

Влияние эффектов взаимного влияния элементов на характеристики сверхширокополосной кольцевой антенной решетки

М.И. Сугак, С.В. Балландович, Г.А. Костиков, Ю.Г. Антонов, Л.М. Любина

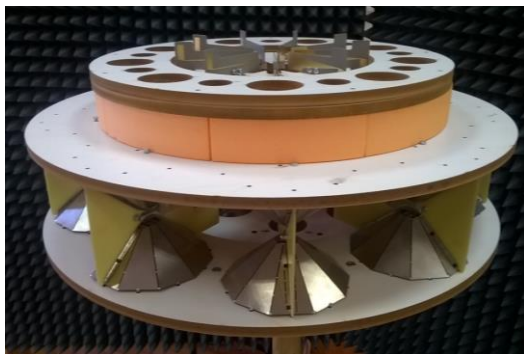
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: представлены результаты экспериментального и теоретического исследования кольцевой антенной решетки, предназначенной для работы в составе системы радиомониторинга. Отличительной конструктивной особенностью описанной антенны является широкое применение технологии лазерной резки, что позволило достичь высокой технологичности и низкой стоимости производства. Приведены результаты исследований амплитудно-фазовых характеристик как одиночных элементов, так и находящихся в составе кольцевой антенной решетки. Оценки подлежали фазовые ошибки и антенный фактор в полосе рабочих частот. Показано, что взаимное влияние элементов может привести к снижению уровня принимаемого сигнала и появлению значительных фазовых ошибок.

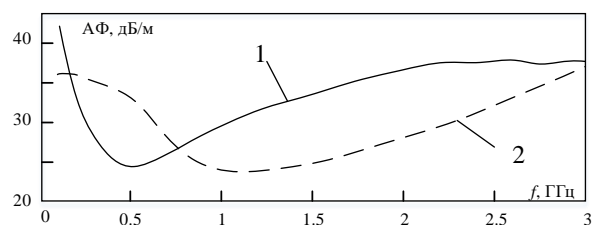
Ключевые слова: кольцевая антенная решетка, антенный фактор, биконический вибратор, сверхширокополосные антенны, фазовые ошибки, радиомониторинг

1. Введение

На данный момент, в связи со стремительным развитием технических средств связи, проблема создания эффективного оборудования для радиомониторинга является весьма актуальной. К современным системам радиомониторинга выдвигается ряд жестких требований, касающихся их технических и эксплуатационных характеристик. Основными из них являются возможность работы в широкой полосе частот и мобильность всей системы. Эти требования, непосредственно влияют на конструкцию антенной системы, входящей в комплекс радиомониторинга. Технические характеристики антенны определяют точность и разрешающую способность системы [1]-[3], а массогабаритные параметры – эксплуатационные характеристики.



а)



б)

Рисунок 1. а) Макет исследуемой КАР; б) расчетная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) зависимость антенного фактора для уединенного биконического вибратора.

В настоящее время в сверхширокополосных системах радиолокации, пеленгации и мониторинга наибольшее распространение получили кольцевые антенные решетки

(КАР) [4]-[6]. Известны различные КАР, реализованные на направленных элементах (логопериодических [7], антеннах Вивальди [8], [9], ТЕМ-рупорах [10], [11]), однако при использовании фазового метода определения угла прихода необходимо использовать ненаправленные излучатели, как в КАР по работам [3], [5], [12]. Вместе с тем, все эти решения имеют определенные недостатки с точки зрения рабочего диапазона частот, поляризации или габаритных размеров.

Целью исследований является оценка искажений амплитудно-фазовых характеристик двухуровневой КАР для диапазона частот 0,3-6 ГГц (Рис.1, а).

2. Характеристики элементов КАР

В [13-14] показано, взаимное влияние элементов приводит к появлению фазовых ошибок при пеленгации сигналов. Помимо этого, наличие различных конструктивных элементов вблизи элементов КАР может привести к снижению энергетического потенциала системы и росту антенного фактора в полосе частот. Указанные особенности необходимо учитывать при обработке пеленгуемых сигналов, иначе в ряде направлений система может оказаться «слепой». Целью данного раздела является исследование искажений фазовых и амплитудных характеристик, обусловленных наличием конструктивных элементов и взаимным влиянием вибраторов в составе КАР.

На рис. 1,б показаны расчетная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) зависимость антенного фактора для уединенного биконического вибратора. АФ рассчитывается как отношения амплитуды напряженности падающего электрического поля к напряжению на зажимах антенны. С точки зрения характеристик приемной антенны целесообразно стремиться к снижению антенного фактора. Данная характеристика связана с абсолютными эффективными размерами антенны, а не отнесенными к длине волны. Это приводит к тому, что, например, при относительно постоянном коэффициенте усиления (что применимо к биконическому вибратору) антенный фактор ухудшается (растет) с ростом частоты. Экспериментальный график на рис. 1,б имеет ту же форму, что и теоретический, но частота минимума значительно отличается – 0.5 ГГц против 1.2 ГГц.

