

УДК 621.658.012.531

Л.М. Лобкова, профессор, д-р техн. наук,

А.В. Лукьянчиков, канд. техн. наук,

М.Ю. Гаврик

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Получена взаимосвязь между основными геометрическими параметрами логопериодической антенны и ее режимами излучения.

Разработка антенн дециметрового диапазона на основе логопериодических структур является одним из наиболее перспективных направлений в антенной технике. Подобные структуры позволяют сформировать высокую направленность излучения в широкой полосе частот [2], а также обладают рядом других достоинств. Одним из перспективных видов логопериодических антенн является сплошная клинообразная логопериодическая антенна.

Проектирование сплошных логопериодических антенн часто ведется путем экспериментального моделирования [1], что не позволяет предсказать и оценить характер изменения направленных свойств и поляризационной структуры поля излучения таких антенн, их входного сопротивления. Поэтому при проектировании логопериодических антенн возникают трудности, обусловленные отсутствием достаточно полных аналитических результатов исследования логопериодических структур, позволяющих обоснованно выбрать их геометрические параметры и провести оптимизацию характеристик излучения по различным критериям. Поэтому целью данной работы является теоретическое исследование характеристик излучения логопериодической антенны, а также выявление взаимосвязи между основными геометрическими параметрами антенны и ее режимами излучения.

Сплошная логопериодическая антенна представляет собой набор щелевых и вибраторных излучателей увеличивающихся размеров. Для моделирования сплошную логопериодическую антенну проще представить в виде проволочной структуры, где область заполнения состоит из соответствующих трапеций (рисунок 1).

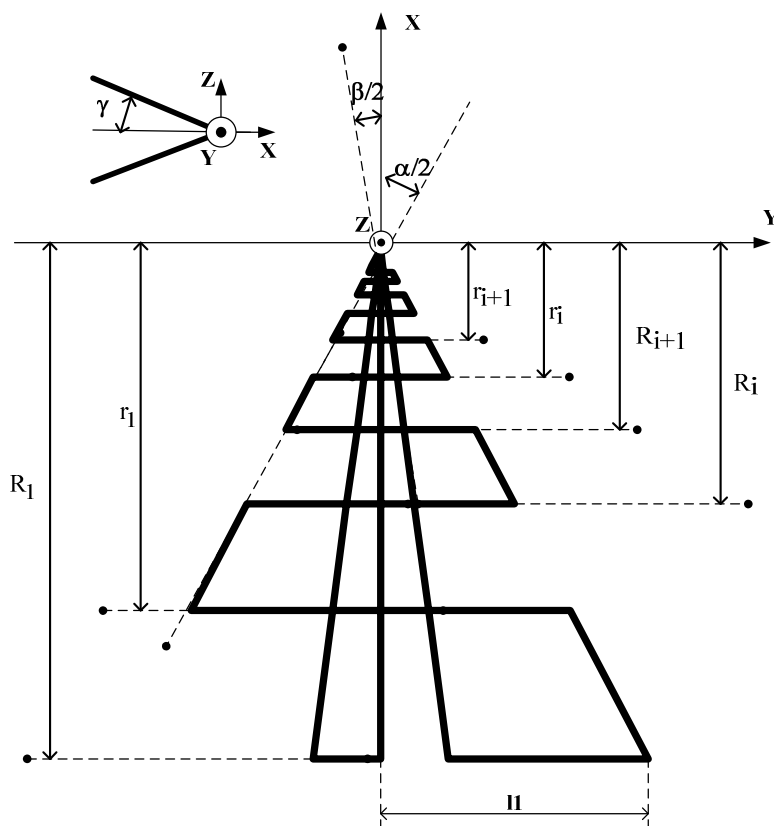


Рисунок 1 — Плоская логопериодическая антенна

Размеры излучающих элементов логопериодических антенн пропорциональны их расстоянию от центра (от точки возбуждения). Поэтому основными параметрами плоской логопериодической структуры

являются следующие углы: α — угол при вершине излучателя и β — угловая ширина, γ — половинный угол раскрыва, отношение τ расстояний от центра, до одноименных краев выступов и отношение σ расстояний до внутреннего и внешнего края одного выступа:

$$\tau = \frac{R_{i+1}}{R_i} = \frac{r_{i+1}}{r_i}; \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{r_i}{R_i}. \quad (2)$$

где $\sigma = \sqrt{\tau}$.

