

Изучение характеристик плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом для дисковых антенных решеток

© В.П. Заярный, А.А. Парпула, В.С. Гирич

Волгоградский государственный технический университет,
400005 Волгоград, Россия
e-mail: zvp2000@mail.ru

(Поступило в Редакцию 16 января 2014 г.)

Получены математические модели для плоских симметричных антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом, позволяющие рассчитывать их диаграммы направленности в зависимости от конфигурации раскрыва. Экспериментально измерены диаграммы направленности для аналогичных антенн в диапазоне 5.9–12.5 GHz, установлено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Выявлены закономерности влияния конфигурации раскрыва исследованных антенн на форму главного лепестка их диаграмм направленности, что использовано для создания дисковых антенных решеток кругового (секторного) обзора на их основе.

Введение

В радиотехнических системах антенны и антенные устройства являются важнейшими функциональными звеньями, характеристики которых во многом определяют характеристики остальных функциональных блоков систем. Поэтому разработка новых антенн, антенных устройств на их основе и исследование их характеристик представляется важным и актуальным. Учитывая востребованность подобных исследований, следует также отметить важность разработки математических моделей для проектируемых антенн, согласованных с результатами экспериментальных исследований подобных антенн, позволяющих заранее рассчитывать и прогнозировать их электродинамические характеристики.

В настоящей работе экспериментально исследовались плоские антенны осевого излучения, выполненные в виде симметричных щелевых линий с линейно расширяющимся раскрывом (рис. 1), вырезанных в дисковых металлических пластинах (медь, алюминий) толщиной ~ 0.3 mm без диэлектрической подложки. Эти антенны разрабатываются для использования в качестве излучающих элементов в составе дисковых антенных решетках кругового (или секторного) обзора. Питание всех излучающих антенн производилось через коаксиальный разъем, микрополосковую линию передачи и симметричную щелевую линию аналогично питанию антенн, описанных в [1].

Моделирование электродинамических характеристик антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом

Построение строгих электродинамических моделей антенн, подобных исследованным (на нерегулярных линиях), является сложной задачей. Однако если из-

начально положить, что в направляющей структуре распространяется только один тип волны (E или H) и что он не изменяется вследствие изменения поперечного сечения щели, то для анализа излучения антенн с расширяющимися щелями можно произвести их регуляризацию (рис. 1). При этом для каждого регулярного участка можно использовать результаты расчета параметров симметричной щелевой линии с постоянной шириной щели [2–4], что позволяет для конечного числа регулярных участков рассчитать диаграмму направленности (ДН) всей антенны по их суммарному вкладу.

Для подобной аппроксимации нерегулярной структуры предполагается, что шаг увеличения ширины щели должен быть много меньшим четверти длины волны [2]

$$w_n - w_{n-1} = w_{n+1} - w_n = \Delta w \ll \frac{\lambda_0}{4}, \quad (1)$$

где w_n — ширина щели n -го регулярного участка направляющей структуры антенны, λ_0 — длина волны электромагнитных колебаний на входе антенны.

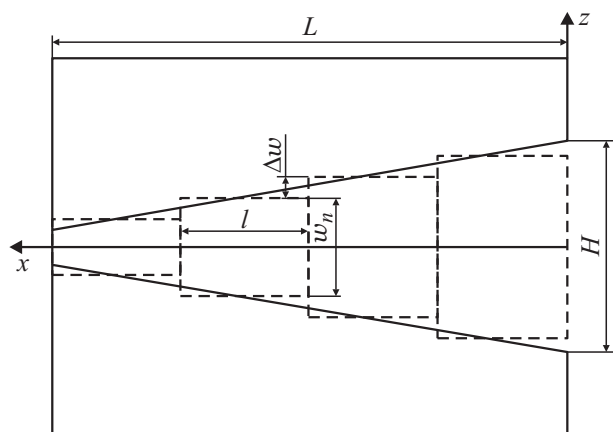


Рис. 1. Исследуемая плоская антенна осевого излучения и ее аппроксимация регулярными участками.

