

УДК.621.396.677.3

## **Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями**

**Цветков В.А.<sup>1\*</sup>, Кондратьева С.Г.<sup>2\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца,  
ул. 8 Марта, 10-1, Москва, ,127083, Россия*

<sup>2</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

\*e-mail: [vtsvetkov@rti-mints.ru](mailto:vtsvetkov@rti-mints.ru)

\*\*e-mail: [kondratieff89@ya.ru](mailto:kondratieff89@ya.ru)

**Статья поступила 12.10.2019**

### **Аннотация**

В работе исследовано влияние конструктивных элементов вибраторов и крест-вибраторов плоской антенной решётки на внешние характеристики антенны. Выбраны варианты построения фазированных антенных решёток (ФАР) с наибольшим углом сканирования в диапазоне частот  $\pm 10\%$ .

**Ключевые слова:** вибраторная антенная решётка, ослепление, вибратор, крест-вибратор.

### **Введение**

В настоящее время активно развивается широкополосная радиолокация, которая требует работы фазированной антенной решётки (ФАР) РЛС в широком диапазоне частот. Разработка широкополосных ФАР является непростой задачей. В случае вибраторной ФАР задача усложняется наличием в ней «ослепления». Под

«ослеплением» будем понимать резкое падение КУ в секторе сканирования антенной решётки (АР).

В [1-5] рассматривались причины ослепления, свойства ослепления и способы борьбы, однако в [1-3] рассматривались примеры с печатными антенными решётками, а в [4] и [5] не рассматривалось ослепление в диапазоне частот. В отличие от [6] теоретически рассчитать параметры поверхностной волны, влияющей на ослепление в трехмерных вибраторных АР достаточно проблематично, поэтому исследование будет проводиться с помощью электродинамического моделирования.

В данной работе будут исследованы плоские антенные решётки (ПАР), состоящие из вибраторов и крест-вибраторов, ослепление в них и максимальная ширина угла сканирования при выбранном уровне коэффициента усиления (КУ), а также уровне излучения вдоль экрана. По результатам исследования будет сделан вывод об оптимальной конструкции ПАР с рабочей полосой частот  $\pm 10\%$ .

### **Постановка задачи**

Исследование проводилось с помощью электродинамического моделирования в программе CST Microwave Studio [7], [8], [9]. Объектом исследования являлась решётка из 121 ( $11 \times 11$ ) излучателя. Излучатель представлял собой вибратор или крест-вибратор, установленный на стойках над экраном конечным прямоугольным экраном размерами  $11\lambda \times 11\lambda$ . Высота стоек вибраторов и шаг между вибраторами составляет  $0,5\lambda$ . Согласование проходило в свободном пространстве над бесконечным экраном на центральной частоте. Излучатели запитывались идеальным генератором, расположенным между стойками излучателей.

Для определения характеристик АР решётки использовалась парциальная ДН центрального излучателя.

Целью работы является поиск оптимальной конструкции ПАР с сектором сканирования  $\pm 60^\circ$  в полосе частот  $\pm 10\%$ . Так как КНД элемента решётки с плоским раскрывом и шагом  $0,5\lambda$  согласно [10], [11], [12] составляет порядка 5 дБ, то критерием оценки конструкции ПАР будет являться ширина парциальной ДН с коэффициентом усиления (КУ) центрального излучателя по абсолютному уровню 0 дБ и его уровень излучения вдоль экрана решётки, который не должен превышать - 10 дБ во всём диапазоне частот.

В первых двух частях для исследования в решётке будет использоваться излучатель, согласованный в свободном пространстве.

Сначала будет проведено сравнение ослепления в ПАР и в ЛАР, а также поведение ослепления в зависимости от конструкции АР.

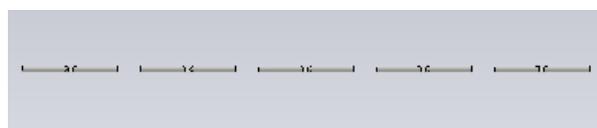
Далее будут сопоставлены разные конструкции вибраторных и крест-вибраторных ПАР и выбраны наиболее перспективные варианты.

В конце будут оптимизированы излучатели в полученных вариантах и рассчитаны их наихудшие КСВ при сканировании.

