

УДК 621.396.67

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАКЛОННЫХ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ АНТЕНН

¹Бестугин А.Р., ²Власенко В.И., ¹Дворников С.В., ¹Киршина И.А.

¹ФГАОВ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения», Санкт-Петербург, e-mail: ikirshina@mail.ru;

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, e-mail: practicdsv@yandex.ru

Широкое практическое применение логопериодических антенн, в том числе в декаметровом диапазоне, обусловлено постоянством их электрических параметров в достаточно широком частотном диапазоне. Конструктивно логопериодическая антенна представляет собой сложную конструкцию, состоящую из симметричной двух- или четырехпроводной собирательной линии, к которой в перекрестном порядке подключены однотипные излучатели. При этом работа в широком диапазоне волн у логопериодических антенн достигается за счет того, что в качестве вибраторов у логопериодических антенн используются не одинаковые по размерам, но геометрически подобные антенные элементы. А поскольку среднестатистические параметры логопериодических антенн зависят от структуры излучателей, то задачей исследования является обоснование рекомендаций по выбору структуры их излучателей, которые как раз и обеспечат диапазонные свойства антенных систем. В статье представлены результаты, полученные на основе моделирования в среде MMANA-GAL электрических параметров широкодиапазонных логопериодических антенн декаметрового диапазона с различной формой излучающих элементов. Рассмотрены способы построения периодических структур плоских логопериодических антенн. Показана взаимосвязь их структурных элементов, определяющих свойства широкодиапазонной работы. Исследованы зависимости электрических параметров наклонных логопериодических антенн, от структурных различий их излучающих элементов. Обоснованы условия применения вибраторных и рамочных излучателей при сохранении диапазонных свойств логопериодической структуры.

Ключевые слова: логопериодические антенны, диаграммы направленности, антенные элементы, электрические параметры антенн

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE GEOMETRIC STRUCTURE OF THE EMITTERS ON THE ELECTRIC PARAMETERS OF THE LOGO-PERIODIC ANTENNAS

¹Bestugin A.R., ²Vlasenko B.I., ¹Dvornikov S.V., ¹Kirshina I.A.

¹Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg
State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, ikirshina@mail.ru;

²Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S.M. Budenny, Saint Petersburg, practicdsv@yandex.ru

The wide practical use of log-periodic antennas, including those in the decameter range, is due to the constancy of their electrical parameters in a fairly wide frequency range. Structurally, a log-periodic antenna is a complex structure consisting of a symmetrical two or four-wire collecting line, to which radiators of the same type are connected in a cross order. In this case, operation in a wide wavelength range for log-periodic antennas is achieved due to the fact that not identical in size, but geometrically similar antenna elements are used as vibrators for log-periodic antennas. And since the average statistical parameters of log-periodic antennas depend on the structure of the emitters, the task of the study is to substantiate recommendations for choosing the structure of their emitters, which will just provide the range properties of antenna systems. The article presents the results obtained on the basis of modeling in the MMANA-GAL environment the electrical parameters of wide-range log-periodic antennas of the decameter range with different shapes of radiating elements. Methods for constructing periodic structures of flat log-periodic antennas are considered. The interrelation of their structural elements, which determine the properties of wide-range operation, is shown. The dependences of the electrical parameters of inclined log-periodic antennas on the structural differences of their radiating elements are investigated. The conditions for the use of vibrator and frame emitters are substantiated while maintaining the range properties of the log-periodic structure.

Keywords: log-periodic antennas, directional patterns, antenna elements, electrical parameters of antennas

Антенные системы являются составной частью любого приемо-передающего устройства [1]. Причем именно они определяют пространственную характеристику и играют существенную роль в определении частотно-избирательных свойств.

В общем случае широкополосную и частотно-независимую антенну можно соз-

дать, используя принцип электрического подобия [2], сущность которого состоит в том, что электрические параметры антенн остаются неизменными, если при уменьшении или увеличении в n раз длины волны соответственно уменьшить или увеличить линейные размеры элементов антенны. При этом с потребительской точки зрения

очень важно обеспечить постоянство параметров излучателя в достаточно широкой частотной области. Указанным требованиям удовлетворяют логопериодические, биконические и различные разновидности спиральных антенн [3].

