

*Лайко К.А., Филимонова Ю.О., Урванцева Е.О.
Новосибирский государственный технический университет*

Оптимизация коэффициента использования поверхности раскрыва Дольф-Чебышевских антенных решеток

В статье рассмотрен вопрос оптимальности Дольф-Чебышевских амплитудных распределений линейных антенных решеток по критерию максимальной оценки коэффициента использования поверхности раскрыва для заданного уровня боковых лепестков. Проведен анализ данных распределений по указанному критерию в зависимости от длины антенной решетки и уровня боковых лепестков. Получены характеристики, позволяющие определить оптимальную длину антенной решетки, для заданного уровня боковых лепестков и соответствующее им значение коэффициента использования поверхности раскрыва. Представлен сравнительный анализ Дольф-Чебышевских амплитудных распределений с распределением «косинус в квадрате на пьедестале».

Ключевые слова: Антенные решетки, уровень боковых лепестков, Дольф-Чебышевские амплитудные распределения, коэффициент использования поверхности раскрыва, распределение «косинус в квадрате на пьедестале».

Известным фактом является то, что работу антенного устройства определяет его диаграмма направленности (ДН), поэтому от характеристик ДН требуются достижения определенных условий, таких как: конкретная форма ДН, уровень боковых лепестков (УБЛ), коэффициент направленного действия (КНД) и т. д. Форма ДН антенных решеток (АР) определяется амплитудным распределением. Наиболее известны амплитудные распределения типа «косинус», «косинус в квадрате на пьедестале», «равномерное», «Тейлоровское», «Дольф-Чебышевское» (ДЧ) [1-5]. Одним из критериев выбора амплитудного распределения является получение максимально возможного КНД для заданного УБЛ. При фиксированных размерах апертуры антенны КНД однозначно определяется коэффициентом использования поверхности раскрыва (КИПР).

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \Rightarrow D = \text{const} \times v,$$

где: D - КНД, S - геометрическая площадь антенны, λ - длина волны, v - КИПР.

Следовательно, выбранное (синтезированное) амплитудное распределение должно обладать максимальным КИПР для заданного УБЛ.

Перед разработчиками антенных систем радиотехнических комплексов стоит задача увеличения КИПР для заданных характеристик направленности. В свою очередь увеличение КИПР при сохранении заданного КНД позволяет уменьшить геометрические размеры излучающей системы и уменьшить ее стоимость.

Рассмотрим Дольф-Чебышевское амплитудное распределение и распределение «косинус в квадрате на пьедестале». ДН с Дольф-Чебышевскими амплитудными распределениями имеют «минимум ширины главного луча для заданного УБЛ, или

минимум УБЛ для заданной ширины главного луча». Данный критерий обоснован и доказан в работах [1, 3-5]. Как показано в [6] ширина луча не всегда однозначно связана с КИПР, а, следовательно, и с КНД. Увеличение КИПР всегда приводит к сужению главного луча ДН АР при фиксированных габаритных размерах. В то время как сужение главного луча ДН АР не всегда приводит к увеличению КИПР.

Целью данной статьи является исследование распространенных амплитудных распределений на оптимальность по критерию максимального значения КИПР для заданного УБЛ в зависимости от длины АР и требуемого УБЛ.

Проведем исследование зависимости КИПР Дольф-Чебышевских линейных антенных решеток для заданного УБЛ ($\xi = -20, -25, -30, -35, -40$ дБ) от их длины. На рис. 1 представлены зависимости КИПР Дольф-Чебышевских амплитудных распределений от длины для различных УБЛ. Рассматривались эквидистантные антенные решетки с шагом $d=0.5\lambda$.