Как было показано в [3], [4] «ослепление» возникает в вибраторных АР при сканировании в Е-плоскости. Поэтому для оценки ширины ДН использовались сечения в Е-плоскости как обладающие «ослеплением» и наименьшей шириной ДН.

## Ослепление в ЛАР и ПАР

Для сравнения ослепления в линейной и плоской АР использовалась модель Е-плоскостная ЛАР из 11 излучателей с шагом  $0,5\lambda$ , и ПАР, составленную из 11 таких ЛАР с шагом  $0,5\lambda$ , рисунок 1. Для наибольшей наглядности выбрана нижняя частота диапазона.



а) Фрагмент ЛАР



б) Фрагмент ПАР

Рисунок 1. Фрагменты ЛАР и ПАР, вид сверху.

На рисунке 2 приведены графики с парциальными ДН этих ЛАР и ПАР на частоте  $F_{ср-10\%}$ .

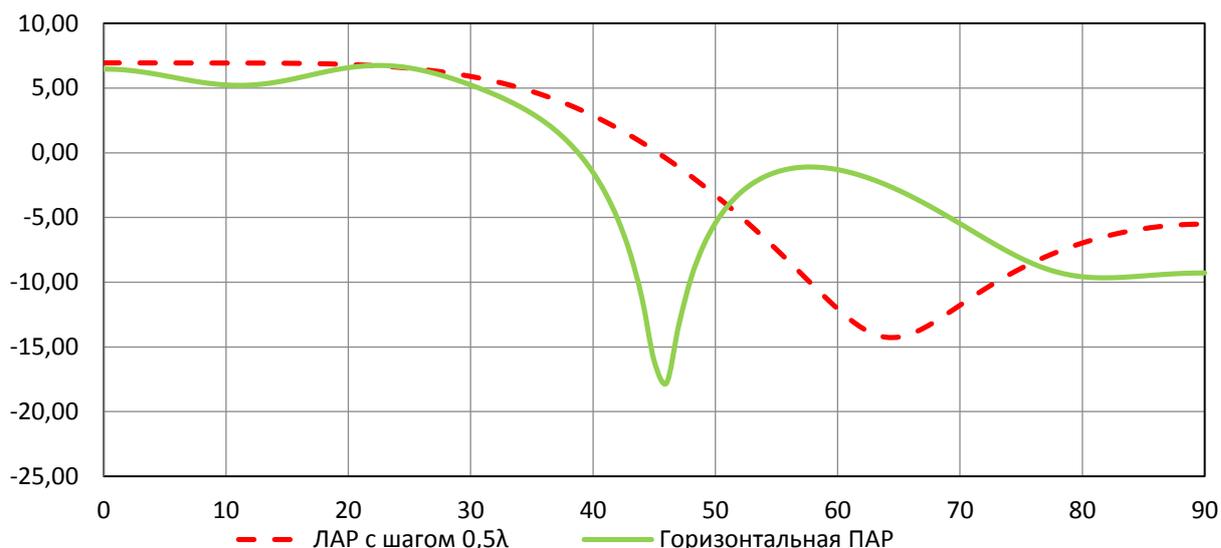


Рисунок 2. Парциальные ДН в Е-плоскостной ЛАР и ПАР на частоте  $F_{ср}$ -10%.

Из рисунка видно, что ослепление в ПАР проявляется более выражено чем в ЛАР – провал в парциальной ДН находится ближе к нормали раскрыва.

### Выбор конструкции ПАР

Первым шагом для поиска оптимальной конструкции АР является выбор положения излучателей относительно краёв решётки. В первом варианте плечи вибратора будут располагаться вдоль будет одного из краёв решётки (рисунок 3.а), во втором – под углом  $45^\circ$  к краям решётки (рисунок 3.б), что фактически является решёткой с треугольной сеткой, повернутой на  $45^\circ$ . Сравнение будет проводится на примере АР с вибраторными излучателями.



а. Вибраторная АР с плечами,

расположенными вдоль края решётки

(горизонтальная).



б. Вибраторная АР с плечами,

расположенными под углом  $45^\circ$  к

краям решётки (диагональная).

Рисунок 3. Варианты плоской АР, вид сверху.

На рисунке 4 приведены парциальные ДН горизонтальной и диагональной ПАР.