Следует отметить, что при бесконечных размерах указанные антенны не обладают частотной селекцией, поскольку у них реализован принцип самодополнительности. Однако переход от бесконечной к конечной структуре приводит к ограничению диапазоновых свойств таких излучателей, поэтому при анализе периодических антенн, как правило, используют численные методы расчета ЭМ-поля в ближней или в дальней области.

В настоящее время для расчета антенн наиболее широко применяются метод моментов (МоМ) и метод конечно-разностной временной области (КРВО) [4]. В МоМ антенна описывается, исходя из ее представления в виде упорядоченной системы прямых тонких проводов, каждый из которых представляется в виде набора сегментов. Затем, на основе уравнений Максвелла в интеграционной форме, производится расчет токов на каждом сегменте и на всем проводе. И с учетом полученных значений тока на проводах определяется распределение ЭМ-поля вокруг антенны, которое представляется в виде диаграммы направленности, а также рассчитываются другие параметры антенны.

Заметим, что для выполнения расчета на основе МоМ потребуется значительно меньше временного ресурса по сравнению с методом КРВО, который предполагает решение дифференциальных уравнений во временной области. При том, что МоМ, как и метод КРВО, предполагает решение системы алгебраических уравнений по пространственным или временным координатам [5].

Важнейшей характеристикой любого метода анализа антенн является точность получаемых расчетов, оценить которые можно только экспериментально или по результатам моделирования [6].

Современные технологии расчета антенн, как правило, ориентированы на создание компьютерных моделей, поэтому точность получаемых расчетов полностью зависит от идентичности моделируемой антенны реальной. При этом следует учитывать, что все электрические характеристики реальных антенн зависят от различных близко расположенных предметов, определяемых пространственными и временными координатами. Поэтому численные методы расчета ЭМ-полей могут характеризовать

только среднестатистические параметры антенн, которые, в свою очередь, зависят от структуры излучателей.

Цель исследования: определение зависимости электрических параметров наклонных логопериодических антенн от структурных различий их излучающих элементов и обоснование условия применения вибраторных и рамочных излучателей при сохранении диапазоновых свойств логопериодической структуры.

Исходя из этого, в данной статье на основе расчетов различных моделей логопериодических структур обоснованы рекомендации по выбору структуры их излучателей, которые как раз и обеспечат диапазоновые свойства антенных систем.

Основные свойства наклонных логопериодических антенн

В электродинамике широко используется принцип самодополнительности, который положен в основу построения различных типов логопериодических антенн (ЛПА) [7]. В общем случае, вибраторная ЛПА представляет собой сложную конструкцию, состоящую из симметричной двух- или четырехпроводной собирательной линии, к которой в перекрестном порядке подключены однотипные излучатели.

В качестве примера на рис. 1 представлена электрическая схема ЛПА, у которой в качестве излучателей использованы симметричные вибраторы.

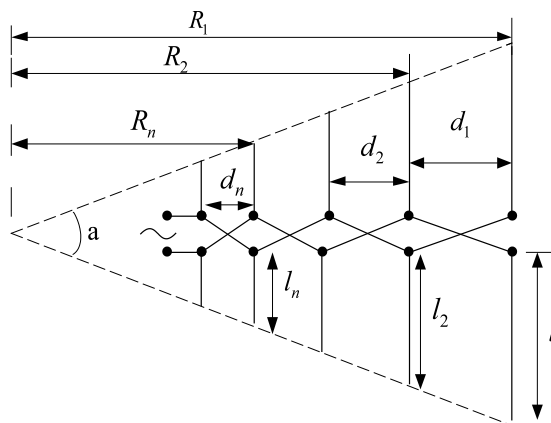


Рис. 1. Электрическая схема логопериодической антенны

Важными параметрами любой ЛПА, определяющими ее свойства, являются отношения длин плеч вибраторов l_n и взаимных расстояний R_n от вершины структуры до соответствующих излучателей, а также расстояния между соседними вибраторами d_n , которые представляют постоянную

величину, называемую периодом структуры τ [8].