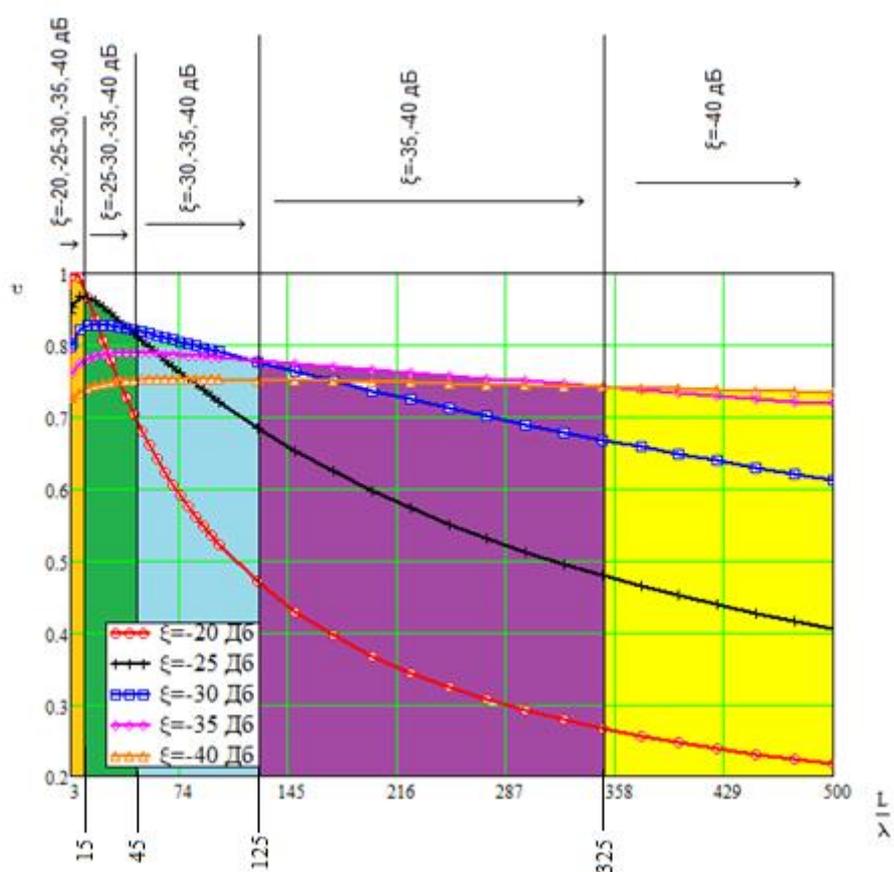


Рис.1. Зависимость КИПР Дольф-Чебышевских линейных АР для заданного УБЛ -25, -20,-30, -35,-40 дБ.

По представленному графику рис.1 видно, что значение КИПР Дольф-Чебышевских АР при заданном УБЛ уменьшается с увеличением длины АР, следовательно, чем меньше длина АР, тем большим значением КИПР может обладать антенная система. Крутизна спада характеристики КИПР от длины АР зависит от УБЛ. Чем больше УБЛ, тем больше крутизна спада КИПР. Для низких боковых лепестков (БЛ) (менее -40 дБ) КИПР практически не изменяется с увеличением длины.

Исследовав полученную зависимость рис.1. для Дольф-Чебышевских АР длиной до 500λ и определив на каких длинах и при каком значении БЛ выигрыш по КИПР больше, можно утверждать следующее: на длинах до 15λ можно работать с любым УБЛ (-20,-25,-30,-35 и -40 дБ); на длинах от 15λ до 45λ нужно исключить УБЛ равный -20 дБ, так как КИПР при УБЛ -20 дБ –минимальный; на длинах 45λ до 125λ следует исключить УБЛ -20 и -25 дБ; на длинах от 125λ до 325λ следует исключить УБЛ -20,-25и -30 дБ, и работать с УБЛ равным -35 и -40 дБ; на длине от 325λ до 500λ следует использовать УБЛ – 40 дБ.

Так как Дольф нашел решение задачи как для прямой постановки так и для обратной, то проведем анализ обратный предыдущему, исследуем как влияет изменение УБЛ в ДЧ АР на КИПР при заданной длине АР.

