

УДК 621.396.677.7

ДВУХДИАПАЗОННЫЕ ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ С ОДИНАКОВОЙ ШИРИНОЙ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Н.Н. Горобец¹, В.Н. Горобец¹, А.А. Елизаренко², А. С. Степанов³

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, 61077, пл. Свободы, 4

²Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 61050, пл. Фейербаха, 7

³Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 611667, пр. Ленина, 14

e-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 18 октября 2010г.

Теоретически исследованы диаграммы направленности плоских комплексированных двухдиапазонных решеток полуволновых вибраторов, расположенных как вдоль оси, так и взаимоперпендикулярно, при одинаковой ширине главного лепестка в обоих диапазонах. Показано, что если обе решетки работают на сопряженных поляризациях, то главный лепесток диаграммы направленности внешней подрешетки имеет куполообразную форму, а уровни ее боковых лепестков существенно выше уровней боковых лепестков диаграммы внутренней антенны, причем тем больше, чем меньше ширина главного лепестка. В решетках с ортогональной поляризацией диаграммы направленности обеих подрешеток практически одинаковы. Показано также, что при заданной ширине диаграммы имеется ограничение на минимальное значение отношения рабочих длин волн внешней и внутренней подрешеток.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибраторные антенны, диаграммы направленности, комплексированные антенные решетки, поляризация излучения

Теоретично досліджені діаграми спрямованості плоских комплексованих дводіапазонних решіток напівхвильових вібраторів, розташованих як уздовж осі, так і взаємоперпендикулярно, при однаковій ширині головної пелюстки в обох діапазонах. Показано, що якщо обидві решітки працюють на однакових поляризаціях, то головна пелюстка діаграми спрямованості зовнішньої підрешітки має куполоподібну форму, а рівні її бічних пелюсток суттєво вищі рівнів бічних пелюсток діаграми внутрішньої антени, причому тим більше, чим менша ширина головної пелюстки. У решітках з ортогональною поляризацією діаграми спрямованості обох підрешіток практично однакові. Показано також, що при заданій ширині діаграми є обмеження на мінімальне значення відношення робочих довжин хвиль зовнішньої й внутрішньої підрешіток.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вібраторні антени, діаграми спрямованості, комплексовані антенні решітки, поляризація випромінювання

Theoretically investigated pattern complex dual-band planar arrays of half-wave dipoles, located both along the axis or orthogonal, with the same width of the main lobe in both bands. It is shown that if both the lattice work on the conjugate polarizations, then the main beam pattern of the external sublattice has a dome-shaped tabular form, and its levels of side lobes is substantially higher levels of side-lobe internal antenna, and the greater the narrower the main lobe. In lattices with orthogonal polarization pattern in both sublattices are almost identical. It is also shown that for a given width of the chart there is a limit to the minimum value of the ratio of working wavelengths of the external and internal sublattices.

KEY WORDS: dipole antenna, radiation pattern, complex antenna arrays, the polarization of radiation

Одним из наиболее эффективных способов повышения надежности и обеспечения конфиденциальности передачи информации систем связи является передача информации по многоканальным устройствам путем переключения каналов. Однако, в таких системах нужны многодиапазонные антенны, причем желательно, чтобы по каждому каналу частотные характеристики антенн имели резонансный характер, что обеспечивает их лучшую помехоустойчивость. Из всех известных в настоящее время типов антенн на практике наибольшее распространение имеют вибраторные антенны и их различные варианты и модификации. Такие антенны выполняются в длинноволновых диапазонах – сверхдлинных, длинных, средних и коротких волн в виде антенн – мачт, многожильных антенных канатиков, растянутых в воздухе (с помощью самолетов), и растянутых по поверхности льда толстых проводников, т.е. представляют собой уникальную конструкцию. Из-за этого невозможно использовать по одной резонансной антенне на каждый частотный канал. Совсем другая ситуация в более высокочастотных диапазонах – от коротковолновой части метровых до миллиметровых волн, в которых вибраторные антенны изготавливаются из металлических труб, лент, тонких проводов, а

на сантиметровых и миллиметровых волнах – в виде полосковых и микрополосковых печатных лент – излучающих элементов. В этих случаях реализация резонансных антенн для каждого канала не представляет принципиальных или технических трудностей. Другое дело, что в таких комплексированных антенных системах из-за взаимной связи излучателей разных частотных диапазонов искажаются их характеристики направленности [1].

