оси Z . Этому условию удовлетворяет спиральный облучатель, т.к. имеет размытый центр излучения.

Для получения требуемых характеристик излучения амплитудное распределение плотности токов должно иметь монотонный характер, без всплесков и осцилляций. Фазовое распределение также должно быть монотонно убывающим.

Анализ проводился в плоскостях $\phi=0$ и $\phi=\pi/2$ по следующим формулам [3]:

$$J_{x'} = -H_{z'} \sin \theta' \sin \phi' - H_{y'} \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\text{сф}}}{a}\right) \sin^2 \theta'};$$

$$J_{y'} = H_{x'} \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\text{сф}}}{a}\right) \sin^2 \theta'} + H_{z'} \sin \theta' \cos \phi';$$

$$J_{z'} = -H_{y'} \sin \theta' \cos \phi' + H_{x'} \sin \theta' \sin \phi',$$

где $J_{x'}$, $J_{y'}$, $J_{z'}$ — проекции плотности тока на координатные оси OX' , OY' , OZ' соответственно,

$H_{x'}$, $H_{y'}$, $H_{z'}$ — проекции магнитной составляющей поля облучателя,

$c_{\text{сф}}$ — радиус-вектор сферической поверхности из точки фокуса,

θ' , ϕ' — углы в сферической системе координат.

На рис. 1 схематически изображена сферическая зеркальная антенна 1 и коническая спираль (КС) 2, расположенная точкой питания 3 на поверхности 6, отстоящей от фокальной поверхности 5 на расстояние Δ , т.е. радиуса $\frac{\bar{R}}{2} + \Delta$ [4, 5].

Здесь же введена сферическая система координат для точек на поверхности зеркала, необходимая для дальнейшего анализа. При этом фокальное направление на центр зеркала будет соответствовать $\theta=180^\circ$, а верхний край зеркала $\theta=90^\circ$, нижний край $\theta=270^\circ$. При анализе распределения J_x , J_y , J_z основное внимание было обращено на составляющие J_x , J_y , при этом была выделена первая зона Френеля, а также рассмотрены боковые распределения вне зоны Френеля.

Исследование распределения плотности тока на поверхности сферического зеркала с радиусом $R_{\text{сф}}=1,05$ м проводилось на фиксированной частоте 4 ГГц для однозаходной конической спирали, расположенной меньшим, основанием к экрану.

Для установления пределов сканирования α сферической антенны с облучателем в виде КС и влияния смещения облучателя вдоль фокальной оси Δ (см. рис. 1) будем поочередно менять указанные параметры, получая в каждом случае зависимости амплитуд и фаз токов по сферической поверхности.

Воспользуемся в качестве облучателя однозаходной КС 2 (см. рис. 1) над экраном 4, ориентированную своей осью по радиусу \bar{R} зеркала 1, оптимизированной ранее [6], со следующими геометрическими параметрами:

полный угол при вершине конуса $\Theta_0=16^\circ$, начальный радиус спирали $r_0=9.5$ мм, количество витков 4, шаг спирали по образующей $d=15$ мм.