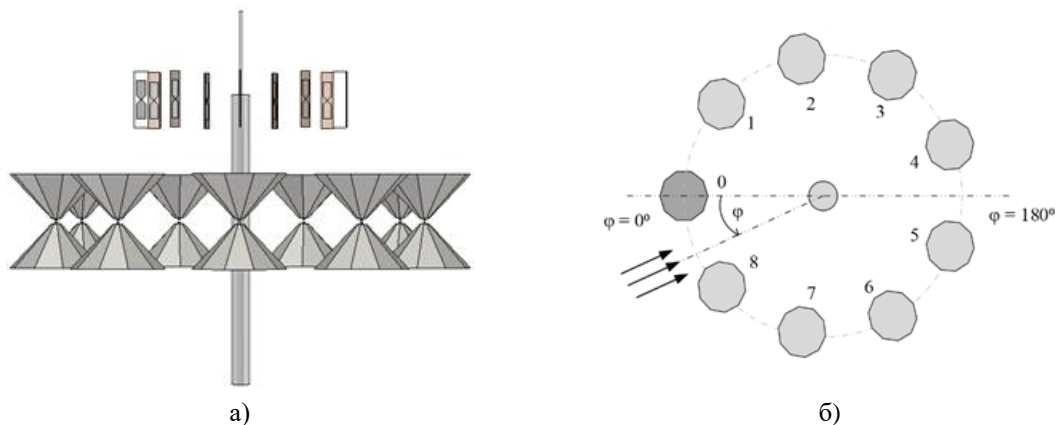


Рисунок 2. а) модель исследуемой КАР; б) нумерация элементов в составе КАР и угол прихода φ падающей плоской волны.

На рис. 2 показаны модель исследуемой КАР и нумерация элементов в её составе, где φ – угол прихода падающей плоской волны. В центре находится металлическая мачта диаметром 30 мм, на которую крепится антенная решетка. Расстояние между низкочастотной и высокочастотной литерами равно 60 мм. Влияние конструктивной штанги и взаимодействия элементов друг с другом на амплитудные характеристики

КАР можно на основе частотных зависимостей антенного фактора для низкочастотной литеры без металлической мачты и при ее наличии (рис. 3). Наличие металлической мачты приводит к значительным выбросам антенного фактора, например, на частоте 0.9 ГГц на рис.3,б до 50 дБ/м, которые являются проявлением затеняющего эффекта металлической мачты, что хорошо видно на примере 3-го элемента при $\varphi=60^\circ$. Зависимости на рис. 3 являются типичными для биконического вибратора, помещенного в состав КАР, т. е. при других углах φ наблюдаются те же закономерности.

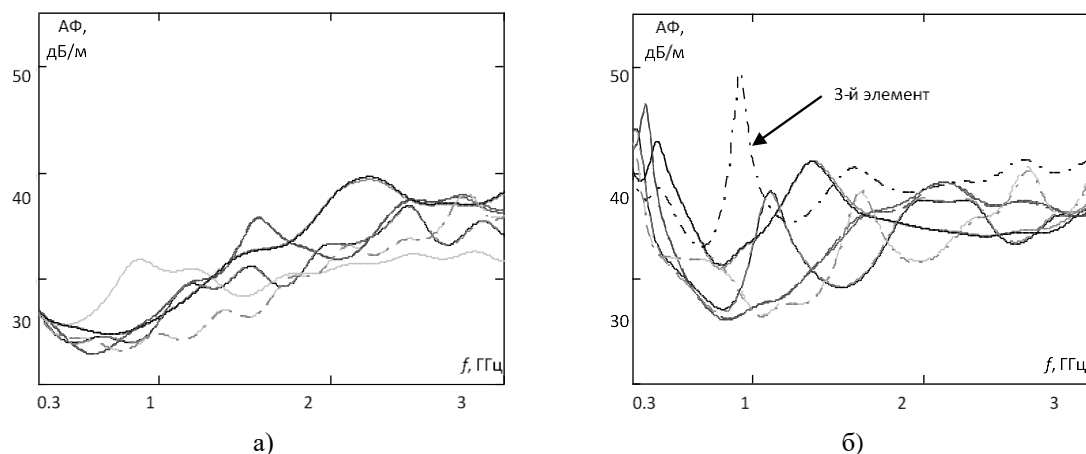


Рисунок 3. Частотная зависимость антенного фактора для низкочастотной литеры а) при наличии металлической мачты; б) без металлической мачты.