Эффекты взаимной связи в комплексированных антеннах обусловлены целым рядом физических явлений, проявляющихся при совмещении любых типов антенн. Прежде всего следует отметить изменение конфигурации границы области, в которую происходит излучение каждого излучателя. За счет этого в принципе нельзя использовать правило перемножения диаграмм направленности, которое сильно упрощает математическую модель задачи. Следующий фактор – краевые эффекты, из-за которых не только сильно искажаются диаграммы направленности крайних излучателей, но и значительно изменяется их согласование со свободным пространством. В общем случае изменяется также поляризация излучения, особенно крайних антенн. Наконец, существенное значение имеет прямой прием и переизлучение волн от одного излучателя к другому. Общее решение этой задачи, по-видимому, вообще невозможно из-за ее сложности. В частных же случаях решение с той или иной точностью в зависимости от конкретных типов излучателей вполне возможно.

Целью настоящей статьи является теоретическое исследование диаграмм направленности двухдиапазонных вибраторных антенн, обеспечивающих одинаковую ширину главного лепестка по заданному уровню поля.

ДВУХДИАПАЗОННЫЕ ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ОДИНАКОВОЙ ШИРИНОЙ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Принципиальной особенностью исследуемых комплексированных антенн является экранировка середины одной антенны элементами другой. В общем случае, например, апертурных антенн диаграмма направленности внутренней антенны, работающей на наиболее высокой частоте, в первом приближении определяется без учета внешней (или внешних) антенн отношением

$$F_1(\theta, \varphi, \lambda_1) = F_0(\theta) \iint_{S_1} \dot{A}_1(x, y) e^{ik\vec{r}_s \vec{R}^0} ds_1.$$

Диаграмма направленности внешней антенны определяется более сложным образом:

$$F_2(\theta, \varphi, \lambda_2) = F_0(\theta) \left[\iint_{S_2} \dot{A}_2(x, y) e^{ik\vec{r}_s \vec{R}^0} ds_2 - \iint_{S_1} \dot{A}_2(x, y) e^{ik\vec{r}_s \vec{R}^0} ds_1 \right].$$

Здесь принято, как предложено в [2], что амплитудно-фазовое распределение источников поля в экранированной части раскрыва, т.е. на S_1 , противофазно АФР поля во второй антенне без экранировки и точно совпадает по величине.

По-видимому, впервые эти явления исследовал Л.Д. Бахрах [2], который показал, что экранировка середины раскрыва апертурной антенны приводит к уменьшению ширины главного лепестка и возрастанию уровня боковых лепестков диаграммы направленности. При этом экранировка до 10% излучающего раскрыва, в частности, зеркальной антенны не приводит к значительным ухудшениям ее характеристик направленности.

Рассмотрим далее подобные эффекты в вибраторных двухдиапазонных антеннах с одинаковой шириной главного лепестка диаграммы направленности.

Для выявления специфических для рассматриваемой задачи физических закономерностей формирования диаграмм направленности в двухдиапазонных комплексированных вибраторных антеннах с одинаковой шириной главного лепестка диаграммы направленности рассмотрим упрощенную физико-математическую модель исследуемого излучателя, представленную на рис. 1. Здесь 1 – вибраторная антенна, работающая на более высокой, а 2 – на более низкой частоте. Такое расположение элементов антенны обеспечивает лучшие характеристики направленности по сравнению с вариантом, когда на краях расположены высокочастотные излучатели, так как расстояние между внешними излучателями, отнесенное к длине волны, в этом случае меньше.

Для некоторого упрощения задачи и более четкого проявления исследуемых эффектов примем, что амплитудно-фазовое распределение тока в первом излучателе постоянно. Взаимным влиянием излучателей как эффектом второго порядка малости будем пренебрегать в пользу общности решаемой задачи. Действительно, как хорошо известно [3], взаимное влияние излучателей существенно влияет на

согласование вибраторной антенны с фидерным трактом и практически не влияет на ее диаграмму направленности, особенно в обычно используемых на практике резонансных вибраторных антеннах.

