

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ КРЕСТ-ВИБРАТОРНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

В. А. Цветков, И. В. Алексанова, А. О. Воронько,  
А. В. Князев, С. Г. Кондратьева

*Исследовано взаимное влияние плеч крест-вибратора в составе фрагмента антенной решетки при фазировании в область «ослепления», предложен способ оптимизации процесса настройки крест-вибратора в режиме одновременного излучения обоими плечами.*

*Ключевые слова:* вибраторная антенная решетка, ослепление, крест-вибратор, коэффициент стоячей волны по напряжению.

### Введение

На настоящий момент наиболее распространены два способа измерения согласования излучателя в составе макета антенной решетки (АР). Первый способ представляет собой прямое измерение и последующую подстройку излучателя в составе активного стенда. Главным недостатком данного способа является высокая цена активного стенда, вызванная необходимостью наличия в каждом канале сигнала с управляемой фазой.

Второй метод – расчет по измеренным матрицам рассеяния является экспериментально-расчетным. При этом стоимость значительно снижается, так как на выходах излучателей из состава антенной решетки устанавливаются только согласованные нагрузки. Недостатком данного метода является большой объем измерений, необходимый для расчета коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). Количество последовательных измерений определяется количеством излучателей (при этом для 4-х полноценных колец приближается к 100). В случае двухполяризованного излучателя количество измерений дополнительно увеличивается в два раза. При этом пошаговая настройка при согласовании излучателя по результатам экспериментальной проверки увеличивает общее количество измерений пропорционально числу шагов.

В данной статье показывается, что для двухполяризованных крест-вибраторных антенных решеток на первых шагах настройки взаимного согласования при проверке отсутствия ослепления [1 – 5] на определенных углах сканирования можно не учитывать влияние ортогонального плеча. Показано, что в точке ослепления влияние вибратора другой поляризации несущественно.

### Объект исследования

Объектом исследования является крест-вибраторный излучатель  $L$ -диапазона ( $\lambda \approx 25$  см) в составе антенной решетки, а также характеристики направ-

ленности и взаимные связи между элементами решетки в режиме сканирования.

Исследование проводилось на примере двух видов крест-вибраторов. Первый излучатель изображен на рис. 1 и представляет собой классический крест-вибратор с прямыми плечами.

Длина плеч первого излучателя составляет  $0,85\lambda$ , толщина стоек и плеч  $0,01\lambda$ . Стойки используются для установки плеч вибратора на определенной высоте над экраном. Высота стоек вибраторов составляет  $0,24\lambda$ . Согласование излучателя в решетке с окружением из пяти колец, нагруженных на согласованные нагрузки на исследуемой частоте, составляет 1,01.

Второй излучатель изображен на рис. 2 и представляет собой крест-вибратор с наклонными плечами и директором с диэлектрическим креплением.