При этом результирующее поле в дальней зоне будет определяться суммированием вклада в излучение, вносимого каждым регулярным участком, согласно (1)

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где $E_n(\theta, \varphi)$ — вклад в поле дальней зоны n -м участком; θ, φ — угловые координаты в E -плоскости и H -плоскости ДН соответственно.

Для сохранения условия бегущей вдоль направляющей структуры антенны волны потребуем, чтобы мощность, проходящая через каждый регулярный участок, оставалась постоянной

$$P_{n-1} = P_n = P_{n+1} = \text{const.} \quad (3)$$

Мощность, проходящая вдоль n -участка регулярной структуры, определяется соотношением

$$P_n = \frac{V_n^2}{Z_n}, \quad (4)$$

где V_n — разность потенциалов на n -м регулярном участке, а Z_n — его волновое сопротивление.

Выражение (2) с учетом (3), (4) и заменой V_n на поперечную составляющую поля регулярной симметричной щелевой линии (СПЛ), положив $P_n = 1$ [2], можно записать

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \sqrt{Z_n} E_{0n}(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где E_{0n} — поле излучения n -го регулярного участка, которое может быть определено по какой-либо модели антенны с щелью постоянной ширины, а Z_n можно определить по формуле [2]

$$Z_n = \frac{60\pi^2}{\ln\left(\frac{2H}{w} + \sqrt{\left(\frac{2H}{w}\right)^2 - 1}\right)}. \quad (6)$$

Как показано в [2], поперечная компонента электрической напряженности электромагнитного поля для n -го регулярного участка антенны (рис. 1) определяется следующим выражением:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = \frac{j\omega\epsilon w \sin\varphi e^{-jk_0 r}}{4\pi^2 r} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{e^{jk_0 z' \cos\theta}}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - z'^2}} dz' \times \int_0^L e^{jk_0 x' \sin\theta \cos\varphi} e^{k_x x'} \left[1 + e^{j\frac{\pi}{4}} F\left(v\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right) + \frac{\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{-j\frac{\pi}{2}v^2}}{\pi v} \right] dx'. \quad (7)$$

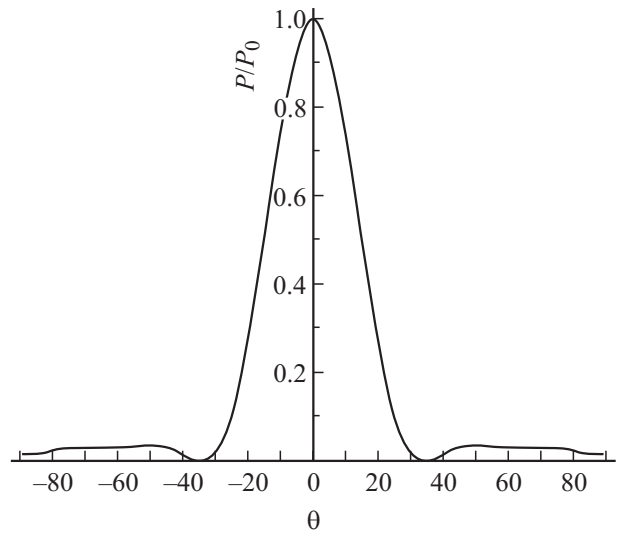


Рис. 2. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ mm, $H = 60$ mm.

Здесь

$$F(v) = \int_0^v e^{-jt^2} dt \text{ — интеграл Френеля,}$$

$$v = \sqrt{\frac{2k_0 x' \sin\theta(1 + \cos\varphi)}{\pi}},$$

ω — частота электромагнитных колебаний на входе антенны, k_0 — волновое число, j — мнимая единица, t — время.