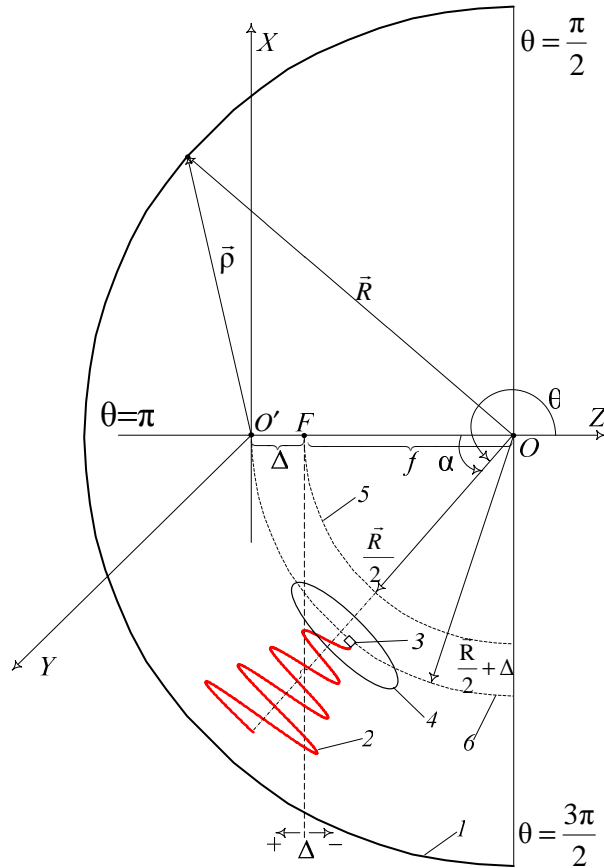


Рис. 1. Общий случай взаимного расположения сферического зеркала и конического спирального облучателя

Данная однозаходная КС имеет следующие параметры поля излучения: $\Delta E_{\theta 0,7}=70^\circ$; $\Delta E_{\phi 0,7}=80^\circ$; $\Delta E_{\theta 0,1}=135^\circ$; $\Delta E_{\phi 0,1}=160^\circ$, как видно, КС — слабонаправленная антенна.

Проведем анализ распределения J_x, J_y , учитывая то обстоятельство, что J_z не влияет на главную область Френеля, а её влияние проявится только при формировании боковых лепестков ДН сферической антенны.

1. Начнём рассмотрение случая, когда КС расположена осесимметрично без смещения Δ вдоль оси Z ($\Delta=0$). На рис. 1 приведено распределение плотности токов в случае облучения зеркала однозаходным коническим спиральным излучателем для осесимметричного $\alpha=0$ ($\theta=180^\circ$) несмещённого $\Delta=0$ положения.

Сразу привлекает внимание тот факт, что $|J_y|$ в плоскости XOZ ($\varphi=0$) имеет высокий уровень амплитуды тока на краях ($\theta=90^\circ$ и 270°) и не имеет «провала» (см. рис. 2, а). По таким токовым распределениям можно определить только зону Френеля для $|J_x|$ на уровне -30 дБ, равную $\approx 100^\circ$ в плоскости XOZ . Для $|J_y|$ определение размеров зоны Френеля затруднено. В плоскости YOZ угловые размеры первой зоны Френеля для $|J_y|$ те же, что указаны для $|J_x|$ в плоскости XOZ . Как следует из рис. 2 на краях зеркала наблюдается высокий уровень облучения, наводящего тока до уровня -12 дБ, относительно осевого направления ($\theta=180^\circ$). Такое токовое распределение вызвано облучением поля КС с широкой диаграммой направленности, превышающей угловые размеры эффективно облучаемой площадки на поверхности зеркальной антенны, оцененной в [7].

Кроме того, очевидно, что облучение части зеркала, которая уже не аппроксимируется параболой, будет приводить к негативным последствиям, т.е. фазовым ошибкам больших $\pi/2$, появлению бокового излучения.

2. Рассмотрим смещение облучателя вдоль фокальной оси. Как следует из рассчитанных зависимостей, смещение облучателя вдоль оси Z заметного влияния на распределение относительных амплитуд тока не оказывает. Так, например, при сравнении распределения плотности токов при $\Delta=\pm 0,5\lambda$ наблюдаем только уменьшение (в первом случае) уровня тока на краю на 1 дБ для $|J_x|$ в плоскости XOZ по направлениям 110° и 250° и, соответственно, в плоскости YOZ такое же изменение для $|J_y|$. Похожее изменения можно заметить и для $|J_z|$: в обеих плоскостях для указанных смещений на краях зеркала ($\theta=90^\circ$ и 270°) наблюдаем различный уровень составляющей $|J_z|$. Важно отметить, что смещение не вносит дополнительных изменений в разность фаз между составляющими $|J_x|$, $|J_y|$ в пределах сектора углов $160^\circ \div 200^\circ$, отражённое от зеркала поле имеет практически круговую поляризацию (рис. 2, б).