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n}. \quad (1)$$

Другим важным параметром является угол раскрытия структуры α , который определяется исходя из геометрических размеров антенны

$$\operatorname{tg}(\alpha / 2) = l_n / R_n = (1 - \tau) l_n / d_n. \quad (2)$$

Как правило, в ЛПА в качестве вибраторов используются не одинаковые по размерам, но геометрически подобные антенные элементы. При этом работа в широком диапазоне волн достигается за счет того, что на определенной длине волны поле излучения формируется только некоторой частью антенны (ее активной областью). Следует отметить, что указанная активная область, без изменения своих относительных размеров, при изменении длины волны (частоты), как бы перемещается вдоль полотна антенны. В качестве примера на рис. 2 приведено распределение тока в плоской ЛПА, которое характеризует смещение активной области вдоль антенны на частотах 50 МГц, 100 МГц и 150 МГц.

Геометрические размеры ЛПА для определенного диапазона частот зависят от параметра структуры τ , угла раскрытия α , а также параметра σ , который непосредственно характеризует форму антенного элемента. При этом все три указанных параметра взаимосвязаны между собой

$$\sigma = \frac{(1 - \tau)}{\left\{ 4 \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right\}}. \quad (3)$$

Как правило, период структуры выбирается в пределах $\tau \approx 0,75 \dots 0,95$, параметр повторения формы вибраторов $\tau \approx 0,05 \dots 0,2$, а угол $\alpha = 20 \dots 60^\circ$. Важным моментом, определяющим диапазонные свойства ЛПА, является то, что номинал нижней части рабочих частот зависит от размеров крайних вибраторов $\lambda_{\max} \approx 4l_{\max}$; $\lambda_{\min} \approx 4l_{\min}$. При этом полоса рабочих частот также зависит от параметров τ и σ , а также угла раскрытия структуры α [8].

На рис. 3 представлена зависимость параметра $\sigma(\alpha)$ как функции переменной угла раскрытия α , при граничных значениях периода структуры, равных $\tau_1 = 0,75$ и $\tau_2 = 0,95$.

