

СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК, СФОКУСИРОВАННЫХ В ЗОНЕ БЛИЖНЕГО ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-10053).

FEATURES OF THREE-DIMENSIONAL RANDOM ANTENNA ARRAYS FOCUSED IN THE NEAR RADIATED FIELD ZONE

*D. Vedenkin
Yu. Sedelnikov
A. Nasybullin
N. Ryabova
V. Ivanov*

Annotation

The article provides three-dimensional focused antenna arrays, the potential of their application, describing their mathematical model and the functioning of key properties with numerical estimates.

Keywords: antenna array, near radiated field zone, efficiency factor, focus area, size of the focus area, stealth radiation.

Веденькин Денис Андреевич

К.т.н., доцент, Казанский национальный исследовательский техн. университет им. А.Н. Туполева – КАИ

Седельников Юрий Евгеньевич

Д.т.н., профессор, Казанский национальный исследовательский техн. университет им. А.Н. Туполева – КАИ

Насыбуллин Айдар Ревкатович

К.т.н., доцент, Казанский национальный исследовательский техн. университет им. А.Н. Туполева – КАИ

Рябова Наталья Владимировна

Д.ф-м.н., Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Иванов Владимир Алексеевич

Д.ф-м.н., профессор, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация

В статье рассматриваются объемные сфокусированные антенные решетки, потенциал их применения, описывающая их функционирование математическая модель и ключевые свойства с численными оценками.

Ключевые слова:

Антенная решетка, зона ближнего излученного поля, коэффициент эффективности, область фокусировки, размер области фокусировки, скрытность излучения.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях и уровне развития антенной теории и техники всё более широкое применение находят антенны и антенные решетки, функционирующие в зоне ближнего излученного поля. Дополнительная возможность фокусировки электромагнитного излучения открывает новые возможности применения подобных антенн в разнообразных задачах, например повышение потенциала радиосвязи, концентрация энергии в заданной области пространства, повышение эксплуатационных характеристик микроволновых технологических комплексов, в задачах волновой диагностики и неразрушающего контроля. Свойства сфокусированных электромагнитных полей неотрывно связаны как со свойствами источников электромагнитного излучения, так и с их пространствен-

ными положениями. Анализ свойств планарных случайных разреженных антенных решеток, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля посвящен ряд современных исследований, например [1–5]. Однако свойства сфокусированных антенных решеток с объемным расположением излучателей в настоящее время недостаточно проанализированы, этому и посвящена настоящая статья.

Математическая модель объемной антенной решетки

Рассмотрим математическую модель разреженной когерентной сфокусированной антенной решетки с расположением излучателей в объеме на образующей цилиндра. Объемная антенная решетка представляет собой набор парциальных излучателей, располагающихся в объеме цилиндра. Для организации фокусировки необхо-