Рассмотрим распределение относительных фаз поверхностных токов зеркала. При переходе из плоскости XOZ в YOZ отмечается изменение фазы в точке, относительно которой происходит скачок на π в центральном ($\theta=180^\circ$) направлении. А фазовые распределения для $|J_x|$ и $|J_y|$ в ортогональных плоскостях неизменны. Так, в плоскости XOZ для $|J_z|$ в точке перескока ($\theta=180^\circ$) отмечаем фазу $\Phi=360^\circ$, а в YOZ в этой же точке — фазу $\Phi=-270^\circ$. При небольшом смещении $\Delta \approx \lambda$ облучателя вдоль фокальной оси изменений в распределении фаз не наблюдается. Это говорит о невнесении фазовых ошибок небольшим смещением $\Delta < \lambda$ облучателя.

При дальнейшем выносе облучателя из точки парафаксиального фокуса в сторону зеркала $\Delta > \lambda$ наблюдаем сужение первой зоны Френеля со 104° ($\Delta=0$) до 74° ($\Delta=2\lambda$) по уровню -36 дБ. В амплитудном распределении в данном случае происходит сужение главного лепестка для $|J_x|$ в плоскости XOZ , а для $|J_y|$ — уменьшение уровня на краях зеркала до -22 дБ. Аналогичная ситуация складывается в плоскости YOZ .

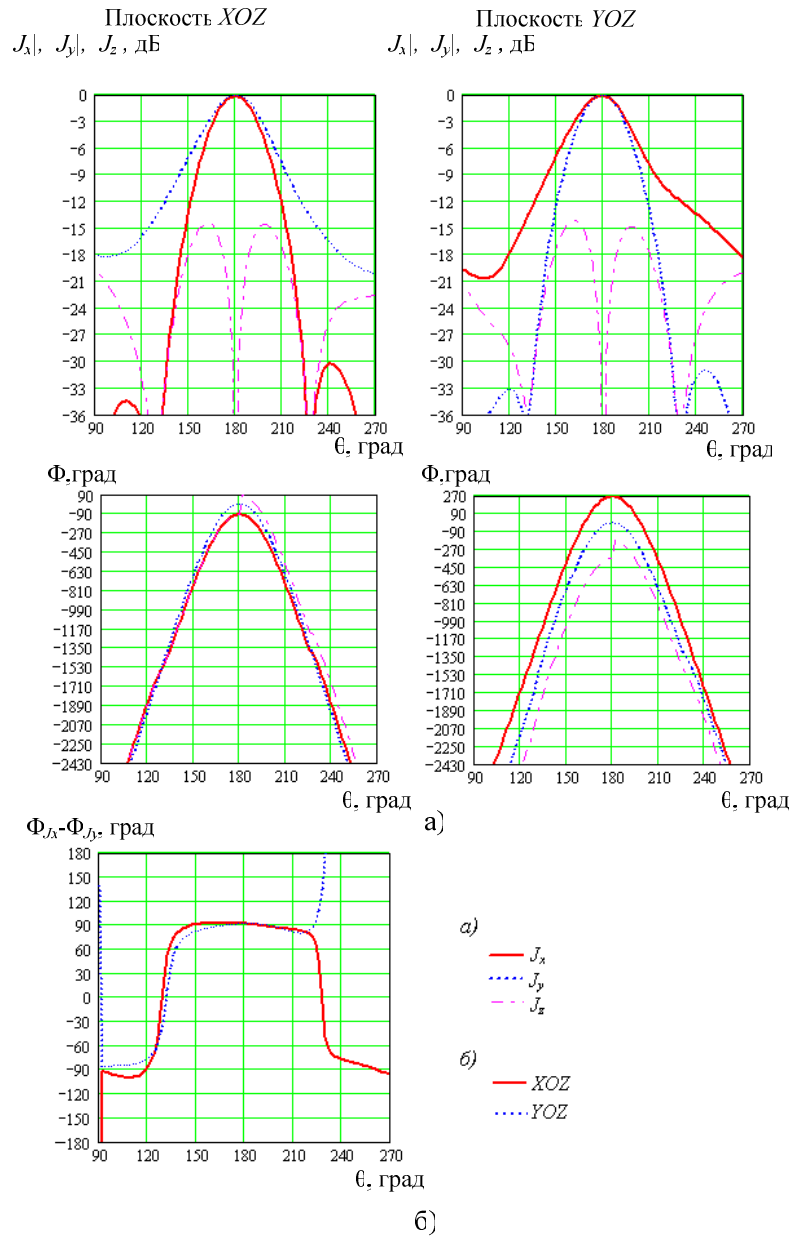


Рис. 2. Распределение плотности токов зеркала с однозаходным коническим спиральным облучателем $\alpha=0$, $\Delta=0$: а) амплитуд и фаз в плоскостях XOZ , YOZ ; б) разности фаз между $|J_x|$, $|J_y|$ в ортогональных плоскостях