Интегралы в расчетных формулах находятся численно, а построение ДН в случае постоянной ширины щели в главных плоскостях производится нормированием результатов при $\theta = \pi$ для E -плоскости и $\varphi = \pi/2$ для H -плоскости [5–7].

Расчеты ДН производились для исследовавшихся антенн, длина которых L изменялась в пределах $1-5\lambda$, а ширина раскрытия H — в пределах $1-3\lambda$ (на частоте 10 GHz, $\lambda = 30$ mm), в E -плоскости электромагнитных колебаний. На рис. 2 приведена диаграмма направленности, полученная в результате моделирования с использованием (5)–(7) для случая $L = 150$ mm и $H = 60$ mm. Видно, что ширина ДН по уровню половинной мощности составляет порядка 30° , а уровень боковых лепестков (УБЛ) имеет значение порядка 0.05 от мощности излучения вдоль оси излучателя ($\theta = 0$).

В [4–6] показано, что наилучшим образом результаты моделирования ДН подобных антенн совпадают с экспериментальными данными в случае, когда значение $\Delta w = \lambda_0/8$. Это свидетельствует об адекватности полученных модельных представлений и возможности их использования для моделирования ДН подобных антенн с любыми параметрами, а также ДН более сложных антенных систем (решеток) на их основе.

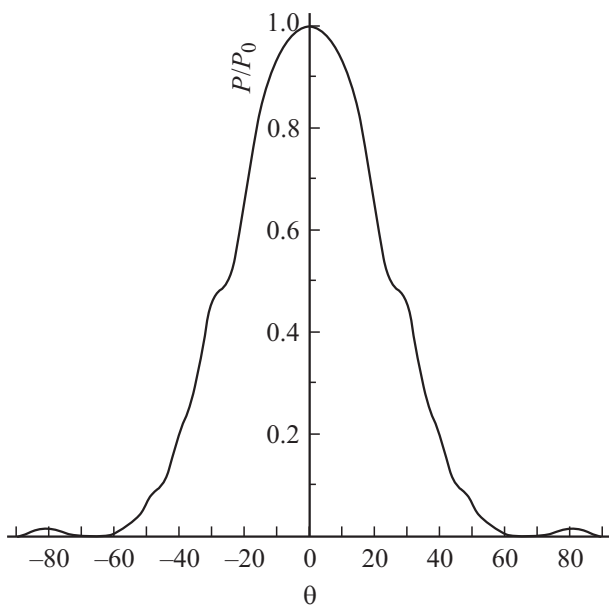


Рис. 3. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150 \text{ mm}$, $H = 30 \text{ mm}$.

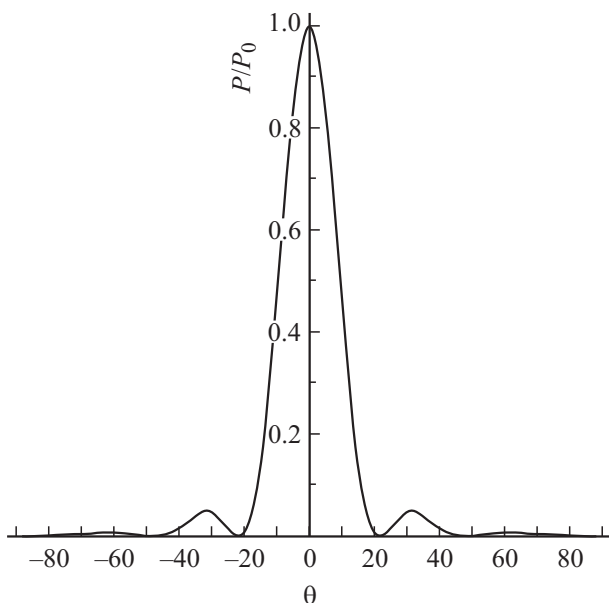


Рис. 4. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150 \text{ mm}$, $H = 90 \text{ mm}$.