Величина τ может лежать в пределах от 0,5 до 0,9.

Питание плоской логопериодической структуры может быть осуществлено с помощью коаксиального кабеля. Для этого необходимо использовать трансформирующее устройство, так как входное сопротивление антенны велико (~190 Ом).

Математическое моделирование проводилось в частотном диапазоне 1700 ... 2500 МГц с шагом равным 100 МГц. Число элементов n , было выбрано равным 10. При теоретическом исследовании варьировались следующие параметры: угловая ширина $\beta = 0...40^\circ$ с шагом равным 10, угол огибающей плеч антенны $\alpha = 50...90^\circ$ с шагом равным 10 и половинный угол раскрыва антенны $\gamma = 5...10^\circ$ с шагом равным 5.

При заданном угле α существуют некоторые пределы приемлемых значений параметра τ . Максимальные значения τ ограничены примерно 0,8 — 0,9 из-за конструктивных соображений, а также из-за снижения допустимой мощности при $\tau \approx 1$. Минимальные значения τ определяются тем, что при малых τ значительно увеличивается неравномерность диаграммы направленности (ДН). При увеличении τ , начиная с минимально допустимого значения, ширина ДН уменьшается, в особенности заметно в H -плоскости. Объясняется это тем, что с увеличением τ в активную область попадает большее число излучателей.

При моделировании принималось, что α и β в сумме должны составлять 90 град., т.е. $\alpha + \beta = 90^\circ$. При этом соблюдалось условие $\alpha > \beta$, так как внутренний угол не может быть больше внешнего. С учетом выше сказанного проведено теоретическое моделирование, в котором были рассмотрены следующие варианты значения углов:

- 1) $\alpha + \beta = 0 + 90 = 90^\circ$ при $\gamma = 5...40^\circ$;
- 2) $\alpha + \beta = 10 + 80 = 90^\circ$ при $\gamma = 5...40^\circ$;
- 3) $\alpha + \beta = 20 + 70 = 90^\circ$ при $\gamma = 5...40^\circ$;
- 4) $\alpha + \beta = 30 + 60 = 90^\circ$ при $\gamma = 5...40^\circ$;
- 5) $\alpha + \beta = 40 + 50 = 90^\circ$ при $\gamma = 5...40^\circ$.

Входное сопротивление исследуемой антенны в рабочем диапазоне меняется периодически. На круговой диаграмме полных сопротивлений изменение входного сопротивления представляется окружностью, центр которой соответствует волновому сопротивлению структуры ρ_l . Таким образом, входное сопротивление все время остается почти чисто активным, но его величина несколько колеблется вокруг волнового сопротивления. Последнее зависит от параметров структуры: уменьшение α ведет к росту ρ_l , а уменьшение γ — к его падению. Близость входного сопротивления к чисто активному нарушается при малых углах γ ; здесь, видимо, появляется дополнительная реактивность за счет связи между полотнами антенны, что проявляется в увеличении КСВ в питающей линии с волновым сопротивлением, равным ρ_l , при уменьшении γ ; резкое увеличение КСВ наблюдается, как правило, при $\gamma \rightarrow 0$. Практически интересны антенны с углами γ , лежащими в пределах примерно от 15 до 90°, для которых КСВ, как правило, не превышает двух.