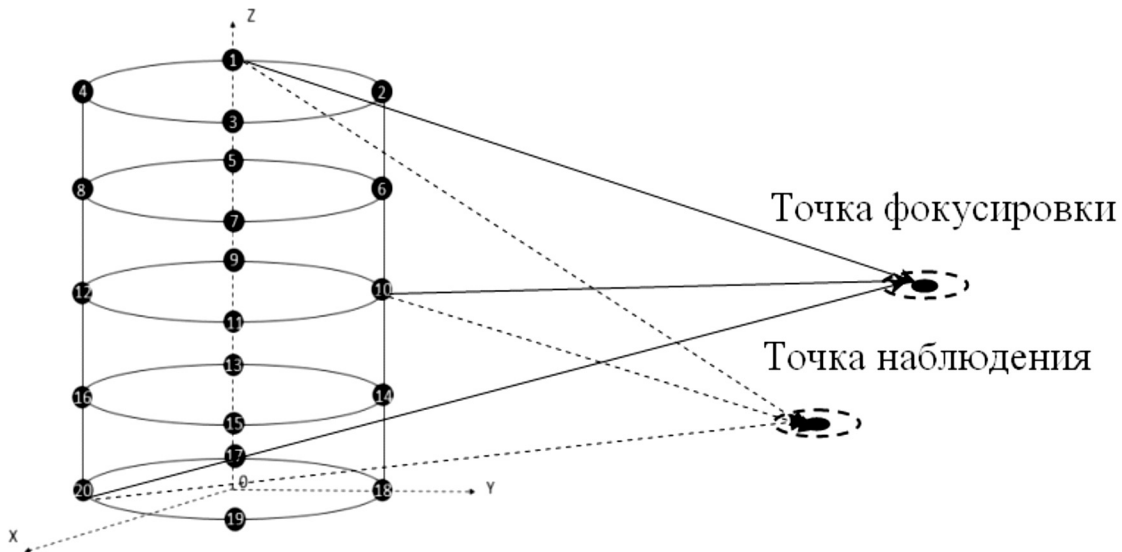


Рис. 1. Иллюстрация математической модели объемной сфокусированной апертуры.

можно таким образом реализовать фазовое распределение излучаемого парциальными излучателями электромагнитного поля, чтобы в точке фокусировки происходило их синфазное сложение. В этом случае в данной точке возникнет максимум напряженности поля. Модель когерентной антенной решетки сфокусированной в зоне ближнего излученного поля представлена на рис. 1.

Напряженность электромагнитного поля для сфокусированной апертуры описывается следующим выражением:

$$E_{\Phi}(x, y, z) = \sqrt{\left| \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot e^{-jk(R_i(x,y,z) - R_{\Phi_i})}}{R_i(x, y, z)} \right|^2}, \quad (1)$$

где

I_i – ток в i -м излучателе;

$R_i(x, y, z)$ – расстояние от i -го излучателя до точки наблюдения (x, y, z) ;

R_{Φ} – расстояние от i -го излучателя до точки фокусировки;

$k=2\pi/\lambda$ – волновое число.

Распределение напряженности электромагнитного поля в окрестности точки фокусировки, рассчитанного по (1) представлено на рис. 2.

На данном рисунке отчетливо наблюдается существенное превышение напряженности поля в точке фокусировки по сравнению с остальными участками графика, что свидетельствует о наличии фокусировки.

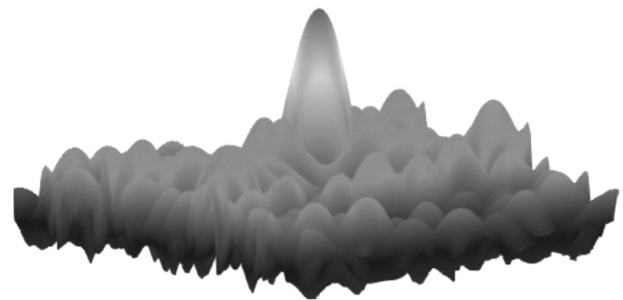


Рис. 2. Напряженность электромагнитного поля в окрестности точки фокусировки.

Анализируя трехмерный график, представленный на рис. 2, необходимо отметить, что в некоторой окрестности точки фокусировки наблюдается близкое к синфазному сложению парциальных полей отдельных излучателей решетки. Эта окрестность получила название "область фокусировки".

В работе [6] рассматриваются плоские сфокусированные антенные решетки и в ней предложено оценивать область фокусировки по уровню напряженности поля, как $1/\sqrt{2}$ относительно значения напряженности поля в точке фокусировки. Фигура области фокусировки в нашем случае представляет собой геометрическое тело, близкое по своей форме к эллипсоиду, его размеры будем оценивать как длины трех его осей.

В той же работе область фокусировки рассматривается как эллипс и приводятся аналитические соотноше-

ния для определения ее размеров в долях длины волны:

$$\frac{\Delta R_{\perp}}{\lambda} \approx 0.5 \sqrt{\frac{4R_{\phi}^2}{L_s^2} + 1}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta R_{\parallel}}{\lambda} \approx 0.5 \frac{\sqrt{1 + \frac{L_s^2}{4R_{\phi}^2}}}{\sqrt{1 + \frac{L_s^2}{4R_{\phi}^2} - 1}} \quad (3)$$

Важными качествами сфокусированных апертур является превышение напряженности поля в области фокусировки и ее снижение за ее пределами по сравнению с напряженностью поля от одиночного излучателя при равенстве излучаемых мощностей, в работе [6] для этих свойств предлагаются названия "коэффициент эффективности" и "коэффициент скрытности" соответственно.