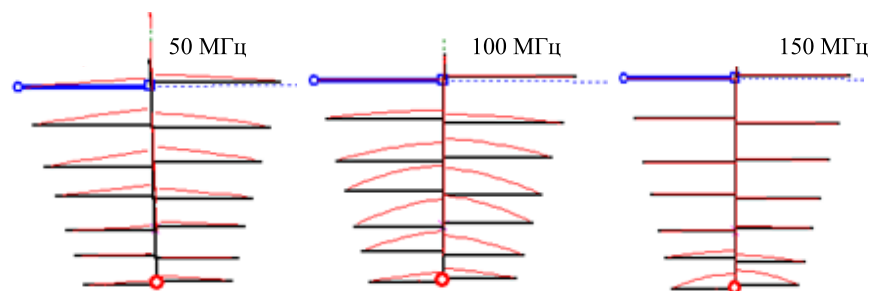


Рис. 2. Распределение тока на вибраторах ЛПА при различных значениях частоты

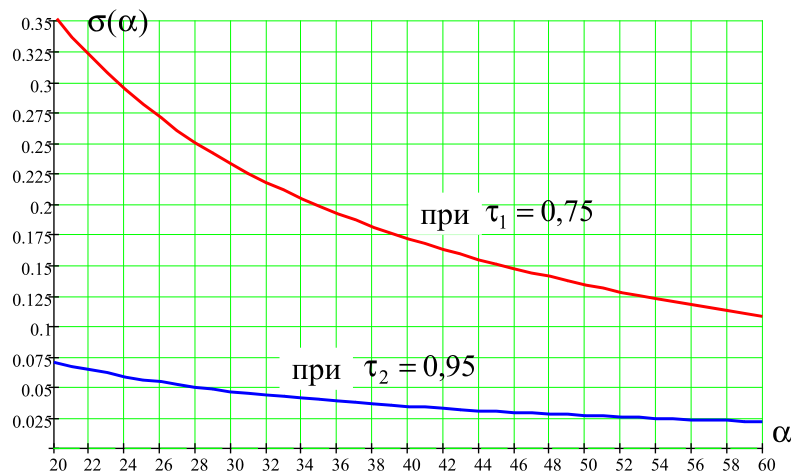


Рис. 3. Зависимость параметра повторения формы вибраторов от угла раскрытия

Анализ результатов, представленных на рис. 3, показывает, что с возрастанием периода структуры, динамика изменений формы антенного элемента снижается. Так, отношение разницы абсолютных значений $\sigma_1(\alpha)$ для $\tau_1 = 0,75$ при $\alpha = 20^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$, и, соответственно $\sigma_2(\alpha)$ для $\tau_2 = 0,95$, составляет

$$\frac{\sigma_1(20^\circ) - \sigma_1(60^\circ)}{\sigma_2(20^\circ) - \sigma_2(60^\circ)} = 5. \quad (4)$$

Поскольку в качестве антенных элементов могут выступать различные структуры, то практический интерес представляет влияние их формы на электрические параметры ЛПА в целом.

Сравнительная оценка влияния формы излучателей на электрические характеристики логопериодических антенн

Для практических приложений синтез вибраторных ЛПА, как правило, осуществляется в соответствии с принципом самоподобия. Поэтому проанализируем влияние формы вибраторных элементов на сохранение электрических характеристик ЛПА при ее работе в широкой полосе частот.

С этой целью построим компьютерные модели ЛПА с линейными вибраторами *V*-образного типа, на основе рамок, а также с фрактальными вибраторами. Применительно к диапазону 5...20 МГц, выбираем угол раскрытия структуры $\alpha = 40^\circ$, а параметр τ равный 0,91.

Для указанных исходных данных параметр σ , в соответствии с формулой (3) будет примерно равен 0,07 (что соответствует общепринятому подходу), т.е. поперечные размеры вибраторов будут значительно меньше их длины. В соответствии с [9], для выбранного диапазона частот ЛПА должна иметь не менее 21 антенного элемента.

В дециметровом диапазоне радиоволн ЛПА должны размещаться на мачтах с наклонными, для стабилизации направления излучения в направлении на ионосферу.

На рис. 4 для плоской ЛПА, у которой в качестве антенных элементов использовались обычные вибраторы (рис. 4), в среде *MMANA-GAL* рассчитаны диаграммы направленности для частоты $f_1 = 5$ МГц (рис. 5) и $f_2 = 20$ МГц (рис. 6) (здесь и далее на рисунках представлены параметры ЛПА, рассчитываемые в среде *MMANA-GAL*, в частности: отношение F/B , характеризующее уровень диаграммы направленности по фронту и спаду; параметр Gh , характеризующий коэффициент усиления по отношению к несимметричному вибратору; параметр Ga , характеризующий коэффициент усиления по отношению к анизотропному

излучателю; параметр $Elev$, характеризующий угол между нормалью и максимумом диаграммы направленности).

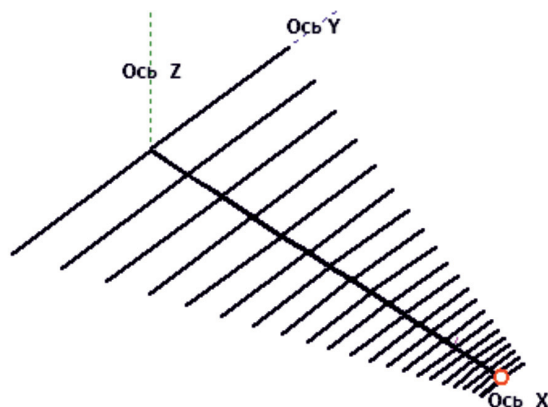


Рис. 4. Общий вид вибраторной ЛПА (21 вибратор)

Полученные результаты показывают, что плоская ЛПА, у которой в качестве элементов выбраны линейные однопроводные симметричные вибраторы, обладает достаточно хорошими диапазонными свойствами, поскольку форма ее диаграммы направленности (ДН) фактически не зависит от частоты. При этом антенна имеет неплохое согласование с 400-омным фидером. Так, ее КСВ изменяется в пределах от 1,7 до 3,4. А коэффициент усиления достигает 6 дБ, при уровне обратного излучения порядка -10 дБ.