Для расчета характеристик излучения антенн использовался метод векторного потенциала [3] с предварительно заданным амплитудно-фазовым распределением тока. Для случаев 3 — 5 и половинным углом раскрыва $\gamma = 5...15^\circ$, при моделировании во всем диапазоне частот от 1700 до 2500 МГц наблюдается режим излучения в прямом так и обратном направлении при горизонтальной поляризации (рисунок 3)(режим восьмерки).

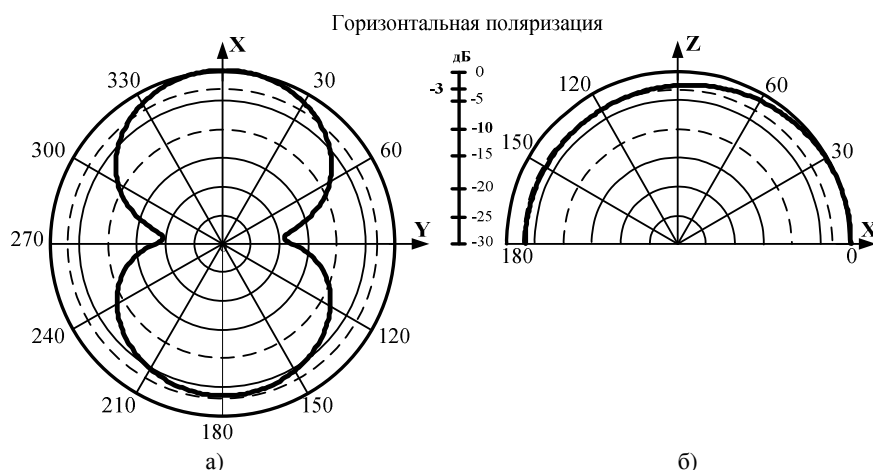


Рисунок 3 — ДН логопериодической антенны в плоскости XOY — а) и YOZ — б)

При вертикальной поляризации наблюдается всенаправленный режим работы т.е. излучение происходит во все стороны (рисунок 4)

Во всем диапазоне частот диаграммы направленности отличаются хорошей стабильностью. Ширина главного лепестка по уровню -3 дБ составляет 60 град., а по уровню -10 дБ ширина составляет 90 град. Так же в диапазоне частот 1700 ... 1900 МГц наблюдается незначительное всенаправленное излучение при вертикальной поляризации, а на частоте 2000 МГц при угле раскрыва антенны 10 град. для вертикальной поляризации доминирующим является режим обратного излучения. Далее с увеличением частоты вновь восстанавливается всенаправленное излучение. В случае горизонтальной поляризации стабильно просматривается режим восьмерки.

При расчете входных характеристик, использовался обобщенный метод наводимых ЭДС. В результате анализа установлено, что активная часть входного сопротивления при данных геометрических параметрах на нижней частоте диапазона 1700 МГц составила при половинном угле раскрыва равно 5 — 150 Ом, а при $\gamma = 15^\circ$ сопротивление равно 330 Ом. Далее величина активного сопротивления плавно уменьшается до минимального значения на частоте 2500 МГц равно 45 Ом. Реактивная часть сопротивления во всем диапазоне носит емкостной характер, изменяясь от 10 Ом на частоте 1700 МГц до 70 Ом на частоте 2000 МГц и далее вновь уменьшается до величины 10 Ом на частоте 2500 МГц.



Рисунок 4 — ДН логопериодической антенны в плоскости XOY — а) и YOZ — б)

КСВ антенны во всем диапазоне почти не изменяется. Так на нижней частоте оно составляет 3 дБ, а на верхней 1,5 дБ при угле раскрыва равным 10 град. И при угле раскрыва равному 30 град. КСВ изменяется от 6 дБ до 3 дБ. КЗД антенны плавно увеличивается во всем диапазоне частот от 1 до 5 т.е. защитные свойства с увеличением частоты возрастают. Коэффициент усиления относительно изотропного излучателя также возрастает от 2,5 до 5,5 дБ при $\gamma = 10^\circ$ и от 2,5 до 4,5 при $\gamma = 50^\circ$. При исследовании антенны с половинным углом раскрыва $\gamma = 20 \dots 45^\circ$, во всем диапазоне частот вновь наблюдается режим работы — восьмерка. Излучение происходит как в прямом так и в обратном направлении при горизонтальной поляризации.

