

## Сканирующая антенная система диапазона коротких волн

В.П. Кудин

Проведено численное моделирование линейной антенной решетки коротковолнового диапазона из ВАЕ излучателей. Показано, что восьмиэлементная решетка обеспечивает азимутальное сканирование в секторе углов 80 градусов в диапазоне частот 4–8 МГц.

**Ключевые слова:** линейная антенная решетка, численные методы, интегральные уравнения, тонкопроволочный излучатель, коротковолновый диапазон.

Numerical simulation of linear short-wave antenna array from BAE emitters is carried out. It is shown, that the eight-element array provides the azimuth scanning in the sector of angles of 80 degrees in the frequency band 4–8 MHz.

**Keywords:** linear phased array, numerical methods, integral equations, thin wire radiator, short-wave band.

**Введение.** Антенные системы диапазона коротких волн используются в загоризонтных радиолокационных станциях (РЛС) и обеспечивают наблюдение за воздушной обстановкой за сотни (РЛС поверхностной волны) и тысячи километров (РЛС пространственной волны) от точки размещения. Специфика радиолокации в коротковолновом диапазоне заключается в том, что прохождение радиоволн сильно зависит от времени суток или года, состояния атмосферы, погоды, солнечной активности и может регулироваться выбором частоты зондирующего сигнала [1]. Поэтому антенные системы (и не только) должны обладать достаточной широкополосностью – порядка одной-трех октав. Идеальным и традиционно используемым излучателем для этих целей является логопериодическая вибраторная антенна, широкополосность которой принципиально не ограничена [2], [3]. Однако, данная антенна представляет собой объемную конструкцию больших габаритов, что порождает серьезные материальные затраты на изготовление, монтаж и эксплуатацию подобных излучателей и решеток на их основе. Поэтому не прекращаются поиски более дешевых и конструктивно более простых излучателей. Фирмой BAEsystems был анонсирован излучатель [4], внешний вид которого показан на рисунке 1. Его отличают умеренная широкополосность, устойчивость к ветровым нагрузкам, удобство монтажа и обслуживания.

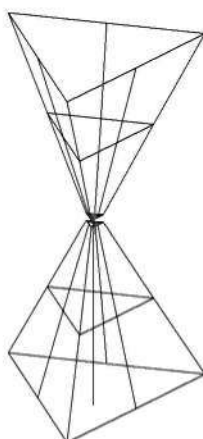


Рисунок 1 – Геометрия ВАЕ излучателя

В качестве симметричных плеч в ВАЕ излучателе (по существу, это симметричный вибратор) используются два тетраэдра, повернутых вершинами друг к другу и соединенных центральным изолятором. Допускается взаимный разворот тетраэдров друг относительно друга, что позволяет применить спаренные диэлектрические растяжки между верхними и

нижними гранями для повышения устойчивости такой каркасной конструкции. Основание нижнего тетраэдра устанавливается на трех изоляторах на некотором расстоянии от поверхности земли.

В данной работе проводятся подробные численные исследования ВАЕ излучателя и линейной антенной решетки (ЛАР) на его основе в качестве антенной системы для РЛС поверхностной волны.

**Основная часть.** Для численных исследований использовались программа MMANA-GAL pro версии 2.5.5.30 [5] и программа SAPRA, созданная на основе алгоритма, изложенного в [6], [7]. Верификация получаемых результатов проводилась на нескольких точках, равномерно расположенных по диапазону рабочих частот. При совпадении результатов с погрешностью не более 3 % получаемые результаты считались достоверными.

Сначала исследовался и оптимизировался одиночный излучатель. Затем для обеспечения однонаправленного излучения излучатель располагался перед вертикальным проволочным рефлектором и процедура повторялась. После этого строилась ЛАР и снова проводились расчеты и оптимизация. При этом входы излучателей возбуждались падающими волнами равной амплитуды с линейным набегом фазы, обеспечивающим синфазное сложение полей в заданном азимутальном направлении, отсчитываемым от нормали к плоскости решетки (угол сканирования).