В соответствии с целевой установкой были исследованы ЛПА тех же размеров и в том же диапазоне частот, но с другими антенными элементами: *V*-образного, фрактального и рамочного типа. Их основные характеристики сведены в таблицу.

Согласно результатам моделирования, структурное усложнение антенных элементов в плоских ЛПА не приносит положительного эффекта. Так, ЛПА с рамочными излучателями имеют плохое согласование и малый коэффициент защиты от боковых действий и, соответственно, низкий коэффициент усиления.

Применение фрактального подхода к синтезу вибраторов (вибраторы с изломом на 1/3) позволяет лишь незначительно улучшить электрические характеристики, по отношению к ЛПА с элементами рамочного типа. Следует отметить, что ЛПА с *V*-образными вибраторами более эффективны по показателю коэффициента стоячей волны (КСВ) по сравнению с антенными, имеющими конструкционно более сложные излучатели. Однако их согласование с 400-омным фидером хуже, чем у ЛПА вибраторного типа.



Рис. 5. Диаграмма направленности ЛПА на частоте 5 МГц



Рис. 6. Диаграмма направленности ЛПА на частоте 20 МГц

Электрические характеристики исследуемых ЛПА

Тип вибраторного элемента	F , МГц	R , Ом	jX , Ом	KCB, 400 Ом	Gh , дБ	Ga , дБ	F/B , дБ
Фрактальный вибратор	5,0	139,1	19,32	2,88	3,57	5,72	8,7
	20,0	18,57	81,99	22,4	2,45	4,6	4,52
V-образный вибратор	5,0	157,2	-37,61	2,57	5,03	7,18	15,12
	20,0	25,99	12,44	15,4	3,83	5,98	9,28
Вибратор в виде треугольной рамки	5,0	15,41	193,6	32,0	5,93	8,08	18,84
	20,0	49,21	30,44	8,18	4,91	7,06	15,1

В дальнейшем исследовании были получены электрические характеристики рассмотренных выше ЛПА, при их наклонной установке. Такие антенны были определены как наклонные логопериодические антенны (НЛПА).

Как известно [10], направление главного лепестка ДН НЛПА зависит от высоты расположения активной области над поверхностью Земли и определяется формулой

$$H_i = \frac{\lambda_i}{4 \sin \theta_i}. \quad (5)$$

В соответствии с зависимостью (5) можно подобрать угол наклона ЛПА таким образом, чтобы обеспечить требуемое направление угла максимума ДН в вертикальной плоскости для заданной протяженности трассы при организации радиосвязи посредством ионосферного распространения радиоволн. В частности, для трасс протяженностью порядка 1000 км оптимальный угол наклона главного максимума ДН должен быть в пределах 35° . В этом случае вы-

соты мачт должны составлять: $H_{\min} = 6$ м, $H_{\max} = 31$ м.

Результаты моделирования для рассмотренных типов НЛПА и их ДН в вертикальной плоскости приведены на рис. 7–10.

Результаты исследования показали, что рассматриваемые НЛПА сохраняют стабильные характеристики излучения в широком диапазоне частот. А у формируемых такими антеннами ДН ослабление по обратному лепестку достигает минус 8...12 дБ, т.е. коэффициент усиления по направлению максимума ДН составляет порядка 8...10 дБ.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие заключения. Наиболее стабильными электрическими характеристиками обладают НЛПА, у которых в качестве антенных элементов используются симметричные вибраторы. Такие НЛПА обеспечивают достаточно хорошее согласование с фидером 400 Ом ($KCB = 1,8...5,2$). А уровень обратного излучения минимальный (порядка минус 12 дБ).