Но и в этом случае диаграмма направленности отличается хорошей стабильностью, изменение происходит лишь незначительное. И по уровню ширина главного лепестка -3 дБ составляет 35 град., а по уровню -10 дБ эта величина составляет 125 град.

Активная часть входного сопротивления на все диапазоне частот изменяется плавно и в основном уменьшается. Так на нижней частоте диапазона 1700 МГц она составляет 350 Ом при $\gamma = 20^\circ$ и 420 Ом при $\gamma = 40^\circ$. А на верхней частоте диапазона 2500 МГц активная часть входного сопротивления составила 60 Ом при $\gamma = 20^\circ$ и 55 Ом при $\gamma = 40^\circ$. Реактивная часть входного сопротивления продолжает носить емкостной характер и изменяется от 70 ... 80 Ом на нижней частоте при $\gamma = 20...30^\circ$, затем увеличивается до 130 ... 140 Ом на частотах 1800 ... 1900 МГц и после плавно уменьшается до 60 Ом на верхней частоте диапазона 2500 МГц. КСВ антенны плавно уменьшается от 7 дБ на нижних частотах до 3 дБ на верхних частотах при $\gamma = 20...30^\circ$, а при $\gamma = 40^\circ$ КСВ уменьшается от 6 дБ на нижних частотах до 2,5 дБ на верхних. КЗД остается таким же и плавно увеличивается от 1 до 5 на всем диапазоне частот, следовательно, защитные свойства антенны при изменении угла раскрыва остаются постоянными. Коэффициент усиления возрастает от 2,2 до 4,6.

Таким образом для случаев 3 — 5 и с половинным углом раскрыва $\gamma = 5...45^\circ$ стабильно наблюдается режим работы — восьмерка при горизонтальной поляризации и всенаправленный режим при вертикальной поляризации. Входное сопротивление плавно изменяется от своего максимального значения на нижней частоте диапазона до максимального значения на верхней частоте. При исследовании антенны со следующими параметрами $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 10^\circ$ и половинным углом раскрыва $\gamma = 5...15^\circ$, при моделировании на всем диапазоне частот от 1700 МГц до 2500 МГц наблюдается режим работы антенны — сонаправленный (при горизонтальной поляризации). Ширина главного лепестка по уровню -20 дБ при $\gamma = 5...15^\circ$ составляет 600 (рисунок 5).

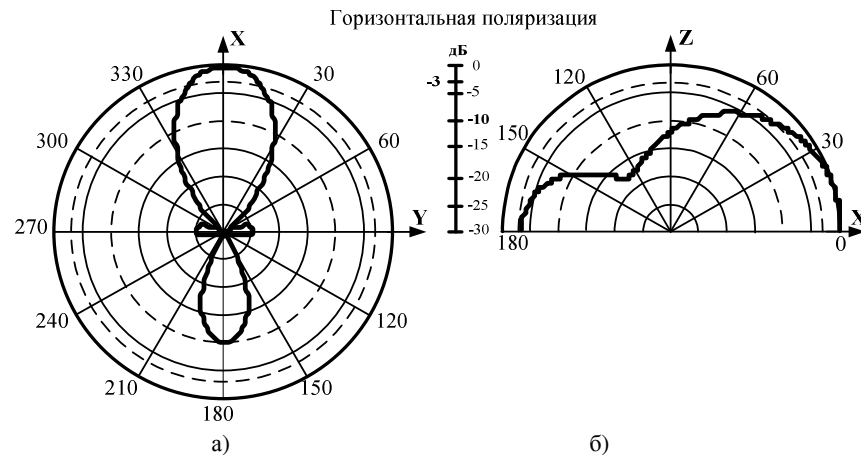


Рисунок 5 — ДН логопериодической антенны при $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 5...15^\circ$ в плоскости XOY — а) и YOZ — б)

В случае же вертикальной поляризации наблюдается режим восьмерки и в среднем по уровню -10 дБ ширина составляет 750. Так же при вертикальной поляризации наблюдается излучение в обратном направлении. С увеличением угла раскрыва ширина боковых лепестков уменьшается и постепенно просматривается однонаправленный режим работы антенны.

