

## **Анализ ФАР миллиметрового диапазона с распределительной системой на радиальном волноводе**

*Изложен электродинамический метод расчета распределительной системы на радиальном волноводе для многоэлементных ФАР с излучателями, возбуждаемыми коаксиальными зондами. Приведены результаты расчета характеристик ФАР миллиметрового диапазона с гексагональной сеткой и числом излучателей более двух тысяч. Реализуемость предложенного решения подтверждена на основе изготовленного и экспериментально исследованного макета 60-элементной распределительной системы.*

**Ключевые слова:** распределительная система, радиальный волновод, фазированная антенная решетка, метод наводимых ЭДС

При разработке современных бортовых интегрированных радиоэлектронных комплексов на основе ФАР и АФАР одной из ключевых проблем является повышение их энергетической эффективности. В этой связи в последнее время в качестве распределительной системы антенных решеток (АР) сантиметрового и миллиметрового диапазонов, все более широкое применение находят различные модификации радиальных волноводов [1-6]. Распределительная система на радиальном волноводе (РВ) хорошо сопрягается с различными волноводными, печатными, спиральными, щелевыми излучателями. К числу ее достоинств относятся также малые продольные габариты и масса, относительная простота конструкции, исключая многоступенчатые фидерные схемы деления, низкие вносимые потери, возможность реализации фазированных антенных решеток (ФАР) с числом излучателей порядка нескольких тысяч. Поскольку радиальный волновод работает на основной ТЕМ волне, которая не имеет дисперсии, он обладает высоким потенциалом для реализации широкополосного режима работы АР, что весьма актуально при разработке современных радиоэлектронных комплексов.

Возбуждение различных типов волноводных, печатных, спиральных и других типов излучателей АР может осуществляться посредством коаксиальных зондов (штырей), погруженных в радиальный волновод. При этом амплитуда возбуждения излучателей зависит от длины штырей, что позволяет реализовать необходимое амплитудно-фазовое распределение АР. Данный способ питания АР может рассматриваться, как квазиоптический, поскольку возбуждение излучателей происходит по «эфиру» радиального волновода. В режиме приема радиальный волновод и его модификации могут обеспечить формирование моноимпульсной диаграммы направленности (ДН) [1,4].

Целью данной статьи является электродинамическое моделирование и разработка квазиоптической распределительной системы на основе радиального волновода для антенного блока (АБ), входящего в состав приемо-передающих фазированных антенных модулей миллиметрового диапазона с фазированной антенной решеткой.

Распределительная система на радиальном волноводе входит в состав антенного блока, к которому предъявляются следующие основные требования. Рабочий диапазон частот АБ составляет 3%. АБ должен обеспечивать формирование ДН на передачу и прием в секторе электронного сканирования (СЭС), представляющем собой конус с углом при вершине  $120^\circ$ . Поляризация ДН на прием и передачу должна быть линейной. Ширина ДН на передачу и на прием по уровню  $-3$  дБ в центре СЭС должна быть не более  $2^\circ$ . Коэффициент усиления (КУ) на передачу и прием в центре СЭС должен быть не менее 35 дБ. При формировании ДН на краю СЭС допускается наличие дифракционных лепестков с уровнем, не превышающим уровень главного лепестка. Квазиоптический возбудитель антенного блока на основе радиального волновода должен обеспечивать амплитудное распределение ФАР максимально приближенное к равномерному.

Была исследована ФАР с раскрывом 12-угольной формы, которая максимально приближена к кругу (рис.1,а), и гексагональной сеткой размещения излучателей с периодом  $d \approx 0.66\lambda$ . Общее число излучателей ФАР равно 2220. Возбуждение излучателей осуществляется с помощью коаксиальных зондов, глубина погружения которых в радиальный волновод определяет амплитуду возбуждения.