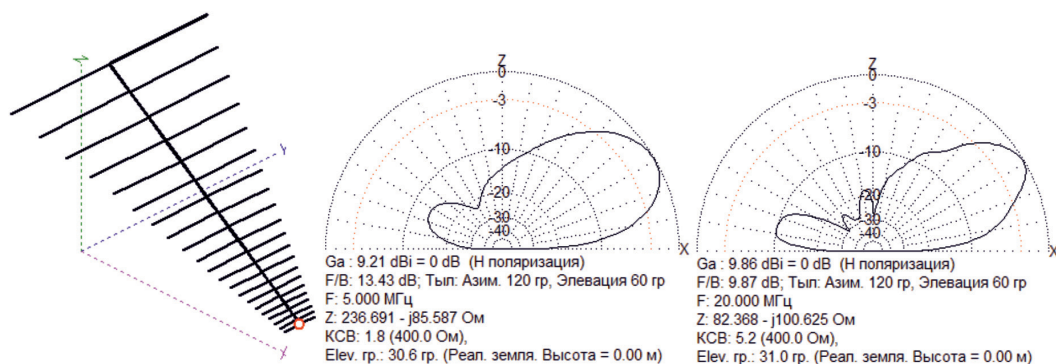


Рис. 7. Результаты исследования характеристик НЛПА, состоящей из симметричных вибраторов

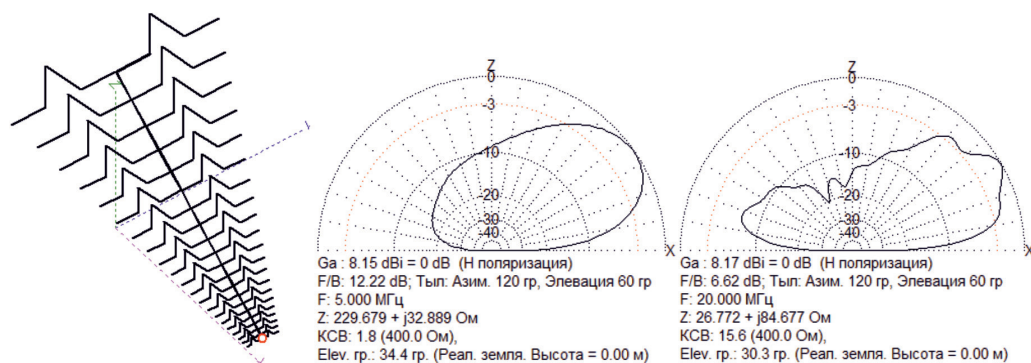


Рис. 8. Результаты исследования характеристик НЛПА, состоящей из вибраторов фрактального типа

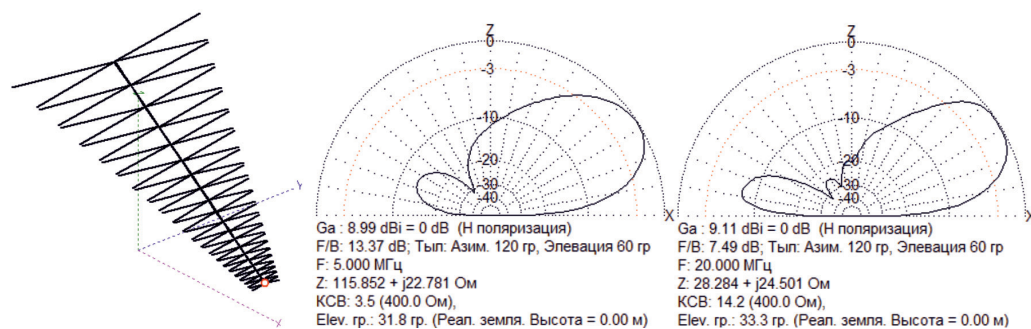


Рис. 9. Результаты исследования характеристик НЛПА, состоящей из V-образных вибраторов