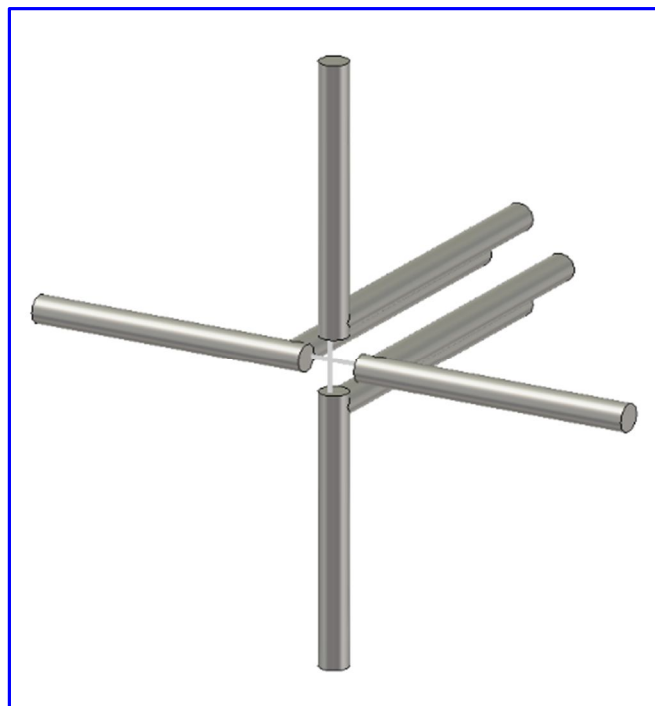


Рис. 1. Излучатель решетки

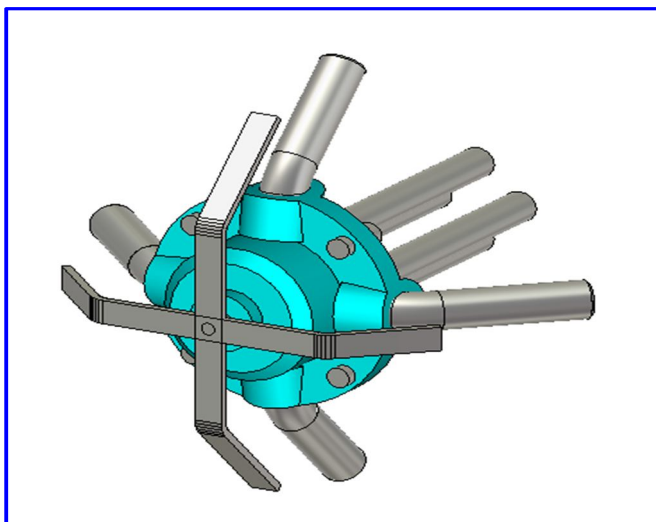


Рис. 2. Крест-вибратор с наклонными плечами и директором

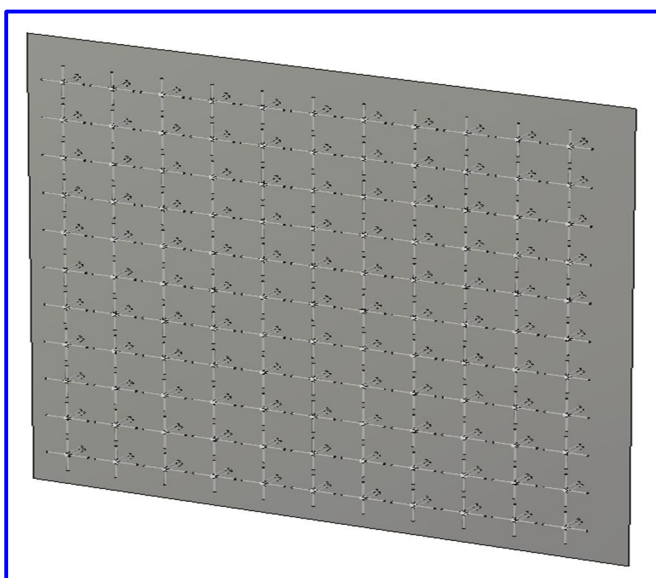


Рис. 3. Решетка  $11 \times 11$

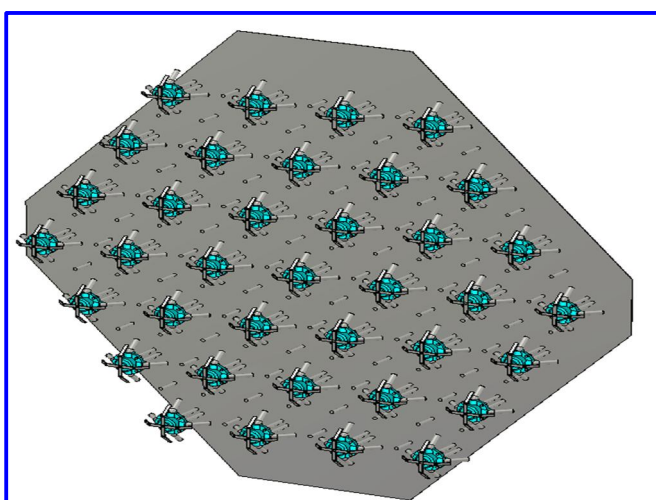


Рис. 4. Треугольная решетка

Угол наклона плеч и директоров составляет  $45^\circ$ . Длина плеч равняется  $0,85\lambda$ , толщина стоек и плеч  $0,03\lambda$ . Высота стоек вибраторов составляет  $0,24\lambda$ . Расстояние от плеч до директора составляет  $0,08\lambda$ . Так как данный излучатель представляет собой один из промежуточных макетов разработанного реального излучателя, его согласование в составе решетки при трех кольцах излучателей окружения, нагруженных на нагрузки с сопротивлением  $R = 50 \text{ Ом}$ , составляет 2,5 на исследуемой частоте.

