

УДК 621.396.677

А.В. Троицкий, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: alex_troitsky@land.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОГО ОБЛУЧАТЕЛЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Исследованы причины, снижающие коэффициент эллиптичности цилиндрических спиральных облучателей. Предложен способ коррекции распределения тока на конечном участке спирали и приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований оптимизированной конструкции облучателя.

Антенные устройства являются одной из важнейших частей современных спутниковых телекоммуникационных систем. В СВЧ диапазоне, как правило, они выполняются в виде зеркальных антенн на основе параболического зеркала. Эта схема построения позволяет получить остронаправленную диаграмму направленности и отличается простой конструкцией. Полоса рабочих частот такой антенны ограничивается только облучателем.

Перспективы дальнейшего развития спутниковых телекоммуникационных систем связаны с освоением низких и средних круговых орбит. В таких системах спутники связи постоянно перемещаются относительно корреспондента, поэтому для организации бесперебойной связи антенная система должна обеспечивать сопровождение как минимум двух спутников: восходящего и заходящего, и коммутацию канала связи. Для этого необходимы антенны с широкоугольным сканированием нескольких лучей.

Применение антенн с параболическим профилем в данном случае малоэффективно: свойства параболы как фокусирующего элемента не допускают широкоугольного сканирования. Обычно используемые для сканирования гибридные антенны на основе параболического зеркала и его модификаций имеют сектор сканирования порядка $10...15^\circ$. Для его расширения создаваемое облучателем на зеркале амплитудно-фазовое распределение тока корректируется в зависимости от угла сканирования, что существенно усложняет схему формирования луча. Как следствие, полоса рабочих частот таких антенн не превосходит 3 %, КПД не превышает 50 %. Поэтому обычно используются несколько полноповоротных параболических антенн, каждая из них снабжается собственной системой сканирования. При этом для обеспечения электромагнитной совместимости антенны разносятся на расстояние порядка 5 метров. Как следствие, вся установка получается дорогой, громоздкой и малоэффективной.

В связи с этим, большой интерес представляет использование сферического зеркала для целей широкоугольного сканирования [1]. Благодаря

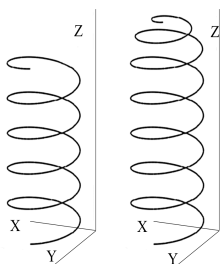
симметрии относительно центра, сферические зеркала позволяют осуществлять сканирование в широком секторе углов без искажения диаграммы направленности простым перемещением облучателя по концентрической кривой. Определенным недостатком сферического зеркала является свойственная ему сферическая аберрация, однако она может быть устранена путем коррекции амплитудно-фазового распределения тока на зеркале. Поскольку необходимая коррекция не зависит от угла отклонения луча, она может быть выполнена с помощью корректирующего зеркала либо специального линейного источника, в частности, спирального облучателя, при этом схема формирования луча остается предельно простой.

Облучающая система на основе спиральных излучателей отличается малыми поперечными размерами, широкополосностью, шириной главного лепестка диаграммы направленности по уровню -10 дБ от 40° до 150° и более с требуемой поляризацией излучения: круговой, линейной или управляемой. При использовании антенной решетки из спиралей оптимизация взаимного расположения точек питания излучателей позволяет улучшить развязку между лучами.

Наиболее простым и распространенным типом спиральных облучателей является однозаходная цилиндрическая спираль над экраном, показанная на рисунке 1, *a* (экран расположен в плоскости XOY и на рисунке не показан). При малом числе витков (2...8) затруднительно реализовать облучатель с коэффициентом эллиптичности выше 0,9, что необходимо для антенн круговой поляризации, а использование многозаходных спиралей заметно усложняет схему возбуждения. Как правило, схема фазировки заходов имеет значительно более узкую полосу рабочих частот по сравнению со спиральной антенной, чем обесценивает такое важное качество спиральных антенн, как широкополосность.