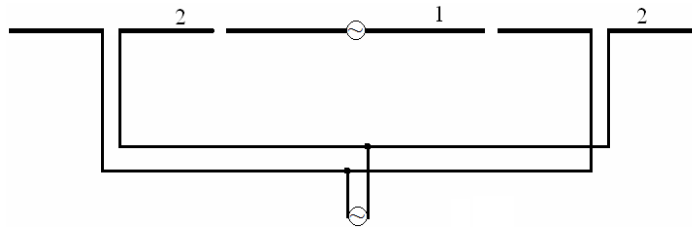


Рис. 1. Простейший вариант двухдиапазонной вибраторной антенны

В численном эксперименте рассчитывались диаграммы направленности центрального излучателя 1, длина которого выбиралась так, чтобы ширина главного лепестка «по нулям» поля равнялась соответственно 90° ; 75° ; 60° ; 45° ; 30° и 15° . Затем рассчитывались диаграммы направленности двухэлементной решетки вибраторных излучателей 2 с такой же шириной главного лепестка, при изменении отношения рабочих длин волн рабочих каналов λ_2/λ_1 от минимальных возможных до достаточно больших. Длины вторых излучателей рассчитывались из условий обеспечения заданной ширины диаграммы направленности. Расстояние между концами вибраторов Δ задавалось как параметр задачи и принято малым по сравнению с длиной волны.

Из результатов расчетов (рис. 2) видно, что в случае антенны с высокой направленностью, в частности, при $\theta_{01} = 15^\circ$ (рис. 2а), электрическая длина внутреннего вибратора $L_1/\lambda_1 = 3,86$, а расстояние между внешними L_2/λ_2 изменяется от 2,0 при $\lambda_2/\lambda_1 = 3,1$ до 3,67 при $\lambda_2/\lambda_1 = 20$. Главный лепесток диаграммы направленности внешней антенны имеет куполообразный вид и имеет большую ширину по «уровню половинной мощности» по сравнению с главным лепестком диаграммы внутренней антенны. Отличия ширины и формы главных лепестков, как видно из рисунка, тем меньше, чем больше отношение рабочих длин волн λ_2/λ_1 . Это объясняется тем, что чем меньшая часть внешней антенны 2 экранируется внутренней антенной 1, т.е. чем меньше d_2/λ_2 , тем меньше влияние первой антенны на диаграмму направленности второй.

Уровень боковых лепестков длинноволновой антенны недопустимо высок. Так, при $\lambda_2/\lambda_1 = 3,1$ уровень первого бокового лепестка всего на $-1,5$ дБ ниже уровня главного лепестка. При $\lambda_2/\lambda_1 = 20$ уровень первого бокового лепестка снижается до $-6,9$ дБ. Для внутренней же антенны этот уровень составляет $-23,8$ дБ. Уровень второго бокового лепестка более чем на 10 дБ ниже уровня первого. Следует отметить и явление уменьшения числа боковых лепестков внешней антенны.

При увеличении ширины главного лепестка до $\theta_{01} = 30^\circ$ электрическая длина первой антенны уменьшается до 2,0, а второй – до 1,05 в случае $\lambda_2/\lambda_1 = 3,1$ и до 1,9 при $\lambda_2/\lambda_1 = 20$. При этом куполообразная форма главного лепестка диаграммы направленности остается четко выраженной. В пределах переднего полупространства $\theta \leq 90^\circ$ имеется всего один боковой лепесток, причем уровень этого лепестка примерно на 5 дБ ниже, чем в предыдущем случае $\theta_{01} = 15^\circ$ для малых значений отношения λ_2/λ_1 и на (1,5...2,0 дБ) – при больших значениях λ_2/λ_1 . Отличие уровня первого бокового лепестка внутренней и внешней антенны тем меньше, чем больше λ_2/λ_1 .

В случае антенны со средней направленностью, в частности, при $\theta_{01} = 45^\circ$, как видно из рис. 2б, качественно форма диаграммы направленности остается такой же, однако уровень первого бокового лепестка существенно ниже (не превышает -15 дБ при $\lambda_2/\lambda_1 = 3,1$). Характерно также, что в отличие от предыдущих случаев антенн с большей направленностью в рассматриваемых вариантах средней направленности, т.е. при $\theta_{01} = 45^\circ \dots 60^\circ$, число боковых лепестков диаграмм направленности

внутренней и внешней антенн одинаково, а их уровень меньше зависит от отношения рабочих длин волн

$$\lambda_2/\lambda_1.$$

В случае слабнонаправленных антенн (при $\theta_{01} = 75^\circ \dots 90^\circ$) эти характерные особенности диаграмм направленности усиливаются. В частности, при $\theta_{01} = 75^\circ$ боковые лепестки не превышают -45 дБ. Таким образом, при совмещении двухдиапазонных вибраторных антенн обеспечить одинаковую ширину главного лепестка диаграммы направленности можно только с некоторого значения отношения рабочих длин волн λ_2/λ_1 внешней и внутренней антенн.