Активная часть входного сопротивления при $\gamma = 5^\circ$ плавно возрастает от минимального значения 8 Ом на нижней частоте 1700 МГц до 93 Ом на верхней частоте 2500 МГц. Однако при этом в диапазоне частот от 1700 до 2200 МГц активная часть входного сопротивления постоянна и равна 8 Ом. А в диапазоне от 2200 до 2500 МГц возрастает. При $\gamma = 15^\circ$ активная часть входного сопротивления крайне нестабильна. На нижней частоте 1700 МГц его величина составляет 50 Ом, далее оно уменьшается до 27 Ом на частоте 2000 МГц и после вновь начинает возрастать до 70 Ом на верхней частоте 2500 МГц. Реактивная часть входного сопротивления в случае $\gamma = 5^\circ$ носит индуктивно-емкостной характер т.е. в диапазоне частот от 1700 до 2000 МГц сопротивление носит емкостной характер и меняется от 50 Ом до 0 Ом, далее, поменяв знак, сопротивление принимает индуктивный характер. На частоте 2000 МГц сопротивление составляет 0 Ом, далее в диапазоне частот от 2000 до 2500 МГц величина реактивного сопротивления увеличивается от 0 до 230 Ом. Реактивная часть входного сопротивления в случае $\gamma = 15^\circ$ продолжает носить индуктивно-емкостной характер т.е. в диапазоне частот от 1700 до 2200 МГц сопротивление носит емкостной характер и меняется от 150 Ом до 0 Ом, далее, поменяв знак, сопротивление принимает индуктивный характер. На частоте 2200 МГц сопротивление составляет 0 Ом, далее в диапазоне частот от 2200 до 2500 МГц величина реактивного сопротивления увеличивается от 0 до 70 Ом.

При $\gamma = 5^\circ$ КСВ равномерно. Так в диапазоне частот от 1700 до 1900 МГц оно изменяется от 20 дБ до 11 дБ. В оставшемся диапазоне от 1900 до 2500 МГц КСВ постоянно и составляет 11 дБ. При $\gamma = 15^\circ$ КСВ носит многорезонансный характер. Так на частоте 1700 МГц оно составляет 12 дБ, затем уменьшается и на частоте 2250 МГц принимает значение 1,8 дБ и после вновь увеличивается до 3,7 дБ на частоте 2500 МГц. КЗД на всем частотном диапазоне отрицательно и изменяется от -4 до 0 при любом угле раскрытия антенны. Коэффициент усиления при $\gamma = 5^\circ$ в диапазоне частот от 1700 до 1900 МГц постоянен и составляет 5,2 и далее он плавно уменьшается до уровня 3,4 и в диапазоне от 2300 до 2500 МГц остается постоянным. Коэффициент усиления при $\gamma = 15^\circ$ на частоте 1700 МГц составляет 4, после начинает возрастать и на частоте 2050 МГц достигает максимального значения 5 и далее до 2500 МГц продолжает уменьшаться до значения 4.

При исследовании антенны со следующими параметрами $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 10^\circ$ и половинным углом раскрытия $\gamma = 20..45^\circ$, при моделировании во всем диапазоне частот от 1700 МГц до 2500 МГц наблюдается режим работы антенны — однонаправленный (при горизонтальной поляризации). Ширина главного лепестка по уровню -3 дБ при $\gamma = 20^\circ$ составляет 500, при $\gamma = 30^\circ$ по уровню -3 дБ составляет 45град, при $\gamma = 40..45^\circ$ по уровню -3 дБ составляет 450.