Поэтому задача повышения коэффициента эллиптичности однозаходных цилиндрических спиральных облучателей путем оптимизации геометрических параметров является актуальной. В данной статье представлены результаты исследований влияния геометрических параметров спирали на коэффициент эллиптичности цилиндрических спиральных антенн, и проведена оптимизация конструкции облучателя по величине коэффициента эллиптичности.

Приближенная теория спиральных антенн приводится в работе [2]. Авторы работы установили, что в однозаходной бесконечной цилиндрической спиральной антенне в режиме осевого излучения преобладает волна T_1 . Ими также было установлено, что волна T_1 может существовать в однозаходной бесконечной цилиндрической спирали, если периметр витка составляет $0,7...1,35$ длины волны. Вместе с тем, в связи со сложностью аналитического решения задачи, авторы были вынуждены сделать ряд допущений. В частности, предполагается, что в спирали отсутствует отражение волн тока от конца проводника.



а)

б)

Рисунок 1 – Спиральные облучатели

В данной работе распределение тока рассчитывалось обобщенным методом наводимых ЭДС [3], который ориентирован на численные методы решения. Это позволило исключить ряд допущений, сделанных в работе [1]. В результате было установлено, что в цилиндрической спирали, показанной на рисунке 1, а, действительно устанавливается распределение тока, близкое к бегущей волне. Однако из-за отражения волны тока от конца проводника, на конечном участке спирали распределение тока имеет вид, показанный на рисунке 2 жирной линией (по горизонтали – расстояние от точки возбуждения в метрах, по вертикали вверх – амплитуда в миллиамперах, внизу – фаза в градусах относительно точки возбуждения на частоте $f=3000$ МГц, штриховой линией показан фазовый набег вдоль выпрямленного проводника спирали в свободном пространстве, облучатель – цилиндрическая равношаговая спираль с углом намотки $\beta=12,5^\circ$, периметром $k_a=1$ и числом витков $n=6$). Как видно из рисунка 2, бегущая волна на конечном участке проводника трансформируется в стоячую, что приводит к ухудшению поляризационной чистоты поля излучения.

При изменении геометрической длины спирали интерференция двух

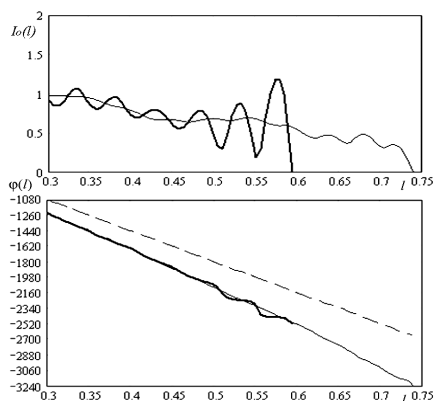


Рисунок 2 – Распределение тока на конечном участке проводника спиральных облучателей: вверх – амплитудное, внизу – фазовое

бегущих волн (падающей и отраженной от конца спирали) приводит к периодическим изменениям коэффициента эллиптичности. Так как все процессы и закономерности, имеющие отношение к распространению электромагнитных волн, связаны с электрической длиной спирали, которая зависит как от длины спирали, так и от частоты, то частотная зависимость коэффициента эллиптичности будет иметь аналогичный характер.

На рисунке 3 штриховой линией показаны результаты теоретического расчета зависимости коэффициента эллиптичности от числа витков для цилиндрического спирального излучателя с использованием соотношений, полученных в [4], полузакрашенными маркерами – результаты эксперимента. Небольшое расхождение результатов расчета и эксперимента вызвано неполным соответствием теоретической модели и макета (конечная проводимость проводника, наличие диэлектрического каркаса и т.д.) и погрешностями измерений, при этом с вероятностью 98 % можно говорить о том, что экспериментальная и теоретическая зависимости совпадают.