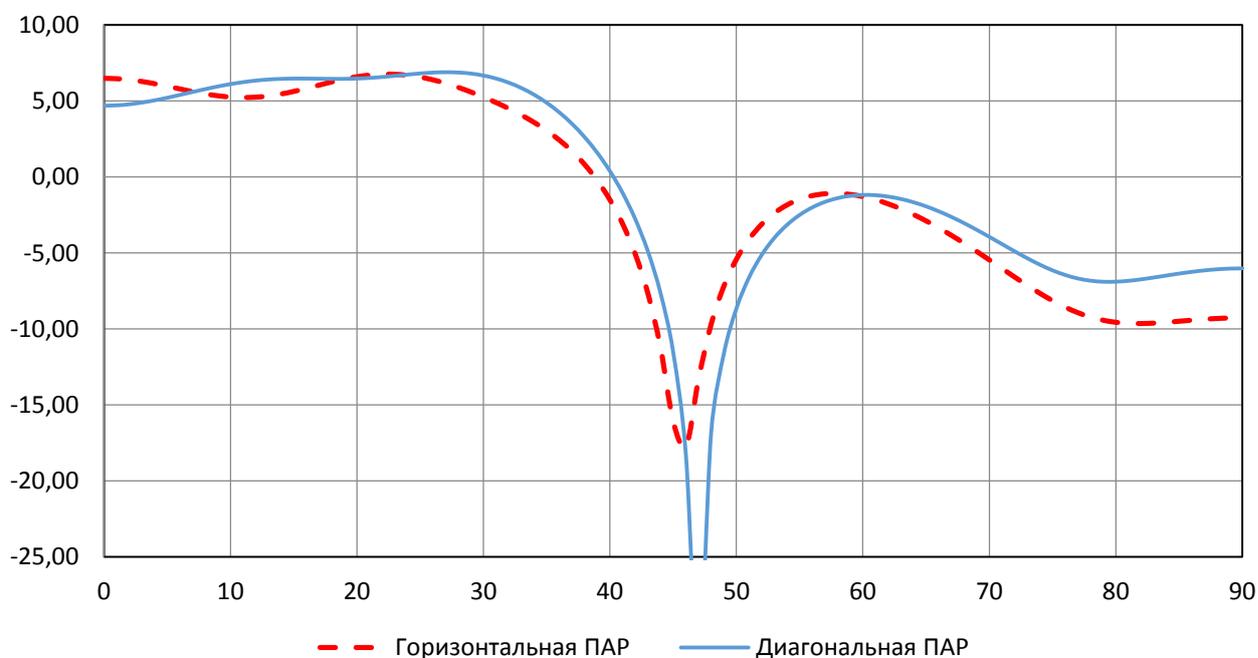


Рисунок 4. Парциальные ДН горизонтальных и диагональных ПАР на частоте  $f_{ср}$  10%.

Из рисунка видно, что у диагональной ПАР провал находится на  $2^\circ$  дальше от нормали чем и горизонтальной. Так же с учётом того, что второй вариант удобнее для расположения штырей и взаимная связь между излучателями меньше, то в дальнейшем будет рассматриваться конструкция с диагонально расположенными вибраторами.

### Ослепление в ПАР с разными вариантами излучателей

Для отображения изменения ослепления в зависимости от конструкции излучателя приведём парциальные ДН решёток с тремя различными видами излучателей: вибратором (рисунок 5.а), крест-вибратором (рисунок 5.б) и промежуточным вариантом – крест-вибратором без стоек у ортогонального вибратора (рисунок 5.в).



а. Вибраторный излучатель

б. Крест-вибраторный

в. Промежуточный

излучатель.

вариант

Рисунок 5. Типы вибраторных излучателей.

Парциальные ДН для АР, состоящих из этих излучателей приведены на рисунке 6.