Внешний вид оптимального восьмизлементного фрагмента ЛАР на основе излучателей ВАЕ приведен на рисунке 2. В данном случае активными являются четыре излучателя, находящиеся в середине решетки, а по два крайних излучателя с каждой стороны нагружены на согласованные нагрузки. Геометрические характеристики излучателей имеют следующие значения: возбуждающий зазор равен 0,5 м, высота каждого тетраэдра (плечо вибратора) 11 м, радиус описанной вокруг оснований тетраэдров окружности 7 м, расстояние между нижним основанием тетраэдров и поверхностью земли 1 м. Шаг решетки 21,3 м выбирался из условия обеспечения однолучевого сканирования в секторе углов  $\pm 40^\circ$  от нормали к плоскости решетки. Диаметры всех проводников (как излучателей, так и рефлектора) равны 6 мм. Густота проводов аperiodического рефлектора, его длина и высота определялись исходя из требования получения необходимого уровня подавления излучения в заднем полупространстве. Численно установлено, что приемлемые характеристики получаются при расстоянии между проводами 1,1 м, длине и высоте рефлектора 174 м и 25 м соответственно. Вертикальный рефлектор при этом находился на расстоянии 11 м от оси излучателей. Нижние концы проводов вертикального рефлектора гальванически связаны с подстилающим горизонтальным рефлектором. Точка возбуждения вибраторов закорочена на подстилающий горизонтальный рефлектор с помощью вертикального стержня, проходящего вдоль оси антенны.

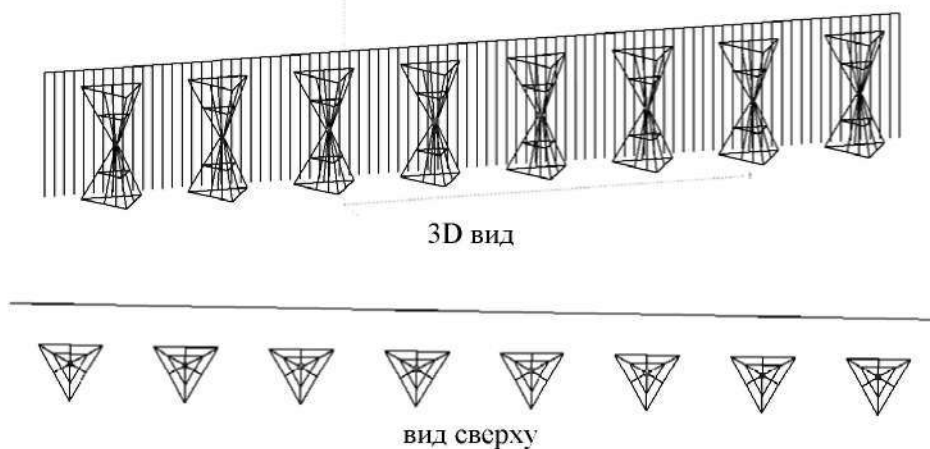


Рисунок 2 – Антенная решетка перед вертикальным рефлектором

Исследовались входные импедансы каждого излучателя в решетке и уровень их согласования (коэффициент стоячей волны), а также диаграммы направленности (ДН) решетки в вертикальной и горизонтальной плоскостях для различных направлений фазирования решетки.

Расчеты проводились в диапазоне частот 4–8 МГц (перекрытие по частоте 2:1) и секторе углов сканирования  $\pm 40^\circ$ . При этом предполагалось, что вся система находится над идеально проводящим экраном.

На рисунках 3, 4 приводятся частотные зависимости входного импеданса излучателей при фазировании антенной решетки под углами  $10^\circ$  и  $30^\circ$  к нормали и к оси решетки соответственно. Номера излучателей активной области указаны на рисунках цифрами. Верхние кривые на графиках относятся к действительной части, а нижние – к мнимой части входного импеданса.