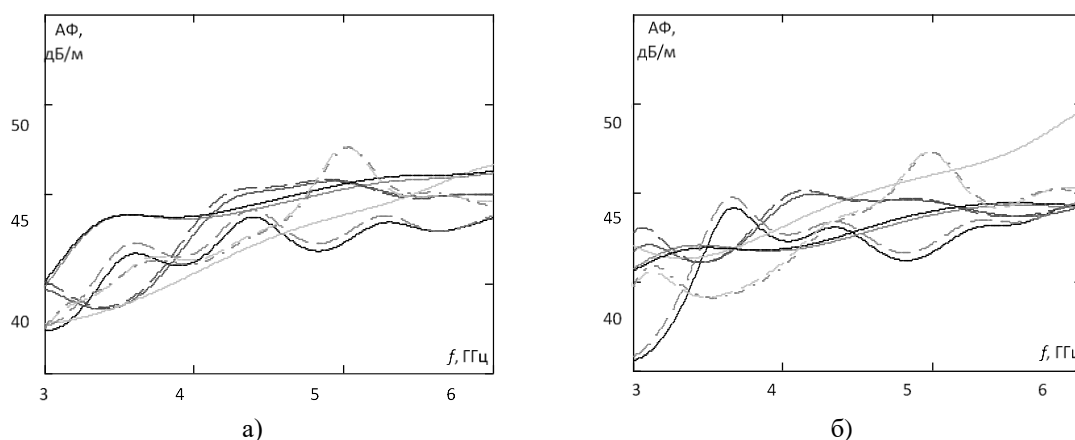


Рисунок 4. Частотная зависимость антенного фактора для высокочастотной литеры а) при наличии металлической мачты; б) без металлической мачты.

Аналогичные графики для высокочастотной литеры показаны на рис. 4. Отметим, что затеняющий эффект мачты практически не заметен в случае высокочастотной литеры, так как в плоскости высокочастотной литеры штанга переходит в узкий стержень (модель силовых и сигнальных кабелей)

Помимо амплитудных характеристик в системах радиомониторинга большую роль играют и фазовые, которые влияют на точность определения пеленга на обнаруженный сигнал. На рис. 5,а и рис. 5,б показаны частотные зависимости фазовых ошибок для низкочастотной и высокочастотной КАР соответственно. Они получены при падении плоской волны на КАР, показанной на рис. 2,б.

Фазовая ошибка, приведенная на рис. 5 рассчитывалась по следующей формуле:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{err},j} &= \Delta\Phi_{\text{calc},j} - \Delta\Phi_{\text{theor},j}, \\ \Delta\Phi_{\text{calc},j} &= \Phi_{\text{calc},j} - \Phi_{\text{calc}}, \\ \Delta\Phi_{\text{theor},j} &= \Phi_{\text{theor},j} - \Phi_{\text{theor}},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\Phi_{\text{theor},j}$ - теоретическая фаза принятого радиосигнала, принятого на j -й элемент; $\Phi_{\text{calc},j}$ - полученная в результате электродинамического моделирования фаза радиосигнала, принятого на j -й элемент. Фазовая ошибка, рассчитанная по (1) имеет значение при фазовом некогерентном методе определения пеленга на обнаруженный сигнал [15].

Ошибка на рис. 5 получена для угла падения плоской волны $\varphi=0^\circ$, при котором фазовые ошибки достигли максимальных значений. Для низкочастотной литеры ошибки лежат в пределах $-80^\circ \dots 80^\circ$, для высокочастотной в пределах $-65^\circ \dots 60^\circ$. Для других углов φ фазовые искажения лежат в схожих пределах. В процессе моделирования выяснилось, что элементы низкочастотной литеры оказывают значительное влияние на элементы высокочастотной. В то же время элементы высокочастотной литеры практически не влияют на элементы низкочастотной. Для уменьшения указанного взаимодействия расстояние между двумя литерами в реальной конструкции было увеличено до 60 мм.