Первый излучатель (см. рис. 1) исследовался в составе решетки  $11 \times 11$  излучателей, расположенных в узлах прямоугольной сетки (рис. 3). Шаг между излучателями составлял  $0,5\lambda$ .

Второй излучатель (см. рис. 2) исследовался в составе фрагмента решетки из трех колец окружения (см. рис. 4) при расположении излучателей в узлах гексагональной сетки, а также при наличии согласующих металлических штырей, расположенных между излучателями. Расстояние между рядами и столбцами излучателей составляет  $\approx 0,54\lambda$  и  $\approx 0,3\lambda$  соответственно. Высота штырей равна  $0,16\lambda$ .

#### Постановка задачи

Целью работы является поиск области ослепления при фазировании отдельных вибраторов (одной из поляризаций крест-вибраторов) в составе антенной решетки в различных направлениях.

С последующим расчетом согласования отдельных вибраторов в составе антенной решетки, сфазированных в область ослепления. А также исследование влияния ортогонального вибратора одной поляризации излучателя на согласование вибратора второй поляризации в режиме излучения со сдвигом фаз между сигналами, поступающими на их входы  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , и  $270^\circ$  (синфазное, противофазное возбуждение и вращающаяся поляризация). Расчеты проводились на одной частоте.

Исследование проводилось с помощью T-solver в программе электродинамического моделирования CST Microwave Studio [6, 7]. В модели с прямоугольной решеткой (рис. 3) каждый из турникетных вибраторов с прямыми плечами запитывался идеальными портами (Discreteport), расположенными между плечами вибратора, в модели с гексагональной решеткой (рис. 4) каждый излучатель запитывался коаксиальным портом (Waveguideport), расположенным в основании одной из стоек вибратора.

#### Результаты расчетов

В результате расчета парциальных диаграмм направленности (ДН) ослепления обнаружены в

*E*-плоскостях обоих вибраторов для излучателя в прямоугольной решетке (что объясняется симметрией решетки) и в *E*-плоскости у вертикального вибратора излучателя с наклонными плечами. Сечения ДН приведены на рис. 5 и 6. Наличие ослеплений в *E*-плоскости согласуется с данными, полученными в [4, 8]. Для первого излучателя провал в ДН составляет порядка  $-16$  дБ относительно максимума на угле отклонения  $-54^\circ$ .

Для излучателя с наклонными плечами провал в ДН составляет порядка  $-14$  дБ относительно максимума на угле отклонения  $-55^\circ$ .

При фазировке в область ослепления вертикальных вибраторов каждого излучателя результаты расчета суммы отраженного и наведенного сигналов на центральный излучатель составляют  $-1,5$  дБ и  $-0,55$  дБ для первого и второго типа излучателей соответственно.

В модели фрагмент возбуждался следующим образом. Направление фазирования соответствовало области ослепления. На вертикальное плечо каждого излучателя сигнал поступал в соответствии с направлением фазирования, а на горизонтальное плечо в соответствии с направлением фазирования и дополнительным сдвигом. Величины сдвигов варьировались между  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ .

Результаты расчета мощности, наводимой на порт вертикального плеча центрального излучателя при возбуждении всего фрагмента описанным выше способом, приведены в таблице.

Как видно из таблицы, наличие сигнала на горизонтальных плечах излучателей практически не влияет на согласование в вертикальном плече центрального излучателя, что объясняется слабой взаимной связью между вибраторами при фазировке в направлении ослепления.

Для вертикального излучателя с прямыми плечами уровень сигнала, наводимого с ортогональных плечей при фазировании в сторону ослепления, составляет  $-7,82$  дБ, а для вертикального излучателя с наклонными плечами  $-6,57$  дБ.

Из этого можно сделать вывод, что при настройке излучателей антенной решетки в области ослеп-

ления влияние ортогональных вибраторов незначительно и значительно изменить согласование не может, независимо от режима работы излучателя. Как следствие, на первых шагах настройки излучателя, когда необходимо исключить «ослепление» в антенной решетке, достаточно рассматривать согласование различных поляризаций крест-вибраторов независимо друг от друга.