Так, для $|J_x|$ в плоскости $\varphi=0$ при $\Delta=0$ размеры зоны Френеля 104° , при $\Delta=0,75\lambda$ размеры зоны Френеля 90° , при $\Delta=-0,75\lambda$ размеры зоны Френеля 104° .

Итак, при смещении КС вдоль фокальной оси в пределах $\Delta=0\div 0,75\lambda$ не наблюдается сильного сужения первой зоны Френеля, что и не приводит к заметному уменьшению угловых размеров эффективно облучаемой площадки, а значит, сохраняются фокусирующие свойства.

3. Исследование распределения плотности поверхностных токов для асимметричного расположения облучателя проводилось с целью выяснения возможных пределов сканирования сферической антенны с облучателем в виде диапазонной КС. При этом учитывался тот факт, что при смещении луча антенны также смещается и эффективно облучаемая площадка на тот же угол. Поэтому пределы сканирования ограничиваются угловыми размерами эффективно облучаемой площадки, смещаемой до края рефлектора.

При отклонении облучателя на угол $\alpha=45^\circ$ ($\theta=135^\circ$) от центральноосевого положения в плоскости $\varphi=0$ (см. рис. 1) в амплитудном распределении произошло смещение максимумов токов $|J_x|$ и $|J_y|$, а у составляющей $|J_z|$ резко возрос один лепесток характеристики, ближайший к максимуму излучения, до уровня, сопоставимого с $|J_x|$, оставшийся достиг уровня -17 дБ, что превышает на 5 дБ при осесимметричном расположении в соответствующей плоскости. Это может означать и возрастание уровня бокового излучения в диаграмме направленности зеркальной антенны.

Смещение максимума тока $|J_x|$ повлекло за собой и смещение зоны Френеля. Кроме того, глубина динамического диапазона для оценки угловых размеров зоны Френеля уменьшилась и составляет -33 дБ. При этом размеры первой зоны Френеля составляют $\approx 85^\circ$, т.е. произошло её сужение. Сканирование облучателя повлияло и на рост бокового лепестка $|J_x|$, отстоящего на 60° от основного максимума и имеющего уровень -30 дБ при $\Delta=0$, $\alpha=0$.

Отклонение максимума тока на 45° от положения $\alpha=0$ вызвало расширение бокового лепестка $|J_x|$ до 90° и его роста до уровня -24 дБ.

Для проекции $|J_y|$ также произошло смещение максимума на угол сканирования. Но по отношению к $|J_x|$ её уровень в точке максимума тока возрос на 3 дБ. За смещением максимума $|J_y|$ последовало и смещение минимума тока по уровню -20 дБ на угол сканирования так, что форма распределения $|J_y|$ не искажилась, за исключением подъёма уровня амплитуд тока на краях рефлектора до -12 дБ на ближайшей стороне (против -18 дБ при $\Delta=0$, $\alpha=0$) и -17 дБ на дальнем крае (против -20 дБ при $\Delta=0$, $\alpha=0$).

Аналогичные изменения уровня амплитуд токов на краях сферы претерпела и составляющая $|J_z|$. Так, при отклонённом облучателе этот уровень составил -17 дБ по сравнению с -22 дБ, когда $\Delta=0$, $\alpha=0$. Однако следует отметить, что по направлению $\theta=180^\circ$ (ось зеркала) наблюдается всё тот же «провал» $|J_z|$ с той лишь разницей, что его ширина увеличилась до 20° по уровню -36 дБ.