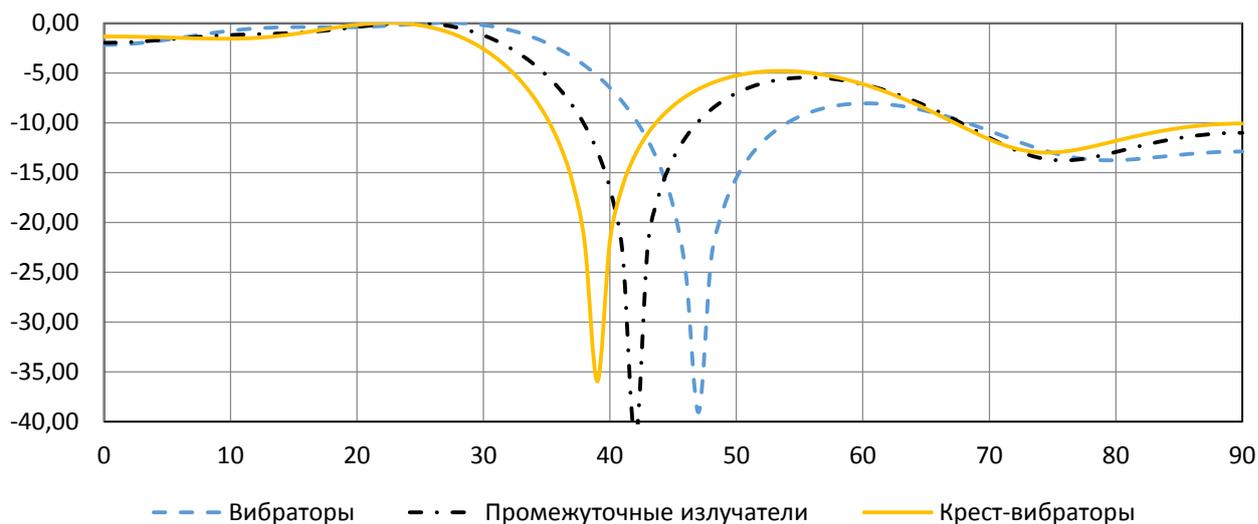


Рисунок 6. Парциальные ДН в Е-плоскостной ЛАР и ПАР с плечами, ориентированными вдоль края решётки на частоте  $F_{cp}-10\%$ .

Как видно из рисунка, переход от вибраторного излучателя к крест-вибраторному значительно влияет на ослепление в АР, приближая его к нормали.

### Выбор оптимальной конструкции ПАР

Рассмотрим несколько способов борьбы с ослеплением. Первый способ – это добавление штырей (рисунок 7.а) [13]. Штыри могут быть укороченные ( $<0,2\lambda$ ), резонансные ( $\approx 0,2\lambda$ ) и удлиненные ( $>0,2\lambda$ ). Второй способ борьбы с ослеплением – наклон плеч у вибраторов на  $45^\circ$  (рисунок 7.б) [14]. Помимо этого, будет рассматриваться комбинация этих способов.