Для оценки коэффициента эффективности служит формула

$$K_{\text{эф}} = \frac{E_{\phi}(x_{\phi}, y_{\phi}, z_{\phi})}{E_0(x_{\phi}, y_{\phi}, z_{\phi})}, \quad (4)$$

где

$E_{\phi}(x_{\phi}, y_{\phi}, z_{\phi})$ – напряженность поля от сфокусированной апертуры в точке фокусировки с координатами $(x_{\phi}, y_{\phi}, z_{\phi})$;

$E_0(x_{\phi}, y_{\phi}, z_{\phi})$ – напряженность поля от одиночного излучателя в точке фокусировки с координатами $(x_{\phi}, y_{\phi}, z_{\phi})$.

Для оценки коэффициента скрытности необходимо рассчитать степень превышения напряженности поля создаваемого одиночной антенной над напряженностью поля создаваемого сфокусированной антенной при одинаковой излучаемой мощности по объему пространства за исключением объема области фокусировки, это может быть записано в виде формулы:

$$K_{\text{ск}} = \frac{\iiint_V E_0(x, y, z) dx dy dz - \iiint_V E_{\phi}(x, y, z) dx dy dz - \iiint_{V_{\phi}} E_0(x, y, z) dx dy dz}{\iiint_{V_{\phi}} E_{\phi}(x, y, z) dx dy dz}, \quad (5)$$

где V – объем пространства, в котором производится оценка коэффициента скрытности;

V_{ϕ} – объем области фокусировки.

Численный расчет, а тем более аналитический, формулы (5) чрезвычайно затруднен, особенно для больших объемов и малых значений длины волны. Для упрощения расчетов возможен расчет коэффициента скрытности не по объему, а по одной из координатных осей.

Таким образом, для объемных антенных решеток сфокусированных в зоне ближнего излученного поля:

1. Коэффициент эффективности;
2. Размер и форма области фокусировки;
3. Коэффициент скрытности.

В качестве исходных данных примем следующие значения:

1. Количество излучателей ;
2. Количество уровней расположения излучателей 5;
3. Максимальный радиус цилиндра – 1000 м.;
4. Высота цилиндра – 400 м.;
5. Расстояние до точки фокусировки – 10, 30, 50, 70 и 90 км.

Результаты математического моделирования

В ходе математического моделирования получен ряд численных оценок свойств объемной антенной решетки сфокусированной в зоне ближнего излученного поля. Графики, иллюстрирующие возможность фокусировки излучения электромагнитных полей парциальных излучателей в точке фокусировки, отстоящей от центра антенны на расстояние 10 км по различным координатным осям представлены на рис. 3 – 5.

Как видно из представленных рисунков, область фокусировки имеет вид вытянутого вдоль оси OY эллипсоида. При этом на рис. 5 наблюдаются всплески напряженности поля на относительно небольших расстояниях от области фокусировки. Их значительная амплитуда связана с существенно меньшими значениями вертикального размера объемной антенной решетки по сравнению с горизонтальным размером.

Совместное синфазное воздействие электромагнитных полей, сформированных каждым из N излучателей эквивалентно увеличению мощности сигнала в N раз, а напряженности поля, соответственно в \sqrt{N} раз. Тогда предварительная численная оценка коэффициента эффективности по напряженности будет следующей:

$$K_{\text{эф}} = \sqrt{N} \quad (6)$$

Результаты численного моделирования приведены на рис 6.