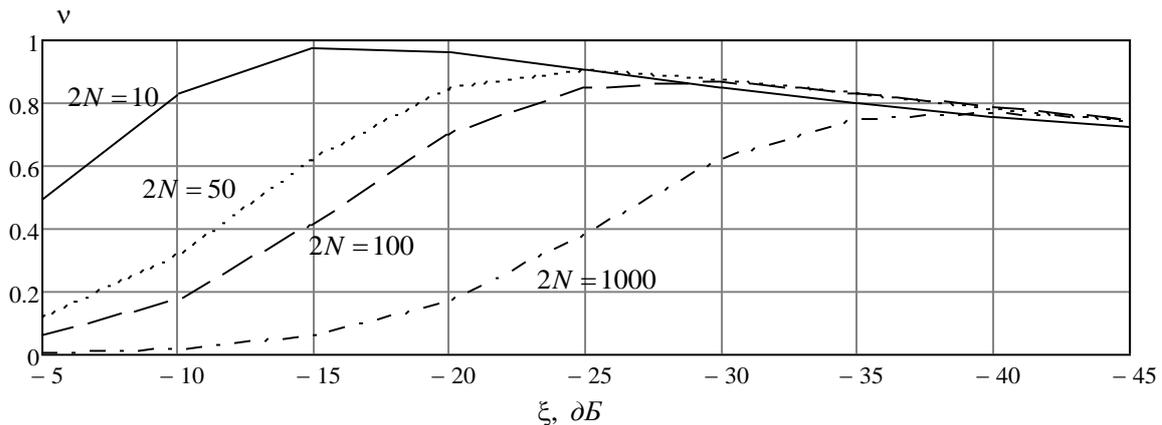


Рис.2. Зависимость КИПР Дольф-Чебышевских амплитудных распределений от УБЛ для различных длин АР.

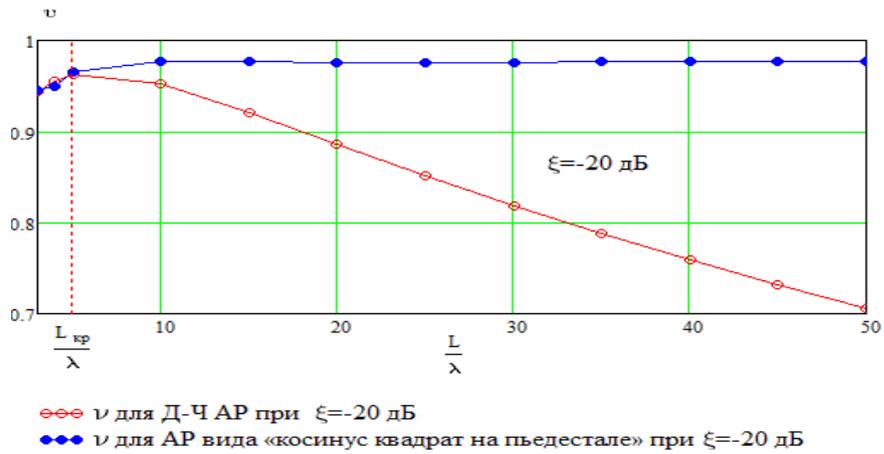
Из приведенного рис.2 следует наличие оптимума по КИПР, который зависит от длины АР. Чем длиннее АР, тем оптимальное значение по КИПР достигается на более низких УБЛ. К примеру, для АР длиной $L=5\lambda$ максимальный КИПР $\nu=0.975$ достигается при УБЛ $\xi=-15$ дБ, для АР $L=50\lambda$ максимальный КИПР $\nu=0.866$ достигается при УБЛ $\xi=-25$ дБ. Очевидно, что Дольф-Чебышевские амплитудные распределения оптимальны по рассмотренному критерию для реальных АР длиной менее 50λ только в области низких БЛ менее – 30 дБ (в области точки перегиба на рис.2)

График (рис.2) позволяет оценить значение КИПР для заданного УБЛ и длины АР. К примеру, для УБЛ $\xi=-35$ дБ данные сведены в табл. 1