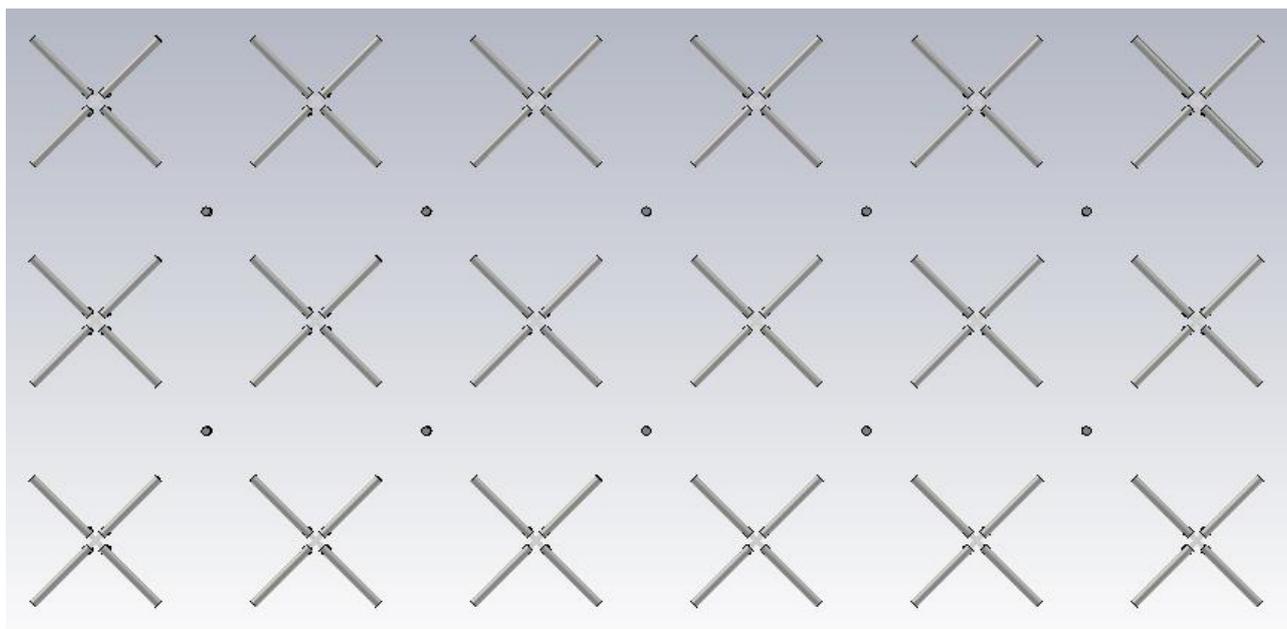


Рисунок 7.а. Добавление штырей в ПАР.



Рисунок 7.б. АР с наклонными плечами.

В качестве начальной высоты штыря была взята высота, обеспечивающая нулевое реактивное сопротивление при запитке его идеальным генератором у экрана и  $\approx 0.2\lambda_{\text{ср}}$ .

Критерием отбора наиболее перспективных вариантов будет ширина ДН по уровню -3 дБ. Будут отобраны четыре варианта с наибольшей шириной ДН (по одному с прямыми и наклонными плечами для вибраторной и крест-вибраторной АР).

В таблице 1 приведены результаты моделирования всех описанных вариантов построения ФАР.

Таблица 1. Значение ширины ДН по уровню 2 дБ.

		Вибраторная ФАР		Крест-вибраторная ФАР	
		Минимальная ширина ДН в полосе частот, °	Максимальный уровень излучения вдоль экрана	Минимальная ширина ДН в полосе частот, °	Максимальный уровень излучения вдоль экрана
Прямые плечи	Без штырей	76	-14	62,4	-12
	Высота штыря $0,1 \lambda_{\text{ср}}$	-	-	68,6	-12
	Высота штыря $0,125 \lambda_{\text{ср}}$	82,8	-14	75,4	-15
	Высота штыря $0,15 \lambda_{\text{ср}}$	90,6	-13	82,9	-13
	Высота штыря $0,175 \lambda_{\text{ср}}$	80,3	-9	103,4	-6
	Высота штыря $0,2 \lambda_{\text{ср}}$	104,1	-6	104,3	-4
	Высота штыря $0,225 \lambda_{\text{ср}}$	106,3	-12	105,1	-11
	Высота штыря $0,25 \lambda_{\text{ср}}$	26,8	-12	100,8	-12
	Высота штыря $0,275 \lambda_{\text{ср}}$	22,5	-13,5	101,8	-12
	Высота штыря $0,3 \lambda_{\text{ср}}$	-	-	24,5	-15
Наклонные плечи	Без штырей	82,5	-17	82,5	-15
	Высота штыря $0,1 \lambda_{\text{ср}}$	85,6	-15	83,4	-13
	Высота штыря $0,125 \lambda_{\text{ср}}$	80	-12	80	-11
	Высота штыря $0,15 \lambda_{\text{ср}}$	78,4	-9	80,3	-8
	Высота штыря $0,175 \lambda_{\text{ср}}$	26,7	-8	36	-10
	Высота штыря $0,2 \lambda_{\text{ср}}$	102,5	-4,5	97,4	-5
	Высота штыря $0,225 \lambda_{\text{ср}}$	76,2	-15	92,5	-15
	Высота штыря $0,25 \lambda_{\text{ср}}$	22,3	-18	23	-15
	Высота штыря $0,275 \lambda_{\text{ср}}$	20,8	-19	18	-15

Серым цветом в таблице 1 выделены излучатели для дальнейшей оптимизации с наибольшей шириной ДН и с уровнем бокового излучения вдоль экрана не более - 10 дБ. Для вибраторной АР это вариант с прямыми плечами и высотой штырей  $0,225\lambda_{cp}$  и вариант с наклонными плечами и высотой штырей  $0,1\lambda_{cp}$  с ширинами  $106,3^\circ$  и  $85,6^\circ$  соответственно. Для крест-вибраторной АР это вариант с прямыми плечами и высотой штырей  $0,225\lambda_{cp}$  и вариант с наклонными плечами и высотой штырей  $0,225\lambda_{cp}$  с ширинами  $105,1^\circ$  и  $92,5^\circ$  соответственно.