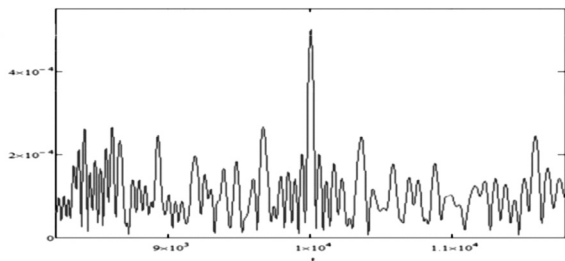


Рис. 3. Распределение напряженности сфокусированного поля вдоль оси OY.

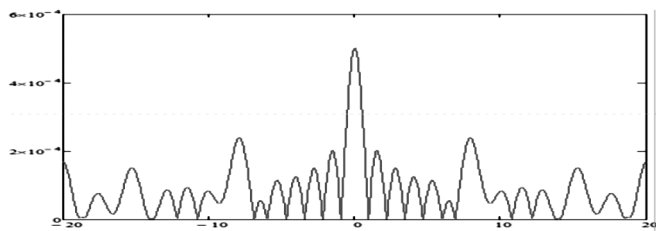


Рис. 4. Распределение напряженности сфокусированного поля вдоль оси OX.

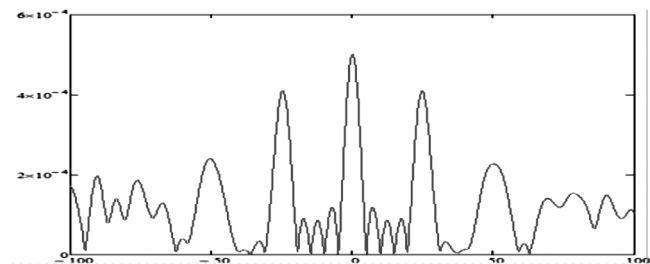


Рис. 5. Распределение напряженности сфокусированного поля вдоль оси OZ.

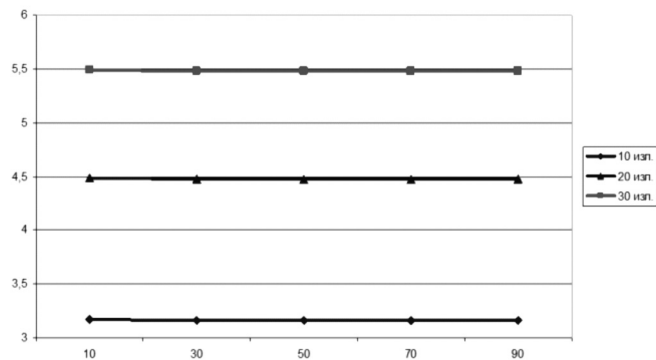


Рис. 6. Коэффициент эффективности при различных расстояниях до точки фокусировки и числе излучателей.

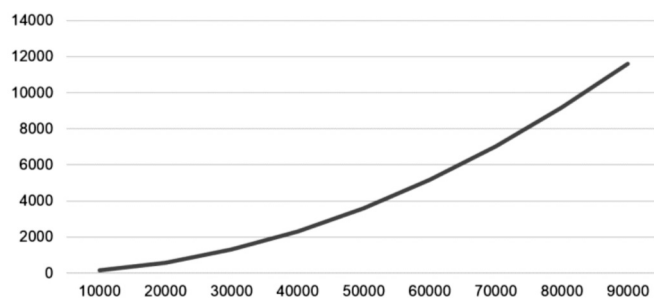


Рис. 7. Зависимость размера области фокусировки вдоль оси OY.

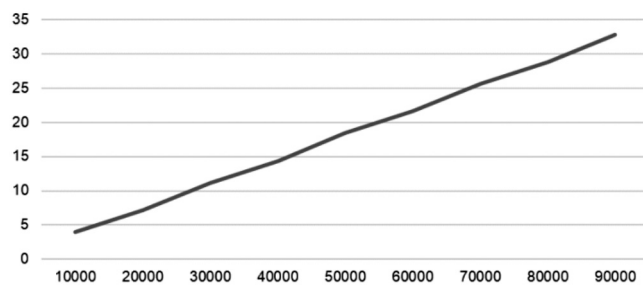


Рис. 8. Зависимость размера области фокусировки вдоль оси OX.