В случае, если ширина главного лепестка и внутренней, и внешней антенны одинаковы, главный лепесток диаграммы направленности внешней антенны принимает куполообразную форму, а боковые лепестки возрастают, как и в случае апертурных антенн.

Рассмотрим далее более близкий к практике случай, когда и внутренняя (1 на рис. 1), и внешняя (2 на рис. 1) антенны представляют собой двухэлементную решетку резонансных (полуволновых) вибраторов. В этом случае одинаковую заданную ширину главного лепестка диаграммы направленности при определенном отношении рабочих длин волн внешней и внутренней антенн можно только надлежащим выбором расстояния между излучателями одного диапазона. Динамики изменения диаграммы направленности двухэлементной синфазной решетки полуволновых вибраторов с шириной главного лепестка «по нулям», равной $\theta_{01} = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 75^\circ$ и 80° , видна из рис. 3. Из сравнения с рис.2 следует, что изменение характеристик направленности реальной комплексированной двухдиапазонной антенной решетки полуволновых вибраторов

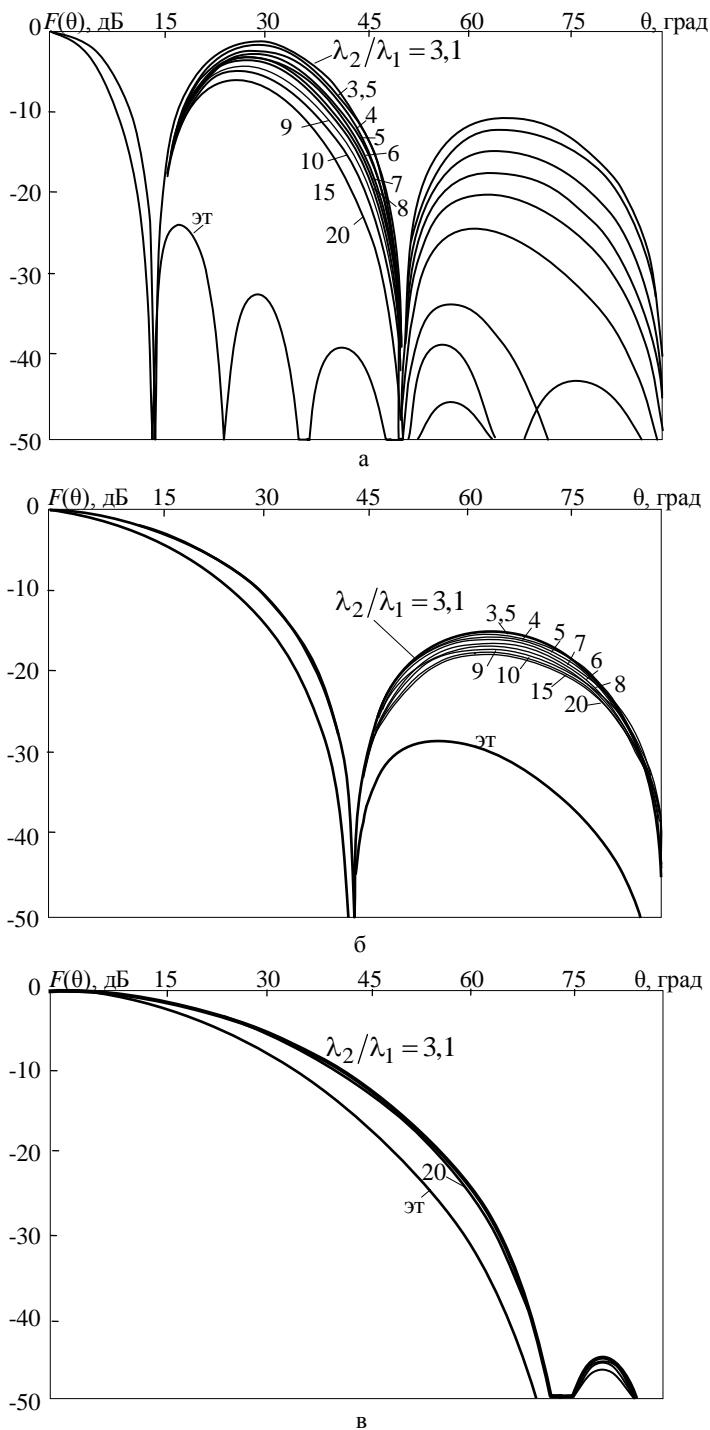


Рис.2. Диаграмма направленности линейной антенны (а – при $\theta_{01} = 15^\circ$; б – при $\theta_{01} = 45^\circ$ и в – при $\theta_{01} = 75^\circ$)

качественно такое же, как и в рассмотренной выше модельной задаче: главный лепесток диаграммы направленности приобретает куполообразную форму, а уровни боковых лепестков увеличиваются, причем тем больше, чем меньше ширина главного лепестка

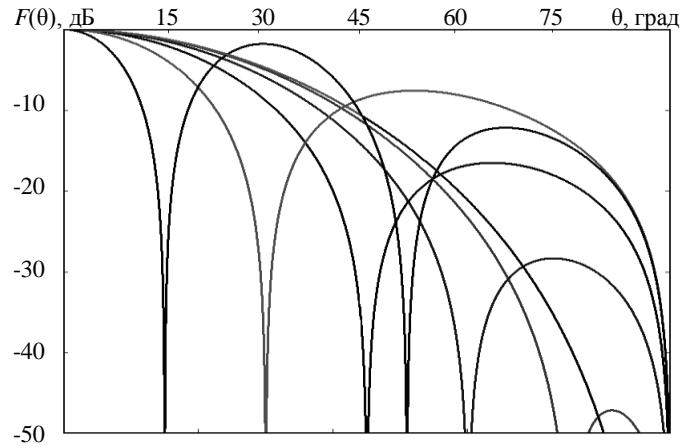