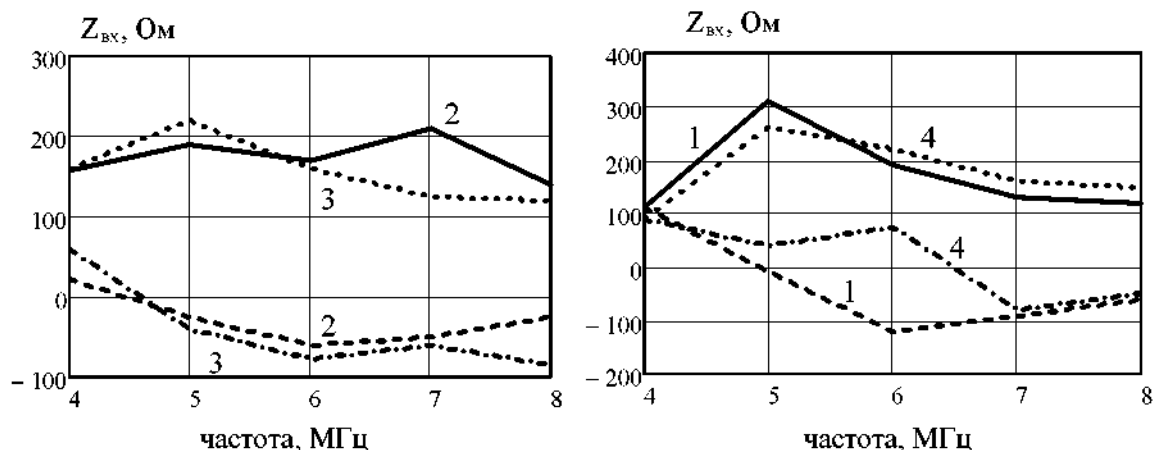


Рисунок 3 – Частотные зависимости входного импеданса излучателей при фазировании антенной решетки под углом  $10^\circ$

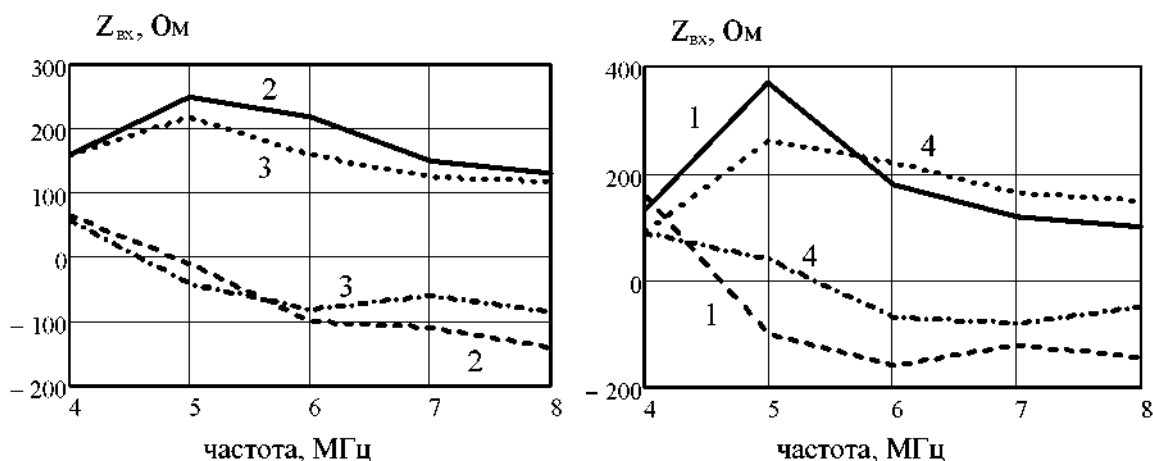


Рисунок 4 – Частотные зависимости входного импеданса излучателей при фазировании антенной решетки под углом  $30^\circ$