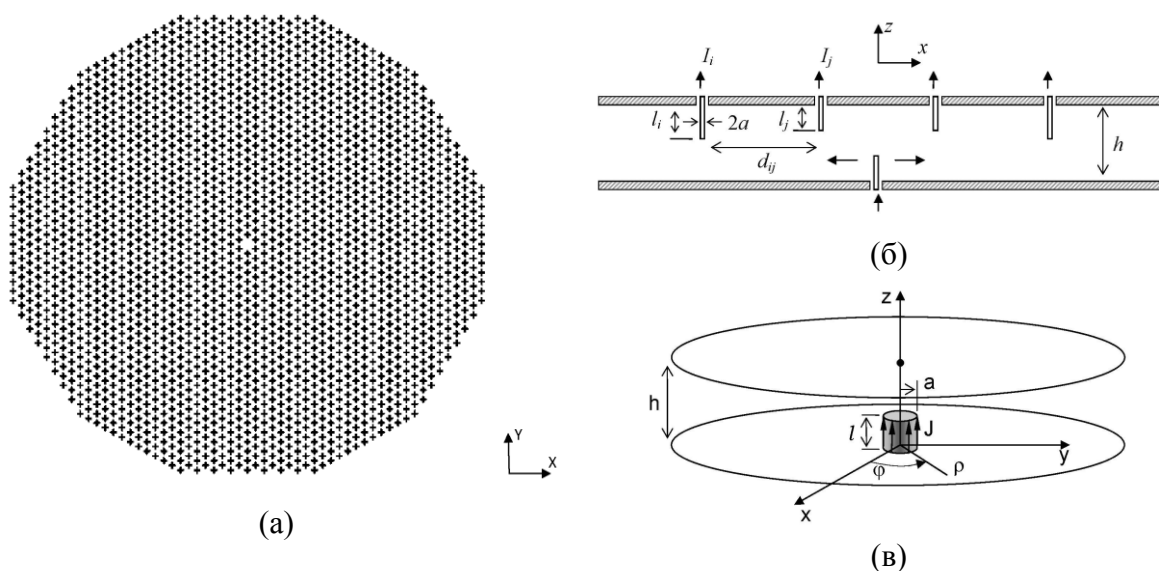


Рис. 1.

Для оценки характеристик направленности и согласования многоэлементных ФАР с распределительной системой на радиальном волноводе был использован численно-аналитический электродинамический метод, основанный на методе наводимых ЭДС [7,4]. Рассматриваемая распределительная система на радиальном волноводе с системой коаксиальных зондов схематично изображена на рис.1,б,в. Число зондов в верхней стенке радиального волновода, возбуждающих излучатели, равно  $M$ . Радиусы всех зондов одинаковы и равны  $a$ , длины зондов равны  $l_n$ ,  $n=1,2,\dots,M$ , высота радиального волновода  $h$ . В центре нижней стенки радиального волновода расположен коаксиальный фидер, длина питающего зонда  $l_{M+1}$ . Возбужденная коаксиальным фидером цилиндрическая ТЕМ волна распространяется от центра радиального

волновода к его краям. Полагаем, что по периметру радиального волновода расположена согласованная нагрузка.

В результате моделирования были выбраны следующие параметры раскрыва ФАР. Период расположения излучателей в гексагональной сетке равен  $d=0.66\lambda$ , высота радиального волновода  $h=0.375\lambda$ , радиус коаксиальных зондов  $a=0.045\lambda$ . В процессе решения осуществлялся поиск оптимального вектора длин коаксиальных зондов, обеспечивающего максимально близкое к равномерному амплитудное распределение. По результатам расчетов были получены значения длин зондов в интервале  $l_n=0.057\lambda\dots 0.284\lambda$ .