Из результатов моделирования видно, что при изменении ширины раскрытия антенны H существенно изменяются ширина главного лепестка и уровень боковых лепестков. На рис. 3, 4 представлены диаграммы направленности антенн с шириной раскрытия $H = 30 \text{ mm}$ и 90 mm соответственно. Длина антенны в обоих случаях была одинаковой ($L = 90 \text{ mm}$).

Из рис. 3 видно, что при уменьшении размера антенны главный лепесток ДН расширяется (рис. 3), а его ширина по уровню половинной мощности составляет

порядка 46° . При увеличении размера H главный лепесток ДН сужается (рис. 4), а его ширина по уровню половинной мощности составляет порядка 20° . Следует отметить, что в данном случае при изменении размера H также имеет место изменение УБЛ; при уменьшении размера H УБЛ уменьшается, при его увеличении УБЛ увеличивается, но не превышает значения 0.1 от максимального значения мощности излучения (при $\theta = 0$).

Экспериментальное исследование плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрытием при изменении их геометрических параметров

Для проведения натурного эксперимента был изготовлен набор антенн, у которых так же, как и при моделировании, ширина раскрытия H изменялась в пределах $1-3\lambda$, при $L = 150 \text{ mm}$ (т.е. 5λ) для всех исследовавшихся антенн. При этом угол раскрытия антенны имел значения 10.5° (для $H = 1\lambda$), 22.5° (для $H = 2\lambda$) и 33.5° (для $H = 3\lambda$).

Проектирование антенн производилось с учетом их электродинамических свойств и основных положений, изложенных в [2,4]. Измерение их диаграмм направленности производилось на установке, описанной в [3,8].

На рис. 5–7 представлены диаграммы направленности исследовавшихся антенн в E - и H -плоскостях с шириной раскрытия $H = 30 \text{ mm}$ (1λ), 60 mm (2λ) и 90 mm (3λ) соответственно. Длина антенны во всех случаях была одинаковой ($L = 150 \text{ mm}$).

Измерение всех приведенных ДН производилось на частоте 10 GHz . Их форма сохранялась практически неизменной в диапазоне частот $5.9-12.5 \text{ GHz}$.

Анализ приведенных экспериментально измеренных ДН (рис. 5–7) показал, что при увеличении раскрытия антенны H их главный лепесток в E -плоскости, как

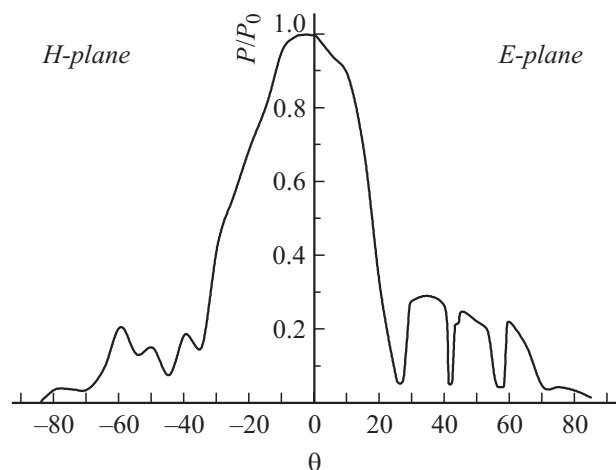


Рис. 5. Экспериментально измеренная диаграмма направленности антенны для случая $L = 150 \text{ mm}$, $H = 30 \text{ mm}$.