В целом действительная часть входного импеданса лежит около 200 Ом, а мнимая – в пределах от 0 до  $-100$  Ом, и, следовательно, возникает необходимость в использовании согласующего трансформатора, понижающего действительную часть до 50 Ом – волнового сопротивления питающего фидера. Кроме того, следует отметить невысокую широкополосность рассматриваемой антенны – перекрытие всего лишь 2:1. Это определенные недостатки по сравнению с логопериодической антенной. Вместе с тем, данная антенна и решетка подобных излучателей обладают конструктивной простотой и, следовательно, дешевой по сравнению с объемной конструкцией решетки логопериодических антенн.

Частотные зависимости коэффициента стоячей волны различных излучателей для двух направлений фазирования приведены на рисунке 5. Анализ показывает, что в целом получается удовлетворительный уровень согласования, хотя в нижней части рабочего диапазона имеется необходимость в согласующем устройстве.

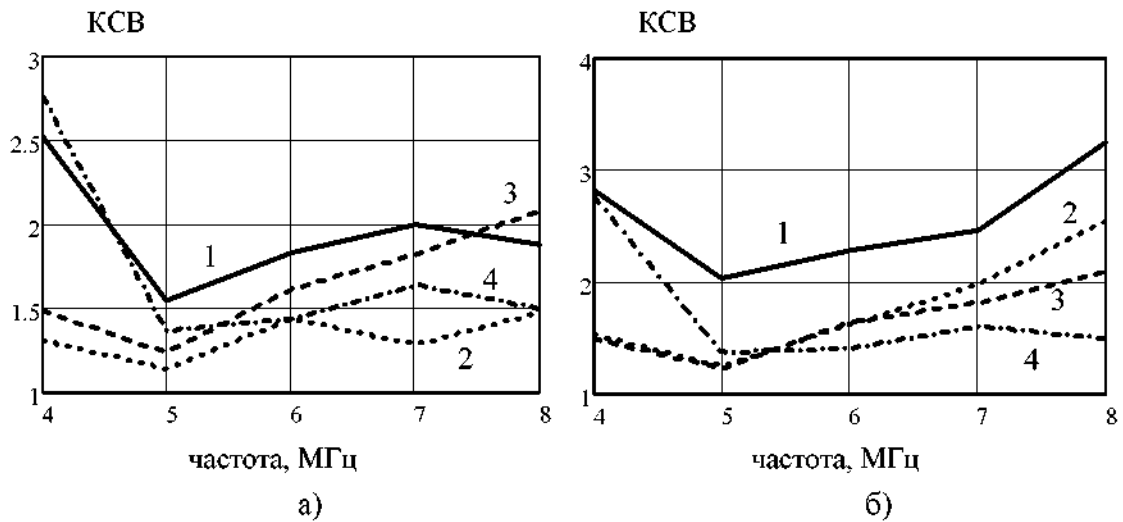


Рисунок 5 – Частотные зависимости коэффициента стоячей волны для различных излучателей при фазировании антенной решетки под углами: а)  $10^\circ$ , б)  $30^\circ$

ДН решетки в горизонтальной и вертикальной плоскостях на средней частоте 6 МГц рабочего диапазона для двух углов фазирования  $10^\circ$  и  $30^\circ$  (сплошная и штриховая линии соответственно) представлены на рисунках 6 и 7.