Рис. 3. Диаграммы направленности двухэлементной решетки вибраторов с шириной главного лепестка $\theta_{01} = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 75^\circ; \text{ и } 90^\circ$

ДВУХДИАПАЗОННЫЕ ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ С ОДИНАКОВОЙ ШИРИНОЙ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ, РАБОТАЮЩИЕ НА ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для уменьшения взаимной связи между соседними близкими по частоте рабочими каналами телекоммуникационных систем применяют поляризационную развязку между каналами. Простейшая антенная система для этой цели представлена на рис. 4. При этом положительный эффект достигается и при работе внутренней и внешних антенн на одной частоте, а при одинаковой ширине диаграммы направленности в этом последнем случае возможен синтез круговой поляризации излучение в широком секторе углов [4].

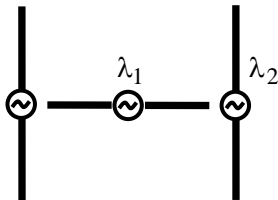


Рис.4. Двухдиапазонная трехэлементная комплексированная антенна с одинаковой шириной диаграммы направленности

На рис.5а приведена диаграмма направленности полуволнового вибратора и двухэлементной решетки полуволновых вибраторов, имеющие одинаковую ширину главного лепестка по уровням -3 дБ; -10 дБ; -15 дБ и -50 дБ, находящихся в свободном пространстве. На рис. 5б представлены такие же расчеты для решеток, находящихся над бесконечным экраном на высоте $\lambda/4$. Из рисунков видно, что главный лепесток диаграммы направленности более широкий и имеет куполообразную форму только при d/λ , обеспечивающих одинаковую

ширину диаграммы по уровням -3 дБ; -10 дБ и частично -15 дБ. При одинаковой ширине «по нулям» диаграмма направленности внешней антенны уже по сравнению с диаграммой внешней антенны.