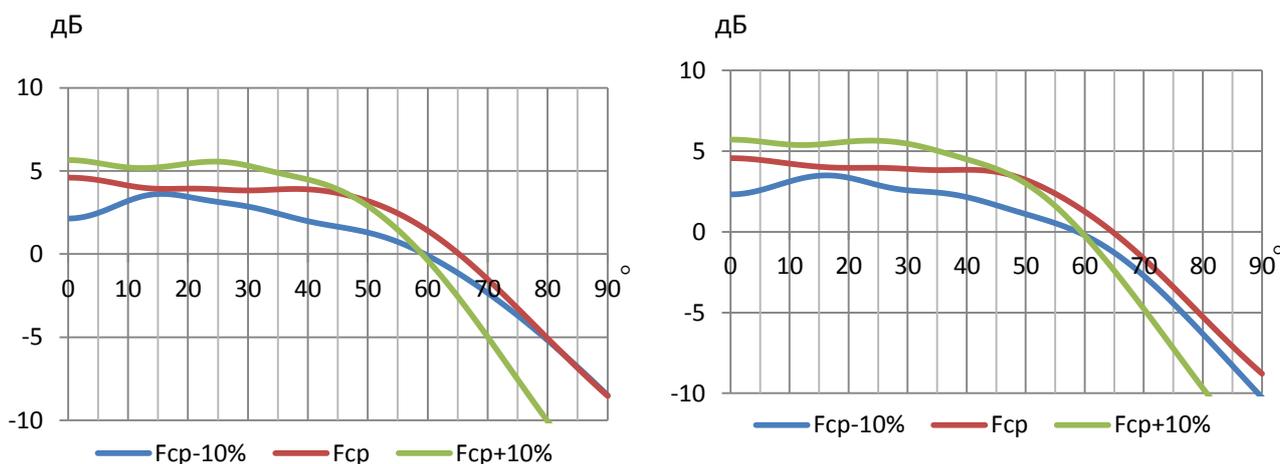
Достаточно большой уровень излучения вдоль экрана практически у многих вариантов АР, по-видимому, объясняется тем, что штыри начинают переизлучать энергию вдоль экрана хотя бы на части частот диапазона и подбор высоты штыря нуждается в особом внимании.

### **Оптимизация по ширине ДН и КСВ**

На заключительном этапе была проведена оптимизация выбранных вариантов с целью получить вариант решётки с максимально широкой ДН во всём диапазоне частот. В качестве критерия оптимизации выбиралась максимальная ширина ДН по уровню КУ 0 дБ. При оптимизации изменялась длина плеча, высота стоек вибраторов и сопротивление генератора.

По результатам оптимизации установлено, что наилучшим вариантом построения вибраторной и крест-вибраторной АР является вариант с прямыми плечами и штырями с высотой  $0,225\lambda_{cp}$ . Ширина ДН по КУ 0 дБ в диапазоне частот  $\pm 10\%$  составила не менее  $118,4^\circ$  для вибраторной АР и  $118,2^\circ$  для крест-вибраторной АР.

Максимальное значение КСВ в полосе частот в диапазоне сканирования в вибраторной АР составило 3,3. Для крест-вибраторной АР максимальное значение КСВ также составило 3,3. Результирующие парциальные ДН приведены на рисунке 8.



а. Парциальные ДН для вибраторной АР.

б. Парциальные ДН для крест-вибраторной АР.

Рисунок 8. Результирующие парциальные ДН для оптимизированной АР.

В заключении стоит отметить, что, во-первых, в [15], [16], [17] более предпочтительным с точки зрения широкоугольного согласования излучателей являются варианты с наклонными плечами, однако в ней подробно не рассматривались ДН в диапазоне частот. Во-вторых, в работе не был исследован другой способ улучшения диапазонных свойств вибраторных АР – изменение формы плечей вибраторов и применение метаматериалов, которые обещают согласование вибраторных антенных решёток в более широком диапазоне частот [18], [19], [20].