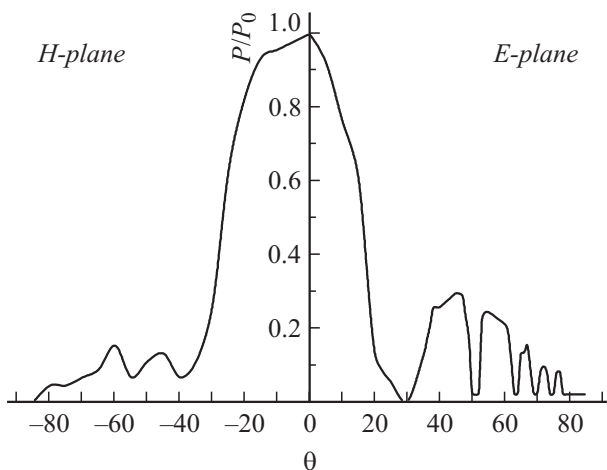


Рис. 6. Экспериментально измеренная диаграмма направленности антенны для случая $L = 150$ mm, $H = 60$ mm.

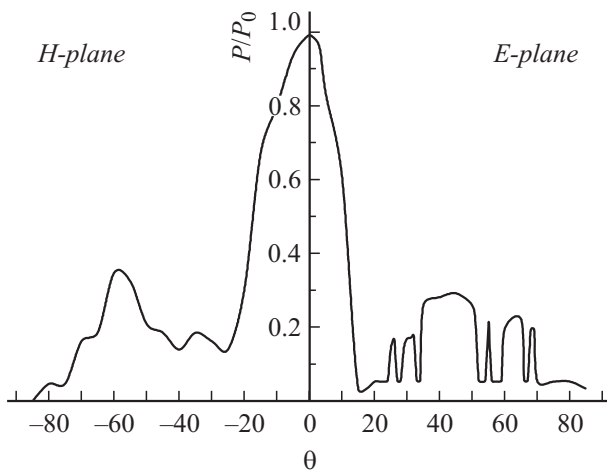


Рис. 7. Экспериментально измеренная диаграмма направленности антенны для случая $L = 150$ mm, $H = 90$ mm.

и в случае расчетных ДН, сужается. При этом ширина экспериментально полученных ДН по половинной мощности составляла $\sim 48^\circ$ — в случае $H = 30$ mm (1λ), $\sim 32^\circ$ — в случае $H = 60$ mm (2λ) и $\sim 20^\circ$ — в случае $H = 90$ mm (3λ), что хорошо согласуется с результатами приведенных выше теоретических исследований. Уровень боковых лепестков у экспериментально измеренных ДН несколько выше, чем у расчетных, и не превышал 0.3 от мощности в направлении излучения (для $\theta = 0$). Из этих же рисунков видно, что в H -плоскости их ДН имеют ту же закономерность сужения главных лепестков, что и в E -плоскости. Однако в H -плоскости главные лепестки ДН несколько шире, чем в E -плоскости (для одних и тех же значений раскрытия антенн), и имели значения $\sim 58^\circ$ в случае $H = 30$ mm (1λ), $\sim 54^\circ$ в случае $H = 60$ mm (2λ) и $\sim 38^\circ$ в случае $H = 90$ mm (3λ). При этом имеет место тенденция к увеличению УБЛ при увеличении раскрытия антенны так же, как в случае расчетных ДН.

Из полученных расчетных и экспериментальных результатов видно, что имеется явная зависимость ширины главного лепестка ДН исследовавшихся плоских симметричных антенн с линейно изменяющимся раскрытием от угла раскрытия (размера H). Это позволяет использовать данные разновидности антенн в качестве базовых элементов в более сложных антенных системах, таких как дисковые антенные решетки кругового обзора, для которых наилучшая электродинамическая развязка отдельных излучателей достигается изменением ширины их диаграмм направленности.

Антенная решетка кругового обзора на основе плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрытием

Из анализа характеристик диаграмм направленности, полученных для одиночных линейно расширяющихся щелевых антенн, следует, что если они конструктивно расположены на диске в радиальных от его центра направлениях так, чтобы угол между их центральными осями был равен 45° , то можно разместить до 8 таких антенн, образующих антенную решетку (АР). При этом может быть обеспечен практически полный круговой обзор. Однако эксперимент показал, что при размещении 8 антенн на одном диске создает существенное перекрытие главных лепестков диаграмм направленности соседних антенн, что не обеспечивает приемлемую электродинамическую развязку.