Табл. Ширина главного лепестка и расстояние между излучателями в трехэлементной решетке вибраторных излучателей

ν	-3 дБ	-10 дБ	-15 дБ	-50 дБ
$\Delta\theta_{\nu}^{\tilde{a}\tilde{a}}$, град	39,0	67,2	77,1	89,8
$d/\lambda_{\nu}^{\tilde{a}\tilde{a}}$	0,40	0,43	0,45	0,50
$\Delta\theta_{\nu}^{\tilde{e}\tilde{e}\tilde{d}}$, град	36,3	58,8	67,4	87,1
$d/\lambda_{\nu}^{\tilde{e}\tilde{e}\tilde{d}}$	0,40	0,42	0,43	0,49

Полученные результаты анализа характеристик направленности трехэлементной резонансной вибраторной антенны могут быть использованы для создания облучателей остронаправленных зеркальных антенн, оптимизированных по максимуму коэффициента усиления и по минимуму боковых лепестков. Для этого в таблице приведены данные по характеристикам подобных решеток.

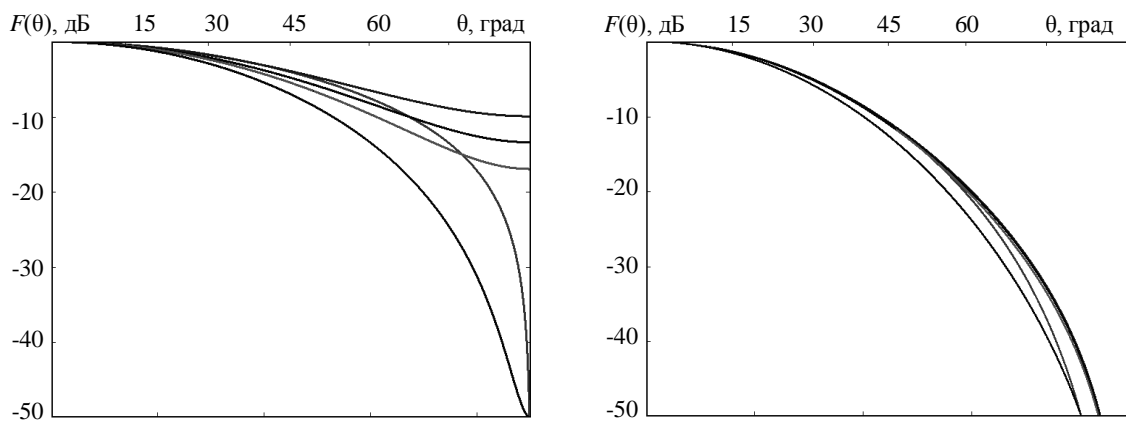


Рис. 5. Диаграммы направленности трехэлементной решетки полуволновых вибраторов:
а – в свободном пространстве; б – над бесконечным экраном на высоте $\lambda/4$

Отметим, что рассмотренные варианты комплексированных двухдиапазонных решеток вибраторных излучателей можно рассматривать как элементарные ячейки для создания плоских антенных решеток с любым числом излучателей, т.е. любой сколь угодно высокой направленностью.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы возможности создания комплексированных двухдиапазонных двухэлементных вибраторных антенных решеток, обеспечивающих одинаковую ширину главного лепестка диаграммы направленности на обеих рабочих длинах волн каждой подрешетки. Показано, что за счет расположения одной подрешетки внутри другой существует ограничение на величину отношения рабочих длин волн внешней и внутренней подрешеток.

2. Если все вибраторы в антенне расположены вдоль одной оси, т.е. подрешетки работают на одной линейной поляризации, то при равенстве ширины главного лепестка обеих подрешеток «по нулям» диаграмма направленности внешней подрешетки имеет куполообразную форму и более высокий по сравнению с внутренней подрешеткой уровень боковых лепестков. Эти эффекты проявляются тем сильнее, чем меньше ширина главного лепестка диаграммы направленности.

3. Если вибраторы во внутренней и внешней подрешетках взаимно перпендикулярны, т.е. подрешетки работают на двух ортогональных линейных поляризациях, то диаграммы направленности практически одинаковы при их работе как на одной частоте, так и на разных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы антенной техники. / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского.-М.: “Радио и связь”. 1989.-368 с.
2. Бахрах Л.Д. Многозеркальные антенны. Дис....доктора технич. наук. – М.: 1958. т.1 и 2
3. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. – М.: “Связь”. 1975. -129 с.
4. Горобец Н.Н. Основы теории антенн с вращающейся поляризацией. Харьков: Изд-во Харьковского гос. ун-та. 1987. -78с.