Как видно из рисунка 3, полученная зависимость имеет периодический характер с четкими экстремумами, в то время как полученные авторами [2] соотношения для бесконечной спирали предполагают плавный рост коэффициента эллиптичности пропорционально количеству витков. Проведенная по коэффициенту эллиптичности косвенная оценка характера

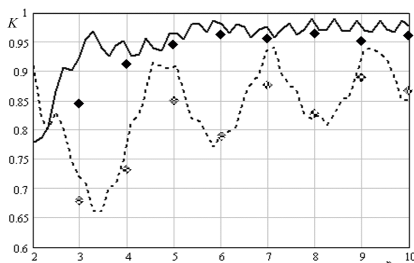


Рисунок 3 – Коэффициент эллиптичности спиральных облучателей

распределения тока показывает, что в конечной спирали существует заметное по величине отражение тока от конца спирали, что согласуется с результатами расчета, выполненного обобщенным методом наводимых ЭДС (см. рисунок 2). На этом основан важный в практическом отношении вывод: в цилиндрической спирали конечной длины возможно повысить коэффициент эллиптичности без увеличения количества заходов, путем оптимизации геометрических параметров спирали. Поскольку амплитуда отраженной волны зависит не только от коэффициента отражения, но и от амплитуды падающей волны, то для повышения коэффициента эллиптичности можно уменьшить амплитуду падающей волны на конечном участке проводника. В результате проведенной методом полного перебора оптимизации наибольшее подавление отраженной волны получено при дополнении цилиндрической части спирали участком, расположенным на полусфере такого же радиуса, сопряженной с цилиндром. При этом диаметр спирали постепенно уменьшается до $1/3$ диаметра цилиндра. В этой части излучателя волна T_1 , которая распространяется в цилиндрической спирали, испытывает сильное затухание, и амплитуда тока плавно спадает к концу проводника.

На рисунке 1,б показана оптимизированная спираль. Цилиндрическая часть содержит равношаговую намотку с углом подъема $12,5^\circ$, на сопряженной полусфере расположено 2 витка равноугольной намотки. Использо-

вана только та часть полусферы, диаметр которой больше $1/3$ диаметра цилиндра. Как видно из рисунка 2 (тонкая линия), в такой структуре распределение тока практически не отличается от бегущей волны, при этом амплитуда тока плавно спадает до нуля на конечном участке спирали. Фазовое распределение практически линейное, на конечном участке спирали отсутствуют скачки фазы на 180° , характерные для стоячей волны.

Зависимость коэффициента эллиптичности оптимизированной спирали от числа витков цилиндрической части показана на рисунке 3 (теоретически рассчитанная зависимость – сплошной линией, закрашенными маркерами – эксперимент). В результате оптимизации параметров излучателя, показанного на рисунке 1,б, удалось повысить коэффициент эллиптичности до значения порядка 0,95, характерного для многозаходных спиралей. При этом исследуемая зависимость имеет монотонный характер, что согласуется с выводами работы [1]. Примененный метод подавления отраженной волны эффективен во всей области пространственного резонанса волны T_1 , поэтому полоса рабочих частот такой антенны ограничена уже не областью с высоким коэффициентом эллиптичности, которая практически совпадает с границами режима осевого излучения, а только частотными свойствами входного сопротивления. Предметом дальнейших исследований может быть разработка эффективных методов согласования оптимизированной спиральной антенны с питающим коаксиальным кабелем в полосе частот пространственного резонанса поверхностной волны T_1 .

Библиографический список

1. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот /А.З. Фрадин. — М.: Сов. радио, 1957.— 648 с.
2. Кляцкин И.Г. Основы теории линейных антенн./И.Г. Кляцкин. – Л.:Изд-во ЛЭТИ, 1966.— 64с.
3. Юрцев О.А. Спиральные антенны/ О.А. Юрцев, А.В. Рунов, А.Н. Казарин. — М.: Сов. радио, 1974. — 224 с.
4. Лобкова Л.М. Моделирование поля излучения в ближней зоне конформной антенной решетки/ Л.М. Лобкова, М.И. Редин, А.В. Троицкий // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2004. — Вып.60. — С. 100 – 105.

Поступила в редакцию 28.02.2006 г