В случае же вертикальной поляризации наблюдается режим восьмерки. Однако наибольшее излучение происходит в обратном направлении и в среднем по уровню -10 дБ ширина составляет 75град. С увеличением угла раскрытия ширина главного лепестка увеличивается на 10...12 %.

Активная часть входного сопротивления при $\gamma = 20^\circ$ на частоте 1700 МГц составляет 65 Ом, далее оно уменьшается и в диапазоне частот от 1900 до 2100 МГц постоянно и равно 40 Ом, в диапазоне частот от 2100 до 2500 МГц сопротивление увеличивается до величины 100 Ом. При $\gamma = 40^\circ$ на частоте 1700 МГц составляет 120 Ом, далее оно уменьшается и в диапазоне частот от 1900 до 2100 МГц постоянно и равно 80 Ом, в диапазоне частот от 2100 до 2500 МГц сопротивление увеличивается до величины 155 Ом. Реактивная часть входного сопротивления в случае $\gamma = 20^\circ$ носит индуктивно-емкостной характер т.е. в диапазоне частот от 1700 до 2200 МГц сопротивление носит емкостной характер и меняется от 150 Ом до 0 Ом, далее, поменяв знак, сопротивление принимает индуктивный характер. На частоте 2200 МГц сопротивление составляет 0 Ом, далее в диапазоне частот от 2200 до 2500 МГц величина реактивного сопротивления увеличивается от 0 до 70 Ом. Реактивная часть входного сопротивления в случае $\gamma = 40^\circ$ продолжает носить индуктивно-емкостной характер т.е. в диапазоне частот от 1700 до 2300 МГц сопротивление носит емкостной характер и меняется от 160 Ом до 0 Ом, далее, поменяв знак, сопротивление принимает индуктивный характер. На частоте 2300 МГц сопротивление составляет 0 Ом, далее в диапазоне частот от 2300 до 2500 МГц величина реактивного сопротивления увеличивается от 0 до 25 Ом.

При $\gamma = 20^\circ$ КСВ изменяется не значительно. Так на частоте 1700 МГц оно составляет 9 дБ и до частоты 2200 МГц оно уменьшается до величины 1,2 дБ и в диапазоне частот от 2200 до 2500 МГц КСВ увеличивается до значения 3,2 дБ. При $\gamma = 40^\circ$ на частоте 1700 МГц оно составляет 7 дБ и до частоты 2200 МГц оно уменьшается до величины 2 дБ и в диапазоне частот от 2200 до 2500 МГц КСВ увеличивается до значения 3,2 дБ. КЗД остается отрицательным, но во всем диапазоне частот оно постоянно и составляет -5 . Коэффициент усиления также почти равномерен во всем диапазоне частот и меняется в пределах 3,8 ... 4,5.

Наиболее целесообразна к изготовлению с точки зрения получения однонаправленного излучения, на наш взгляд конструкция, со следующими геометрическими параметрами $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 10^\circ$ и $\gamma = 30^\circ$. На основании проведенных исследований разработана конструкция антенны и проведен эксперимент. Получено достаточно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов. В дальнейшем полученные теоретические результаты могут быть обобщены для более сложных конструкций в частности антенных решеток.

Библиографический список

1. Жук М.С. Проектирование линзовых, сканируемых, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. — М.: Энергия, 1973. — 440 с.
2. Проценко М.Б. Оптимизация геометрических параметров конических спиральных антенн по критерию требуемой ДН / М.Б. Проценко, А.В. Лукьянчиков, П.А. Комаров, М.И. Редин // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: матер. 12-ой междунар. науч.-техн. конф. КрыМиКо — 2002, Севастополь, 9 — 13 сент. 2002 г. — Севастополь, 2002. — С. 349 — 350.
3. 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. — К., 1999. — № 9. — С. 37 — 43.

Поступила в редакцию 24.04.2008 г.