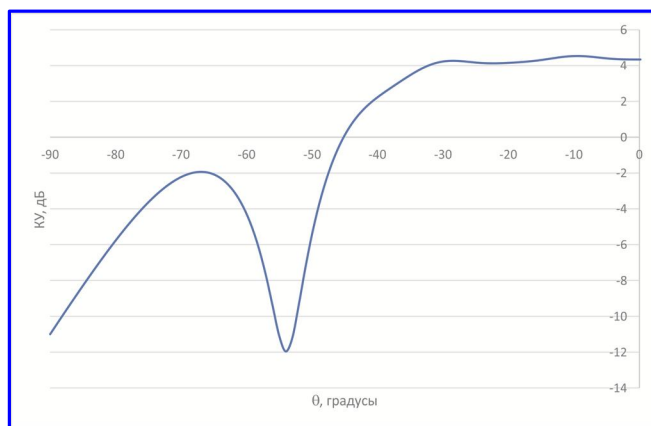


Рис. 5. Диаграмма направленности для каждой из поляризаций излучателя с прямыми плечами в *E*-плоскости

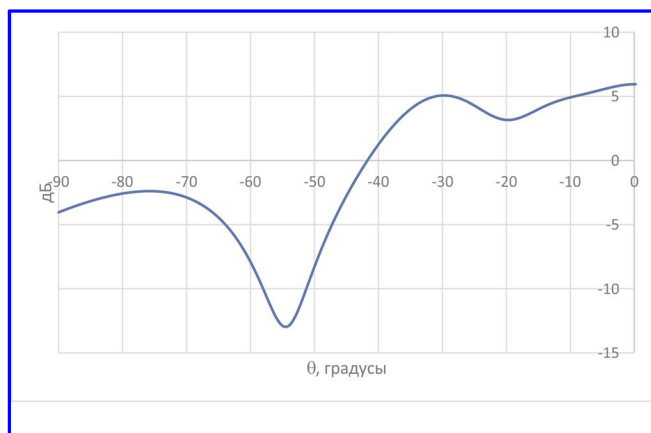


Рис. 6. Диаграмма направленности горизонтального вибратора излучателя с наклонными плечами в *E*-плоскости

Таблица

Результаты расчета мощности, наводимой на порт вертикального плеча центрального излучателя

Сдвиг фаз между вибраторами	Второй вибратор не запитан	$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$
S11 1-го излучатель	$-1,51$ дБ	$-1,51$ дБ	$-1,5$ дБ	$-1,5$ дБ	$-1,51$ дБ
S11 2-го излучатель	$-0,53$ дБ	$-0,52$ дБ	$-0,57$ дБ	$-0,6$ дБ	$-0,5$ дБ

### Заключение

Показано, что в рассмотренных антенных решетках из-за слабой взаимной связи между ортогональными плечами крест-вibratorов при фазировании в область ослепления возможно проводить первоначальную настройку излучателя независимо по отдельным плечам.

### Литература

1. Bhattacharyya A. K. Phased array antennas / A. K. Bhattacharyya. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2006. – 516 p. – DOI: 10.1002/9780470529188.ch7.
2. Mailloux R. J. Phased array antenna handbook. second edition / R. J. Mailloux. – London : Artech House Inc., 2005. – 515 p.
3. Haupt R. L. Antenna Arrays: A Computational Approach / R. L. Haupt. – New York : John Wiley & Sons, 2010. – 534 p. – DOI: 10.1002/9780470937464.
4. Сурков В. И. Расчет vibratorных фазированных антенных решеток с расширенным углом сканирования :

специальность 05.12.07 «Антенны и СВЧ устройства» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сурков Виктор Иванович. – Москва, 1984. – 319 с.

5. Расчет характеристик излучения vibratorных фазированных антенных решеток с учетом влияния опорных стоек / А. И. Богомяков, В. В. Бодров, Г. Т. Марков [и др.] // В сб. научно-методических статей по прикладной электродинамике. – 1980. – Вып. 4. – 240 с. – URL : <http://trudymai.ru/published.php?ID=87134>.
6. CST Microwave Studio [CST STUDIO SUITE] / разработчик Computer Simulation Technology. – URL : [www.cst.com](http://www.cst.com). – Электронная программа : электронная.
7. Курушин А. А. Проектирование СВЧ-устройств в CST STUDIO SUITE / А. А. Курушин. – Москва : Солон-пресс, 2018. – 428 с.
8. Оптимизация широкополосной фазированной антенной решетки с vibratorными излучателями / В. А. Цветков, С. Г. Кондратьева // Труды МАИ : сетевое научное издание. – 2019. – № 108. – DOI: 10.34759/trd-2019-108-6. – URL : <https://trudymai.ru/published.php?ID=109430&mobile=Y>.