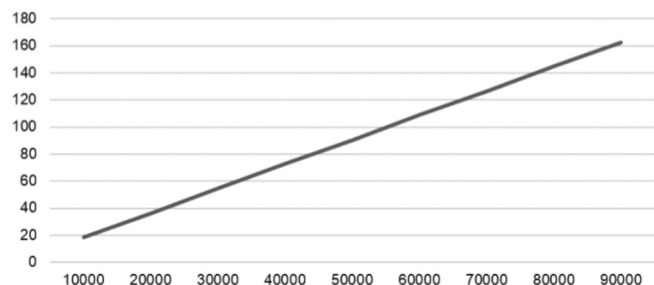


Рис. 9. Зависимость размера области фокусировки вдоль оси OZ.

Согласно данным, приведенным на рис. 6 коэффициент эффективности может быть оценен согласно (6) с достаточной степенью достоверности.

Как отмечалось ранее, область фокусировки представляет собой геометрическое тело, близкое по своей форме к эллипсоиду. Графики, иллюстрирующие зависимость размеров области фокусировки (приведены в долях длины волны) от расстояния до точки фокусировки представлены на рис. 7–9.

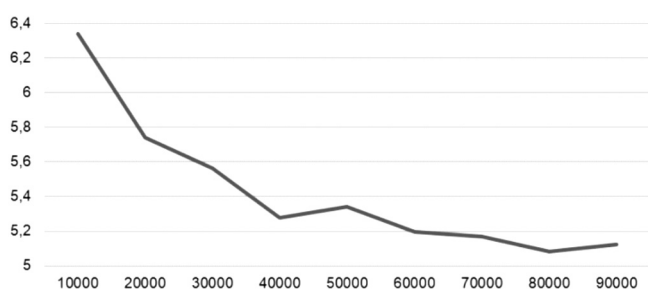


Рис. 10. Зависимость коэффициента скрытности вдоль оси OY.

Как видно из представленных на рис. 7–9 графиков размеры области фокусировки в продольном направлении превышают размеры в поперечном направлении в 100 – 400 раз.

График, иллюстрирующий зависимость изменения коэффициента скрытности вдоль продольной оси OY в зависимости от расстояния приведен на рис. 10.

Выводы по работе

В работе рассматриваются принципы функционирования объемных антенных решеток, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля, предложена реализация математической модели антенной решетки и проанализированы основные свойства сфокусированных апертур. Показано что коэффициент эффективности функционирования сфокусированной апертуры по напряженности поля может быть оценен согласно [6], области фокусировки имеет форму эллипсоида с продольным размером, значительно превышающим поперечный.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15–19–10053).

ЛИТЕРАТУРА

1. Веденькин Д.А. Сфокусированные антенны для систем радиосвязи с группой малоразмерных летательных аппаратов. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. №5. с. 36.
2. Веденькин Д.А., Седельников Ю.Е. Активные сфокусированные антенные решетки для радиотехнических средств малоразмерных летательных аппаратов. Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11. №4. с. 40–46.
3. Веденькин Д.А., Седельников Ю.Е. Сфокусированные антенные решетки на базе беспилотных летательных аппаратов. Глобальный научный потенциал. 2013. № 10 (31). с. 86–88.
4. Веденькин Д.А., Седельников Ю.Е. Параметры разреженных сфокусированных антенных решеток. Наука и бизнес: пути развития. 2013. № 10 (28). с. 56–59.
5. Веденькин Д.А. Сфокусированные антенные решетки в составе радиоэлектронных средств группы малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. Казань, 2012
6. Веденькин Д.А. Сфокусированные антенные решетки в составе радиоэлектронных средств группы малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. Казань, 2012

© Д.А. Веденькин, Ю.Е. Седельников, А.Р. Насыбуллин, Н.В. Рябова, В.А. Иванов, (denis_ved@mail.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