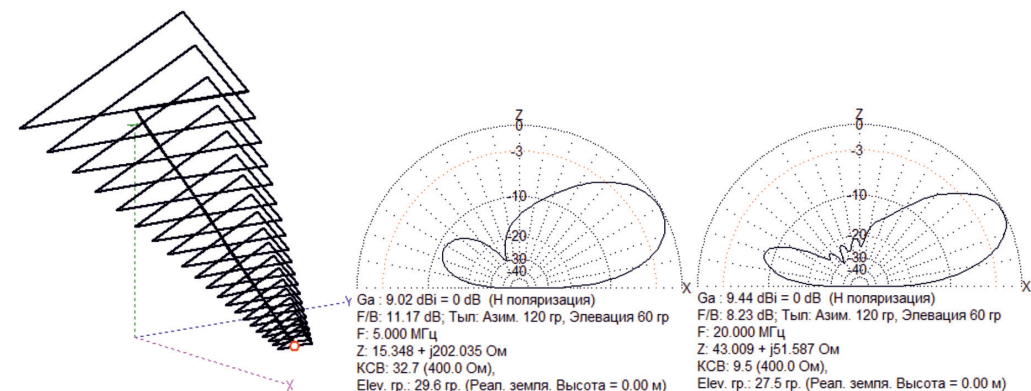


Рис. 10. Результаты исследования характеристик НЛПА, у которой в качестве вибраторов используются треугольные рамки

В интересах дальнейшего улучшения согласования НЛПА с определенным типом фидера необходимо выбирать антенные элементы со стабильными электрическими характеристиками [9]. В этом случае применение излучателей с изломом проводов в излучателях нецелесообразно, поскольку возникающие отраженные волны приводят к ухудшению согласованности НЛПА с фидером.

В ходе синтеза антенн следует понимать, что повысить коэффициент усиления НЛПА свыше 10...12 дБ практически невозможно, поскольку в формировании ЭМ-поля участвует только часть излучателей в пределах резонансной частоты.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-06047-мк.

Список литературы

1. Карл Ротхаммель. Антенны. М.: Изд-во «Транспортная компания». 2021. 656 с.
2. Волхонская Е.В., Никишин М.А. Модельные исследования процедуры оптимизации конструктивных параметров логопериодической антенны С-диапазона // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2017. № 2. С. 48–52.
3. Бестугин А.Р., Красюк В.Н., Оводенко А.А., Рыжиков М.Б. Характеристики микрополосковых антенн под те-

площадным покрытием гиперзвукового летательного аппарата // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 9–14.

4. Гусаков В.М., Михайловский А.В., Шадаев С.Е., Шкиль В.М. Методика оптимизации параметров логопериодических и конических логоспиральных антенн для пассивных радиолокационных отражателей // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 9. С. 47–53.

5. Ковеня В.М., Чирков Д.В. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики // Новосибирский гос. университет. Новосибирск, 2013. 86 с.

6. Бестугин А.Р., Красюк В.Н., Оводенко А.А., Рыжиков М.Б. Нагревостойкие антенны космических и гиперзвуковых летательных аппаратов. СПб., 2014. Т. 2. Техника. 595 с.

7. Вендик И.Б. Диаграммообразование в антенных решетках. М.: Физматлит, 2020. 112 с.

8. Bestugin A.R., Kirshina I.A., Yakimov A.N. Model study of design possibilities for optimizing the microwave antenna. Proceedings of IEEE Conferences (1–5 June 2020, Saint Petersburg, Russia). 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020). 2020. 9131478. P. 1–4.

9. Будяк В.С., Давыдович А.В., Кисмерешкин В.Н., Косточкина Н.А. Логопериодические антенны вертикальной поляризации // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5. № 4. С. 10–13.

10. Асташова К.В., Костычев Ю.А., Кублицкая О.В., Попов Е.С. Метод миниатюризации логопериодических антенн // Радиолокация, навигация, связь: материалы XXIII Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 18–20 апреля 2017 г.). Воронеж: Издательство Воронежский государственный университет, 2017. Т. 3. С. 1061–1068.