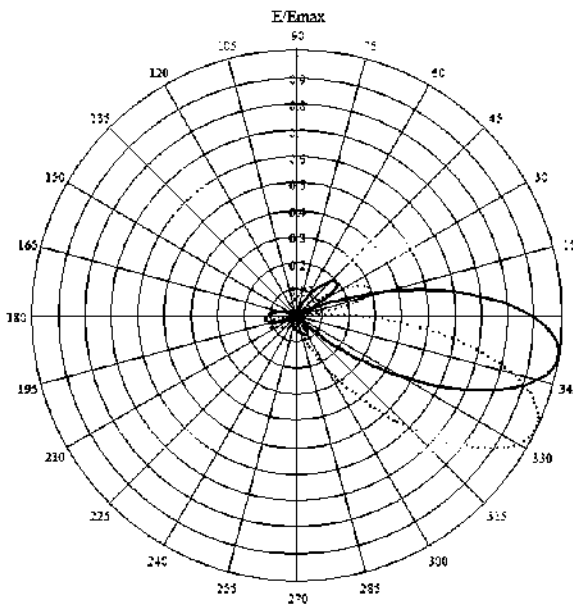


Рисунок 6 – ДН решетки в горизонтальной плоскости на частоте 6 МГц

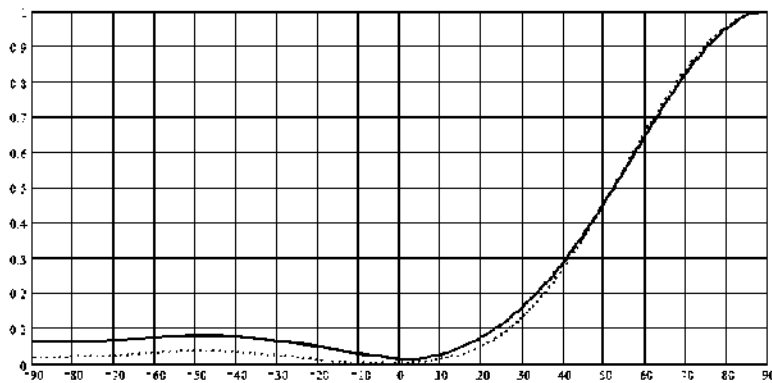


Рисунок 7 – ДН решетки в вертикальной плоскости на частоте 6 МГц

Анализ результатов показывает, что ЛАР в диапазоне частот имеет хорошо сформированные ДН в обоих сечениях со стандартным уровнем первого бокового лепестка минус 13 дБ и уровнем заднего излучения не более минус 18 дБ. Ширина ДН в горизонтальной плоскости при изменении частоты от 4 МГц до 8 МГц плавно убывает с  $43^\circ$  до  $23^\circ$ . При этом верхний скат ДН в вертикальной плоскости плавно убывает с  $32^\circ$  до  $20^\circ$ . Таким образом, ДН решетки, как и требуется, хорошо прижата к горизонту.

Исследовался также вопрос о расширении рабочей полосы частот системы. Один из путей решения данной проблемы – построение системы по литерному принципу: создается несколько однотипных решеток, работающих каждая в своем частотном диапазоне. В простейшем и традиционном случае антенные решетки разных литеров располагаются вдоль одной оси. Недостатком такой конструкции является существенное увеличение занимаемой площади (с учетом габаритов антенных систем в коротковолновом диапазоне). В альтернативном нетрадиционном варианте литеры занимают одну и ту же площадь, т. е. располагаются друг перед другом – более высокочастотный перед низкочастотным (рисунок 8). Таким образом, НЧ литер служит рефлектором для ВЧ литеры и обеспечивает однонаправленность излучения последнего. С другой стороны, ВЧ литер в силу меньших размеров оказывает незначительное влияние на характеристики излучения НЧ литеры.

Подробное исследование показало, что в двухлитерном совмещенном варианте (см. рисунок 8) ВЧ литер слабо влияет на характеристики НЧ литеры, однако характеристики самого ВЧ литеры ухудшаются в верхней части его рабочего диапазона. Происходит это по причине роста взаимодействия литеров в силу увеличения электрических размеров НЧ литеры. Поэтому рабочий диапазон совмещенного варианта ограничен со стороны верхних частот значением примерно 14 МГц.