Совершенно другой характер распределения токов наблюдаем в плоскости $\varphi=90^\circ$ (YOZ). Так, составляющая поверхностного тока $|J_x|$ приобрела «провал» по центральному направлению $\theta=180^\circ$ до -18 дБ и, в целом, повторяет характер $|J_z|$.

Амплитуда распределение проекции $|J_z|$ имеет «провал» в осевом направлении глубиной больше наблюдаемых -36 дБ и, как и $|J_x|$, имеет тот же уровень токов на краях сферы ($\theta=90^\circ$, $\theta=270^\circ$) -6 дБ ($\theta=90^\circ$) и -9 дБ ($\theta=270^\circ$).

Проекция $|J_y|$ в $\varphi=90^\circ$ имеет характер распределения внешне напоминающий в $\varphi=0$, с той лишь разницей, что при приближении к краям рефлектора уровень токов $|J_y|$ резко падает до наблюдаемых границ -36 дБ.

В фазовых распределениях в $\varphi=0$ наблюдаем смещение всей фазовой картины на угол сканирования $\alpha=45^\circ$ ($\theta=135^\circ$). Тем не менее, по осевому направлению $\theta=180^\circ$ остаётся скачок фазы для $|J_z|$.

Для составляющих J_x , J_y в направлении сканирования наблюдаем разницу фаз $\Phi \approx \pi/2$. А при той небольшой разнице амплитуд (3 дБ), можно судить о наличии поляризации, близкой к круговой. В плоскости XOZ разность фаз между J_x , J_y по направлению угла сканирования $\alpha=45^\circ$ составляет 90° , что опять же свидетельствует о наличии круговой поляризации в отражённом от зеркала поле.

В результате можно сделать вывод о том, что у сферической зеркальной антенны при облучении её КС наблюдаются различные амплитудные распределения токов в ортогональных плоскостях ($\varphi=0$, $\varphi=90^\circ$). Это вызвано отличием в поле излучения КС в исследуемых плоскостях.

В целом можно заявить, что незначительное смещение облучателя в сторону зеркала на $\Delta=0,75\lambda$ даёт положительные результаты в распределении токов, которые, в свою очередь, скажутся и на ДН поля всей антенной системы.

Таким образом, отсюда следует вывод о необходимости использовать облучатель с более узкой ДН, укладываемой в размеры участка, хорошо аппроксимируемого параболой.

Как выяснено, особенностью облучения однозаходной КС как облучателя сферической антенны является для J_x широкая зона Френеля, которая превышает размеры эффективно облучаемой площадки, оцененной в [107] и приблизительно равной 50° с угла зрения в центре сферы. Приближение КС-облучателя к зеркалу приводит к уменьшению размеров первой зоны Френеля, но, в тоже время, значительное удаление от точки параксиального фокуса повлечёт за собой значительную расфокусировку всей антенны. Поэтому необходимо использовать облучатель с более узкой ДН, создающей на зеркале меньшую по размерам зону Френеля, не вынося для этого его из точки параксиального фокуса.

Условию сужения диаграммы направленности (ДН) облучателя при сохранении заданных частотных и поляризационных свойств удовлетворяет 4-х элементная синфазная антенная решётка, выполненная из однозаходных КС над экраном. Так, ширина диаграммы направленности для такой решётки по уровню 0,707 составляет $\Delta E_{\theta 0,7} = 47^\circ$; $\Delta E_{\varphi 0,7} = 52^\circ$. В такой решётке все 4 элемента по геометрическим параметрам идентичны рассмотренному однозаходному КС-излучателю, разнесены на $\lambda/2$ между собой, образуют квадрат и синфазно возбуждены.

Смещая облучатель к зеркалу, мы тем самым увеличиваем угловые размеры облучаемой части зеркала и, следовательно, эффективно облучаемой площадки относительно точки наблюдения, связанной с облучателем, вынесенным из точки

параксиального фокуса. В данной ситуации это приведёт к увеличению доли энергии, перехваченной эффективно облучаемой площадкой, и меньшему облучению участков зеркала, где наблюдается значительное отличие сферического профиля от параболического. А это, в результате, позитивно повлияет на фокусирование энергии антенной и улучшит направленные свойства. К обратным результатам приведёт смещение КС от зеркала вдоль радиуса. При этом остаются в силе все вышеизложенные рассуждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённого анализа отмечено следующее:

1. Для заданной геометрии однозаходного конического спирального облучателя проведён анализ распределения поверхностной плотности тока сферической антенны при осесимметричном расположении. Определены угловые размеры первой зоны Френеля. Показана проблема использования однозаходной КС в качестве облучателя для сферической антенны ввиду его широкой ДН. Используя распределения плотности токов можно уже на этом этапе судить о характеристиках излучения сферической антенны, не проводя сложных вычислений.