Измерения диаграмм направленности исследовавшихся АР производились на той же экспериментальной установке, что и одиночные антенны. Сначала исследовалась конструкция, когда к одиночной антенне добавлялась вторая аналогичная антенна, геометрически направленная в противоположную сторону от первой и расположенная на этом же диске. Анализ ДН такой конструкции, изготовленной в виде тонкого алюминиевого диска без подложки, показывает, что в диапазоне частот от 6 GHz до 11.5 GHz их форма оставалась практически неизменной. За пределами указанных граничных частот появлялись существенные искажения ДН, обусловленные недостаточными высокочастотными свойствами полосковых линий питания антенн и детектирующих СВЧ-диодов. При необходимости расширения частотного диапазона имеется возможность заменить указанные элементы на более высокочастотные. Ширина главных лепестков ДН для обеих антенн по уровню половинной мощности в указанном диапазоне частот изменялась в пределах от $\sim 22^\circ$ до $\sim 50^\circ$, при изменении угла раскрытия щели каждого элемента соответственно от 33.5° до 10.5° .

Приведенные выше характеристики для двух противоположно направленных одиночных антенн позволяют создать конструкцию в виде антенной решетки, имеющей четыре подобные антенны, расположенные друг

за другом под углом 90° на одном диске (рис. 8) и обеспечивающие хорошую электродинамическую развязку для случая, когда размер $H = 60 \text{ mm}$ (2λ) для всех щелей. Полученная диаграмма направленности в E -плоскости для конструкции с четырьмя антеннами на частоте 10 GHz приведена на рис. 9.

Очевидно, что перекрытия всего окружающего пространства (и даже достаточно широкого сектора) такая конструкция пока еще не обеспечивает. Наилучший вариант конструкции дисковой антенной решетки круго-

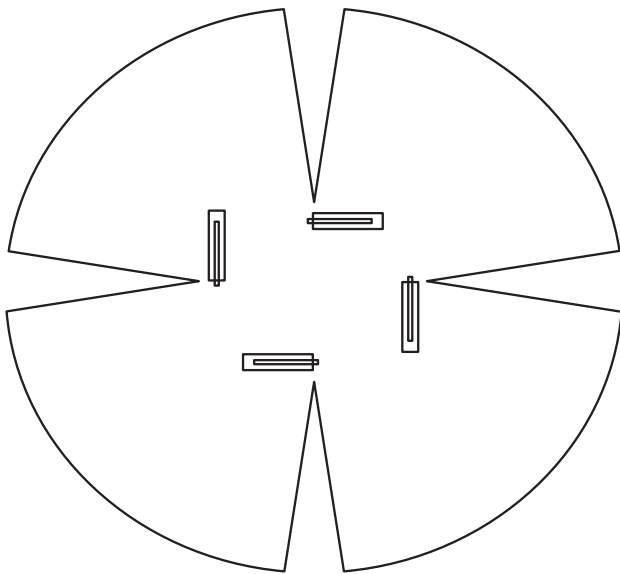


Рис. 8. Расположение четырех одиночных антенн на металлическом диске.