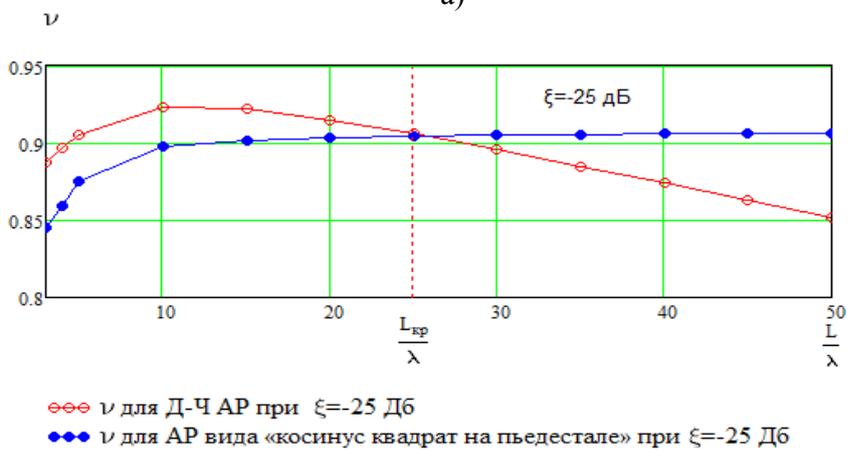
Таблица 1. Зависимость коэффициента использования поверхности раскрыва от длины АР.

УБЛ: $\xi=-35$ дБ	
Длина АР	КИПР
$L = 5\lambda$	$\nu = 0.799$
$L = 25\lambda$	$\nu = 0.830$
$L = 50\lambda$	$\nu = 0.832$
$L = 500\lambda$	$\nu = 0.749$

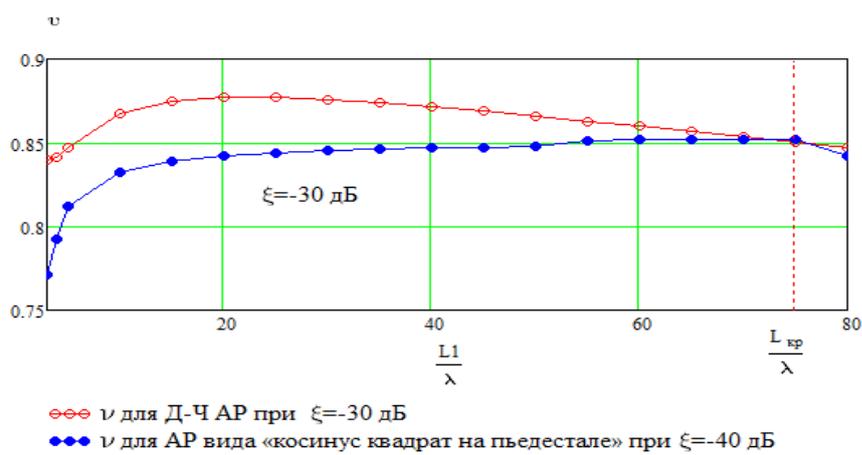
Проведем сравнительный анализ Дольф-Чебышевских амплитудных распределений «косинусом в квадрате на пьедестале» Для эквидистантной АР с шагом $d=0.5\lambda$ при УБЛ (ξ) равном - 20,-25,-30,-35 и -40 Дб. Результаты измерений представим в виде графиков.



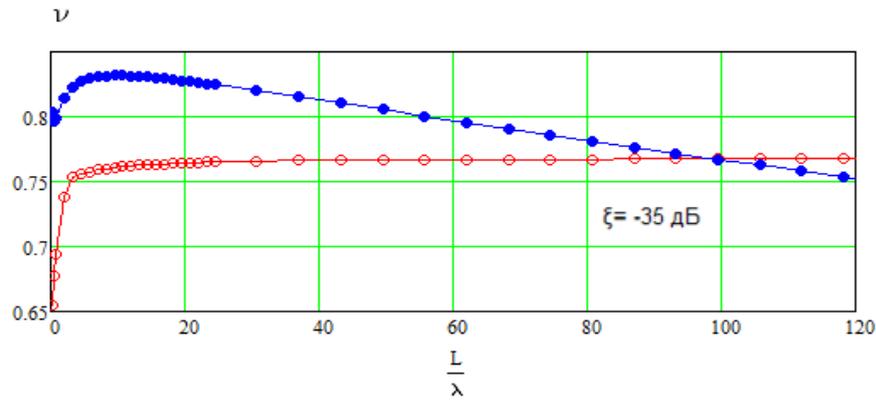
а)