2. Для улучшения картины поверхностных электрических токов при асимметричном расположении одиночного спирального облучателя предложено сместить облучатель вдоль фокальной оси к зеркалу на $\Delta=0,75\lambda$. Оценено влияние такого смещения на картину токов на поверхности, угловые размеры зоны Френеля.

3. Предложено использовать антенную решётку из 4 идентичных излучателей в качестве облучающей системы, позволяющую формировать поле излучения сферической антенны высокой направленности, с низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности.

4. Рекомендовано смещать облучающую систему радиально на величину $\Delta=+0,75\lambda$, как при выполнении сканирования, так и в режиме работы на центральном луче ДН.

Список литературы

1. Ballanis C.A. Antenna Theory. Analysis and design.— New York — Chichester — Brisbane — Toronto — Singapore: John Wiley & SONS inc., 1997.— 940 p.
2. Spencer R.C., Sletten C.J., Walsh J.E. Correction of Spherical Aberration by a Phazed Line Source // Proceedings National Electronics Conference.— 1949.— Vol. 5, P. 320—333.
3. Лобкова Л.М., Редин М.И., Тышук Ю.Н. Поляризация структура поля излучения сферической антенны при осесимметричном расположении облучателя // Вестник СевГТУ: Информатика, электроника, связь: Сборник научных трудов. — Севастополь: Севастоп. гос. тех. ун-т.— 2005. — Вып. 68. — С. 96—102.
4. Redin M.I., Tywuk Yu. N., Nesteruk S. Radiation Pattern Control of Spherical Antenna // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 18—22 September 2006: Proceedings of Third international Conference.— Kharkov: KNURE, 2006.— P. 172—173.
5. Редин М.И. Управление диаграммой направленности сферической антенны за счет смещения облучателя // Сб. наук. пр. СВМІ ім. П.С. Нахімова. — Севастополь. — 2006. — Вып. 1 (9). — С.

- 173—176.
6. Проценко М.Б., Лукьянчиков А.В., Комаров П.А., Редин М.И. Оптимизация геометрических параметров конических спиральных антенн по критерию требуемой ДН // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Мат. 12-й междунар. крымской конф., 9—13 сент. 2002. — Севастополь: Вебер. — 2002. — Т.1. — С. 349 — 350.
 7. Лобкова Л.М., Редин М.И., Троицкий А.В. Анализ характеристик излучения двухлучевой сферической зеркальной антенны // Электроника и связь. — 2005. — № 27. — С. 84—89.

M.I. Redin **Аналіз розподілу щільності струму сферичного дзеркала з конічним спіральним випромінювачем.** // Учені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. — 2007. — Серія «Фізика». - Т. 20 (59). - № 1. - С. 119 – 127.

У статті проаналізовано розподіл поверхневих струмів на сферичному дзеркалі при опроміненні його конічною спіраллю. На підставі аналізу запропоновано використати малоелементну решітку конічних спіральних випромінювачів для поліпшення спрямованості антени.

Ключові слова: антена, конічна спіральна антена, сферичне дзеркало.

M.I. Redin **The analysis of spherical reflector current distribution with conical spiral radiator. dynamics** // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. — 2007. — Series «Fizika». — V. 20 (59). - № 1. — P. 119 – 127.

In this article the surface current distribution on spherical reflector with conical irradiator is analyzed. Based on this particular analysis to use antenna array with little quantity of conical spiral elements is proposed in order to get better antenna gain.

Keywords: antenna, conical spiral antenna, helical antenna, spherical antenna.

Поступила в редакцію 25.01.2007 г.