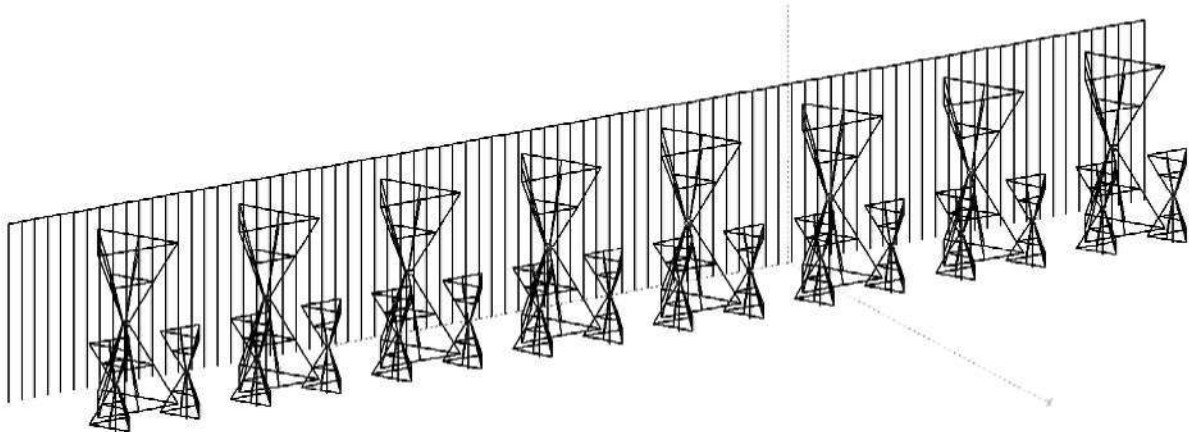


Рисунок 8 – Двухлитерный совмещенный вариант антенной решетки

**Заключение.** В работе исследована сканирующая антенная система диапазона коротких волн на основе ВАЕ излучателей. Установлено, что такая антенная система с оптимизированным излучателем имеет следующие характеристики:

- Диапазон рабочих частот – 4,0–8,0 МГц.
- Диапазон рабочих частот двухлитерного варианта – 4,0–14,0 МГц.
- Сектор углов сканирования –  $80^\circ (\pm 40^\circ)$ .
- Пределы изменения ширины луча в диапазоне рабочих частот –  $43\text{--}23^\circ$ .
- Уровень задних лепестков азимутальной диаграммы направленности – не более минус 18 дБ.
- Пределы изменения верхнего ската ДН в вертикальной плоскости –  $32\text{--}20^\circ$ .

Достоинством антенной системы на основе ВАЕ излучателей является устойчивость к ветровым нагрузкам, удобство монтажа и обслуживания.

**Литература**

1. Алебастров, В.А. Основы загоризонтной радиолокации / В.А. Алебастров, Э.Ш. Гойхман, И.М. Заморин [и др.] ; под ред. А.А. Колосова. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
2. Hansen, R.C. Phased array antennas, Second Edition / R.C. Hansen. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 548 p.
3. Айзенберг, Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко [и др.] ; под ред. Г.З. Айзенберга. – М. : Радио и связь, 1985. – 536 с.
4. Boswell, A.G.P. The tetrahedral antenna / A.G.P. Boswell // International Conference on Antennas and Propagation ICAP-97, 14–17 April 1997. – IEE Conference Publication. – № 436. – P. 427–430.
5. Гончаренко, И.В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA / И.В. Гончаренко. – М. : ИП РадиоСофт, журнал «Радио», 2002 – 80 с.
6. Кудин, В.П. Анализ произвольных проволочных структур из прямолинейных проводников / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 9 (124). – Ч. 1 : Вычисление матрицы взаимных импедансов. – С. 6–11.
7. Кудин, В.П. Анализ произвольных проволочных структур из прямолинейных проводников / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 9 (124). – Ч. 2 : Учет потерь в проводниках и произвольного падающего поля – С. 12–16.

Гомельский государственный технический  
университет им. П.О. Сухого

Поступила в редакцию 12.10.2017