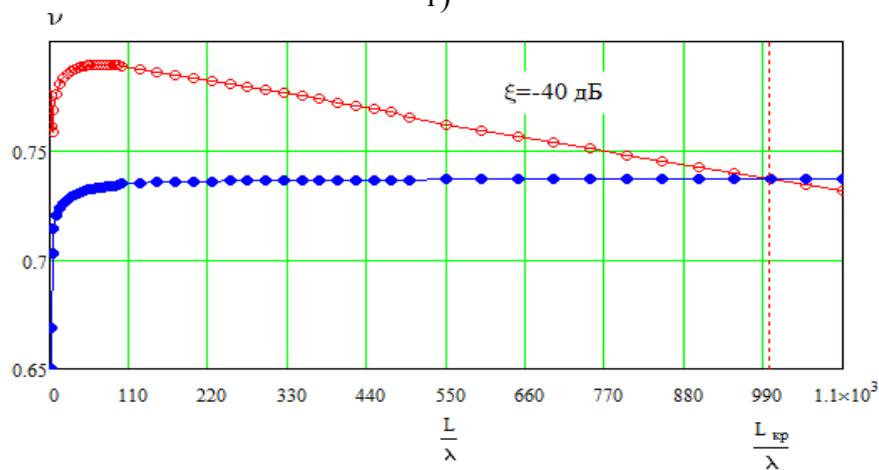
б)



в)



○ ○ ν для Д-Ч АР при $\xi = -35$ дБ
 ● ● ν для АР вида «косинус квадрат на пьедестале» при $\xi = -35$ дБ
 г)



○ ○ ν для Д-Ч АР при $\xi = -40$ дБ
 ● ● ν для АР вида «косинус квадрат на пьедестале» при $\xi = -40$ дБ
 д)

Рис.3. Зависимость КИПР от длины эквидистантной АР для разных амплитудных распределений при заданном УБЛ
 а) -20 дБ; б) -25 дБ; в) -30 дБ; г) -35 дБ; д) -40 дБ.

Сравнительный анализ, представленных на рис. 3, зависимостей КИПР от длины АР для разных видов амплитудных распределений и УБЛ показывает, что длина АР, при которой существует выигрыш Дольф-Чебышевских амплитудных распределений, напрямую зависит от УБЛ. Так для УБЛ $\xi = -30$ дБ выигрыш по КИПР Дольф-Чебышевских амплитудных распределений имеет место при длине АР $L < L_{кр} = 75\lambda$; для $\xi = -40$ дБ выигрыш сохраняется при длине АР $L < L_{кр} = 1000\lambda$.

Таблица 2. Связь УБЛ и критической длины АР

ζ , дБ	-20	-25	-30	-35	-40
$L < L_{кр}$,	5λ	25λ	75λ	100λ	1000λ

В табл.2. показана связь оптимальной длины АР ($L < L_{кр}$), при которой Дольф-Чебышевские амплитудные распределения являются оптимальными по рассматриваемому критерию, т.е. обладают максимальным КИПР для заданного УБЛ. К примеру, Дольф-Чебышевские распределения для УБЛ $\xi = -30$ дБ оптимальны до длины

АР 75λ , а при больших длинах целесообразнее использовать распределение «косинус в квадрате на пьедестале».

Таким образом в работе доказана эффективность применения Дольф-Чебышевских амплитудных распределений по предложенному критерию. Проведен их сравнительный анализ с распределением «косинус в квадрате на пьедестале». Показана целесообразность применения Дольф-Чебышевских распределений при определенных длинах АР и заданных УБЛ.

Библиографический список

1. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. - М.: Связь, 1977, Ч.2., 288с.
2. Воскресенский Д.И., Степаненко В.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток - М.:Радиотехника, 2003, 632с.
3. Balanis C. Antenna theory: Analysis and Design. - John Willey & Sons, INC., 1997., p. 959.
4. Бененсон Л.С., Журавлев В.А. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. – М.: Сов.радио, 1966, 368 с.
5. Зелкин Е.Г. Методы синтеза антенн // Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов – М.: Сов.радио, 1980.- 296 с.
6. Filimonova Y.O. Applying of Dolph-Chebyshev amplitude distributions by the criterion of maximum aperture efficiency for given side-lobe level/ Y.O. Filimonova, K.A Layko, D. I. Podoynikov // Proc. of 13th International conference on actual problems of electronic instrument engineering APEIE – 2016 - Novosibirsk - vol.1.- p.87 - 89.