## Выводы

1. Ослепление в вибраторных ПАР проявляется сильнее чем в вибраторных ЛАР.
2. Оптимальное положение плечей вибратора – под углом  $45^\circ$  к сторонам решётки.
3. В классических вибраторных АР без штырей и с прямыми плечами излучателей переход от вибраторного излучателя к крест-вибраторному значительно влияет на ослепление в АР, приближая его к нормали.
4. При проектировании ФАР с дополнительными согласующими элементами в виде штырей необходимо учитывать их переотражение во всей полосе частот.
5. Наибольшая минимальная ширина ДН достигается при прямых плечах с высотой штырей  $\approx 0,225\lambda_{cp}$  для вибраторной АР и при прямых плечах с высотой штырей  $\approx 0,225\lambda_{cp}$  для крест-вибраторной АР и. В случае вибраторной АР полученная минимальная ширина ДН по уровню 0 дБ составляет  $118,4^\circ$ . Для крест-вибраторной АР полученная минимальная ширина ДН составляет  $118,2^\circ$ . Для обоих случаев максимальное КСВ составляет 3,3.

## Библиографический список

1. Bhattacharyya A.K. Phased array antennas, New York, John Wiley & Sons Inc., 2006, 516 p. DOI: 10.1002/9780470529188.ch7

2. Mailloux R.J. Phased array antenna handbook, London, Artech House Inc., 2005, 515 p.
3. Haupt R.L. Antenna Arrays: A Computational Approach, New York, John Wiley & Sons, 2010, 534 p. DOI: 10.1002/9780470937464.
4. Сурков В.И. Расчёт вибраторных фазированных антенных решёток с расширенным углом сканирования: Дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 2007. - 231 с
5. Богомялков А.И., Бодров В.В., Марков Г.Т., Старостенко Б.А. Расчёт характеристик излучения вибраторных фазированных антенных решёток с учётом влияния опорных стоек. Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. Вып. 4. – М.: Высшая школа, 1980. С. 164 - 207.
6. Ястребцова О.И. Условия отсутствия «ослепления» у микрополосковых антенных решеток // Труды МАИ. 2014. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87134>
7. CST Microwave Studio. URL: [www.cst.com](http://www.cst.com)
8. Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. – М.: Солон-пресс, 2018. – 428 с.
9. Юрцев А.О., Бобков Ю.Ю., Кизищенко В.В., Юбко А.П., Герасимович Г.В. Моделирование антенн в режимах излучения и рассеяния в пакетах CST Studio, HFSS, FEKO и узкоспециализированных программах. – Минск: БГУИР, 2012. – 62 с. URL: [https://www.bsuir.by/m/12\\_100229\\_1\\_85515.pdf](https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_85515.pdf)
10. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. - М.: Энергия, 1975. – 528 с.
11. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ. - М.: Советское радио, 1969. Т. 2. - 496 с.

12. Воскресенский Д.И. Проектирование фазированных антенных решёток. - М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
13. Сурков В.И. Влияние согласующих штырей на параметры вибраторных ФАР // Труды Московского энергетического института. 1981. Вып. 553. С. 40 – 44.
14. Бодров В.В., Володина И.В., Чистякова И.А. Математическое моделирование вибраторных излучателей с наклонными и пересекающимися проводниками в составе ФАР // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1987. Т. 30. № 2. С. 49 - 53.
15. Инденбом М.В. Антенные решётки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчёт, конструкции. – М. Радиотехника, 2015. – 416 с.
16. Инденбом М.В., Филиппов В.С. Анализ и оптимизация директорных излучателей в плоской ФАР // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1979. Т. XXII. № 2. С. 34 - 41.
17. Бодров В.В., Сурков В.И. Широкоугольное согласование вибраторной ФАР. Сборник статей «Антенны» № 33. - М.: Радио и связь, 1986. - 102 с.
18. Хансен Р.С. Фазированные антенные решётки. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
19. Ашихмин А. В., Быков К. А., Пастернак Ю. Г., Першин П. В., Рембовский Ю.А. Вариант реализации многолучевой антенной решетки для диапазона частот 8 – 18 ГГц с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана // Антенны. 2019. № 2 (256). С. 28 – 38.
20. Кондратьева С.Г. Двухчастотная фазированная мобильная антенная решётка РЛС L-диапазона: дисс. канд. техн. наук. - М.: МАИ, 2015. -20 с.