Поступила в редакцию 25.10.2021

*Василий Алексеевич Цветков, ведущий инженер, т. +7 (915) 045-15-91, e-mail: vtsvetkov@rti-mints.ru.*  
*Александр Васильевич Князев, инженер 2 категории, т. +7 (929) 414-70-98, e-mail: alknyazev@rti-mints.ru.*  
*Ирина Владимировна Алексанова, начальник сектора, т. +7 (917) 575-73-62, e-mail: ialeksanova@rti-mints.ru.*  
*Андрей Олегович Воронько, техник, т. +7 (963) 605-76-40, e-mail: avoronko@rti-mints.ru.*  
 (АО «РТИ им. академика А. Л. Минца»).

*Светлана Геннадьевна Кондратьева, доцент, кандидат технических наук, доцент, т. +7 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru.*  
 (Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ (НИУ)).

## OPTIMIZATION OF CROSS-DIPOLE ANTENNA ARRAYS MATCHING

V. A. Tsvetkov, I. V. Aleksanova, A. O. Voronko,  
A. V. Kniazev, S. G. Kondratieva

*The article describes the mutual influence of the cross-dipoles arms as part of an antenna array fragment during phasing into the 'blinding' area. A method for optimizing the cross-dipole configuration process in the mode of simultaneous radiation by both arms is proposed.*

**Key words:** dipole antenna array, blinding, cross-dipole, voltage standing-wave ratio.

### References

1. Bhattacharyya A. K. Phased array antennas / A. K. Bhattacharyya. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2006. – 516 p. – DOI: 10.1002/9780470529188.ch7
2. Mailloux R. J. Phased array antenna handbook. second edition / R. J. Mailloux. – London : Artech House Inc., 2005. – 515 p.
3. Haupt R. L. Antenna Arrays: A Computational Approach / R. L. Haupt. – New York : John Wiley & Sons, 2010. – 534 p. – DOI: 10.1002/9780470937464.
4. Surkov V. I. Calculation of dipole phased antenna arrays with an extended scanning angle : : specialty 05.12.07 «Antennas and microwave devices» : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences/ Surkov Viktor Ivanovich. – Moscow, 1984. – 319 с.

5. Calculation of radiation characteristics of dipole phased antenna arrays taking into account the impact of support structure / A. I. Bogomiagkov, V. V. Bodrov, G. T. Markov [et al.] // Included in collected volume of scientific and methodical articles on applied electrodynamics. – 1980. – Issue 4. – 240 p. – URL : <http://trudymai.ru/published.php?ID=87134>.
6. CST Microwave Studio / programmer Computer Simulation Technology. – URL : [www.cst.com](http://www.cst.com). – Electronic program : electronic.
7. Kurushin A. A. Designing microwave devices in CST STUDIO SUITE / A. A. Kurushin. – Moscow : Solon-press, 2018 – 428 p.
8. Optimization of wideband phased antenna array with dipole radiators / V. A. Tsvetkov, S. G. Kondrateva // MAI Proceedings. – 2019. – No. 108. – URL : <https://trudymai.ru/published.php?ID=109430&mobile=Y>.

*Vasilii Alekseevich Tsvetkov, Leading Engineer, tel. +7 (915) 045-15-91, e-mail: [vtsvetkov@rti-mints.ru](mailto:vtsvetkov@rti-mints.ru).*

*Aleksandr Vasilevich Kniazev, 2nd Category Engineer, tel. +7 (929) 414-70-98, e-mail: [alknyazev@rti-mints.ru](mailto:alknyazev@rti-mints.ru).*

*Irina Vladimirovna Aleksanova, Head of Sector, tel. +7 (917) 575-73-62, e-mail: [ialeksanova@rti-mints.ru](mailto:ialeksanova@rti-mints.ru).*

*Andrei Olegovich Voronko, Technician, tel. +7 (963) 605-76-40, e-mail: [avoronko@rti-mints.ru](mailto:avoronko@rti-mints.ru).*

*(JSC 'Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute')*

*Svetlana Gennadevna Kondrateva, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),*

*tel. +7 (915) 042-94-22, e-mail: [kondratieff89@ya.ru](mailto:kondratieff89@ya.ru).*

*(Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)).*