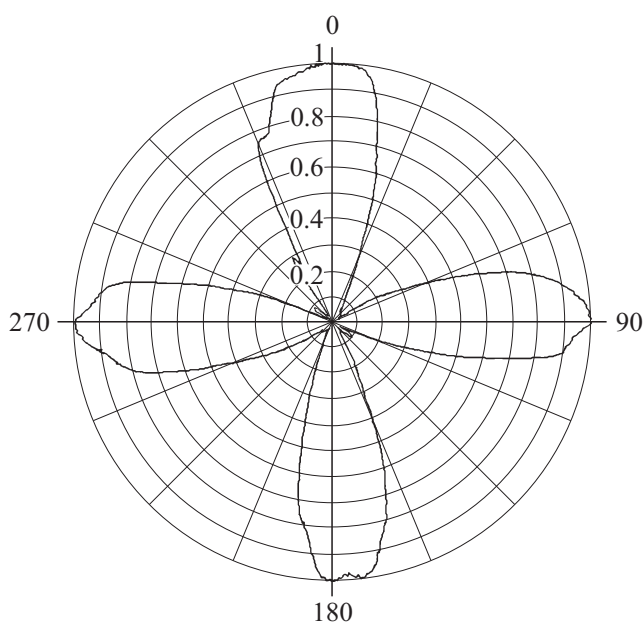


Рис. 9. Диаграмма направленности дисковой решетки с четырьмя одиночными антеннами.

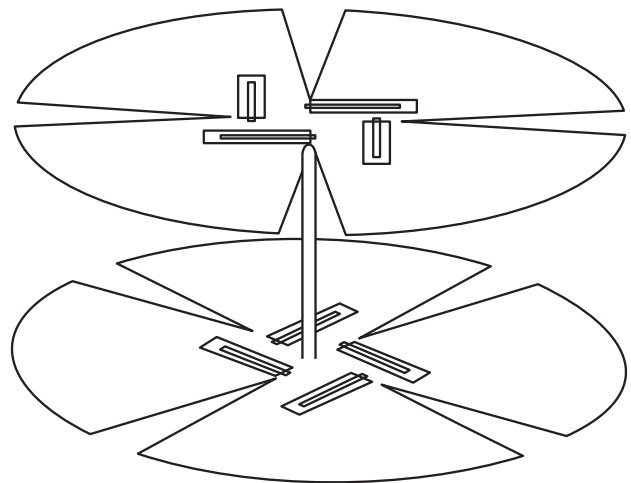


Рис. 10. Вид дисковой антенны кругового обзора.

вого обзора представляет собой два подобных, соосно расположенных диска, азимутально смещенных друг относительно друга на угол 45° (рис. 10) и работающих на разных частотах, что предполагает пространственное и частотное разнесения диаграмм направленности одиночных антенн. Возможность изменения угла раскрытия антенн позволяет изменять ширину главного лепестка ДН каждой из антенн, что позволяет наилучшим образом производить электродинамическую развязку ДН одиночных антенн.

Такая конструкция антенны способна обеспечивать круговой (и любой секторный) обзор. Экспериментально установлено, что оптимальное расстояние между дисками, обеспечивающее требуемую электродинамическую развязку между антеннами верхнего и нижнего дисков, составляет порядка одной длины волны (на частоте 10 GHz , $\lambda = 3 \text{ cm}$), что и было учтено в данной конструкции.

Заключение

В результате проделанной работы получены математические модели, позволяющие рассчитывать диаграммы направленности плоских симметричных антенн с линейно расширяющимся раскрытием. Это дало возможность выявить влияние угла раскрытия антенн на форму диаграмм направленности. Показано, что при увеличении угла раскрытия главный лепесток ДН сужается. Экспериментальное исследование подобных антенн с хорошей точностью подтвердило данные, полученные теоретически, и адекватность полученных моделей. Это позволило наилучшим образом спроектировать конструкцию дисковой антенны кругового (секторного) обзора и обеспечить наилучшую электродинамическую развязку главных лепестков ДН одиночных антенн.

Список литературы

- [1] Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 10–11. С. 697–703.
- [2] Janaswamy R., Schaubert D.H., Pozar D.M. // Radio Science. Vol. 21. P. 797–804.
- [3] Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 328–335.
- [4] Sharma A.K., Wilson R.M., Rosen A. // IEEE Antennas & Propagation Society APS. 1985. Vol. 6. P. 97–100.
- [5] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / Пер. с фран. под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1965. 780 с.
- [6] Волтер К. Антенны бегущей волны / Пер. с англ. под ред. А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.
- [7] Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11. № 4. С. 33–39.
- [8] Заярный В.П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 212 с.