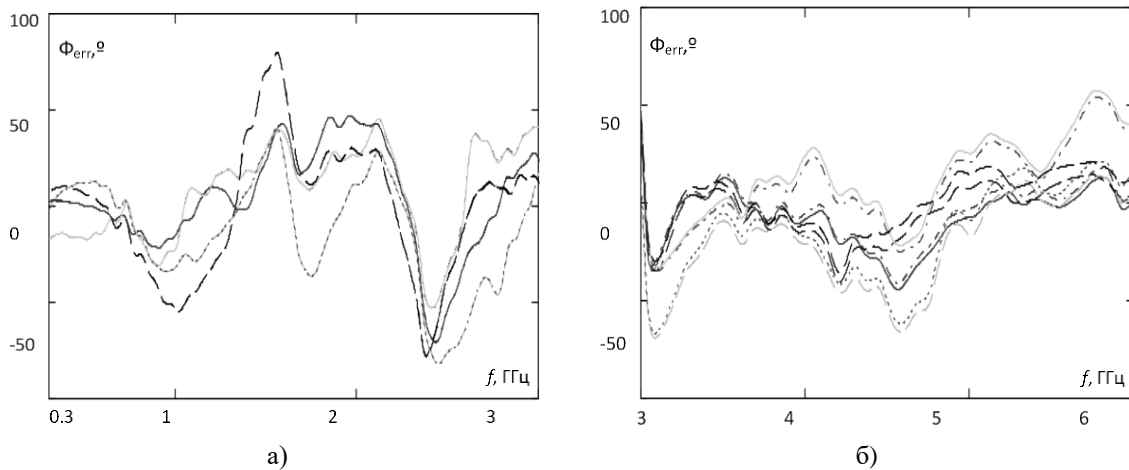


Рисунок 5. частотные зависимости фазовых ошибок для а) низкочастотной КАР; б) высокочастотной КАР.

Представленные данные показывают, что характеристики элементов в составе КАР значительно отличаются от характеристик в свободном пространстве. Взаимное влияние и присутствие конструктивных элементов приводят к снижению энергетического потенциала КАР в некоторых направлениях, а также к появлению фазовых ошибок. Для корректной работы всей системы эти данные необходимо учитывать при обработке сигналов.

3. Заключение

В статье представлены характеристики кольцевой двухлитерной антенной решетки для диапазона 0.3 ГГц – 6 ГГц.

Приводятся расчетные и экспериментальные данные для антенного фактора одиночных элементов. Также, произведена оценка указанных характеристик и фазовых ошибок для всей КАР. Показано, что в составе антенной решетки характеристики элементов могут значительно отличаться от тех, что получены в

свободном пространстве (более чем на 15 дБ/м для отдельных частот и углов. Фазовые ошибки могут достигать 80°). Полученные данные могут быть полезны при выборе алгоритмов обработки и проектировании подобных систем.

Список литературы

1. E. Tuncer, B. Friedlander, Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation, 1st Edition, Academic Press, Cambridge, Massachusetts. 2009.
2. Y. Liu and H. Cui, "Antenna array signal direction of arrival estimation on digital signal processor (DSP)", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 55, pp. 782-791, Jan. 2015.
3. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
4. Naval Air Warfare Center Weapons Division, Electronic Warfare & Radar Systems Engineering Handbook, Morrisville: Lulu Press, Inc, 2013.
5. Rembovsky, A. Ashikhmin, V. Kozmin, Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva [Radiomonitoring: Tasks. Methods. Tools. 3rd ed.], Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2012. (in Russian)
6. V. S. Panko, Y. P. Salomatov, M. I. Sugak, *Kol'tsevye izluchateli i antennye reshetki* [Ring Aperture Radiator and Circular Antenna Arrays], Saint Petersburg, ETU "LETI" Publishing Office, 2014. (in Russian)
7. R. W. S. Harrison and M. Jessup, "A novel Log periodic implementation of a 700 MHz – 6 GHz slant polarised fixed-beam antenna array for direction finding applications," 2012 42nd European Microwave Conference, Amsterdam, 2012, pp. 727-730.
8. R. Sarkis and C. Craeye, "Circular array of wideband 3D Vivaldi antennas," 2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Berlin, 2010, pp. 792-794,
9. M. Li, R. Ma and N. Behdad, "A Compact, Low-Cost, Ultrawideband Direction-Finding System: Techniques Suitable for Small-Aperture Designs," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 60, no. 6, pp. 32-44, Dec. 2018. doi: 10.1109/MAP.2018.2870641
10. Z. Wang, P. S. Hall, J. R. Kelly and P. Gardner, "Wideband Frequency-Domain and Space-Domain Pattern Reconfigurable Circular Antenna Array," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 10, pp. 5179-5189, Oct. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2740969.
11. M. E. Ozturk, E. Korkmaz and M. Kebeli, "Rounded-edge bow-tie antenna for wideband mobile direction finding system," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 9, no. 15, pp. 1809-1815, 10 12 2015, doi: 10.1049/iet-map.2015.0399.
12. T. Engin Tuncer Benjamin Friedlander, Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation. 1st Edition. Academic Press, Cambridge, Massachusetts. 2009. P. 456.
13. S. V. Ballandovich, Y. G. Antonov, G. A. Kostikov, L. M. Liubina and M. I. Sugak, "Development of the Ultra-Wideband Circular Antenna Array," 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, pp. 1-4.
14. Балландович С.В., Костиков Г.А., Любина Л.М., Сугак М.И. Анализ характеристик кольцевой пеленгаторной антенной решетки. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018;(6):20-29.
15. Шевченко М.Е., Малышев В.Н., Файзуллина Д.Н. Пеленгование источников радиоизлучения в широкой полосе частот с использованием круговой антенной решетки. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018;(6):30-40.