Результаты расчета диаграммы направленности АР при не отклоненном луче приведены на рис. 2. По осям отложены параметры  $m=\theta_x/0.5^\circ$ ,  $\mu=\theta_y/0.5^\circ$ ,  $\theta_x, \theta_y \in [0, 180^\circ]$ . Ширина луча по уровню  $-3$  дБ на центральной частоте  $f_0$  составляет  $2^\circ$  при уровне первых боковых лепестков  $-17$  дБ. Достигнутое значение уровня первых боковых лепестков весьма близко к теоретическому значению для круглого раскрыва при равноамплитудном распределении ( $-17.6$  дБ), что говорит о близости полученного АФР к равномерному.

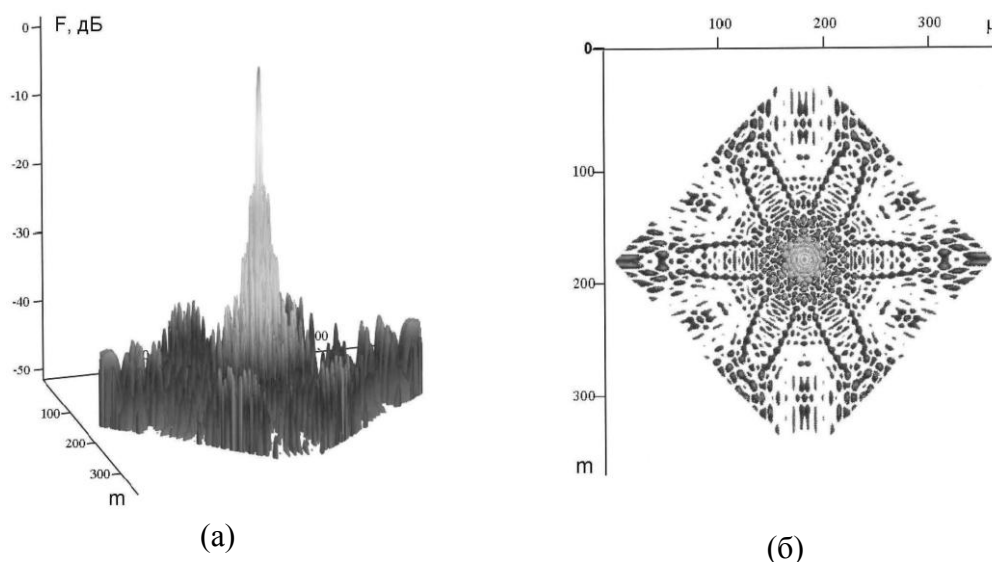


Рис. 2.

Уровень средних и дальних боковых лепестков не превышает  $-35$  дБ, коэффициент усиления равен  $G = 39.14$  дБ, КПД=0.9, до периметра радиального волновода доходит около 5% мощности, поступившей на вход питающего коаксиального фидера. Величина коэффициента отражения на входе питающего коаксиального фидера  $R=-13$  дБ.

Разброс по фазе между излучателями, возникающий в процессе распространения цилиндрической волны от центра РВ к краям, составляет от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ . Поэтому для формирования синфазного распределения по раскрыву АР необходимо внести соответствующие фазовые поправки для каждого излучателя, которые могут быть взяты из расчета, либо найдены экспериментальным путем.

При изменении частоты в пределах рабочего диапазона (3%) характеристики АР изменяются незначительно. Ширина луча составляет  $2^\circ$ , уровень боковых лепестков  $-17...-17.3$  дБ, уровень средних и дальних боковых лепестков не превышает  $-35...-40$  дБ, коэффициент отражения на входе распределительной системы  $R = -12.5...-14.5$  дБ, КПД= $0.89...0.92$ , до периметра РВ доходит  $5...5.6\%$  мощности, КНД равен  $D=39.3...39.7$ дБ, коэффициент усиления  $G= 38.8...39.3$  дБ.

При сканировании в плоскости  $XOZ$  ширина луча по уровню половинной мощности для углов сканирования  $\theta_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  принимает соответственно значения  $2\theta_{0.5} = 2.2^\circ, 2.6^\circ, 4^\circ$ , уровень боковых лепестков меняется незначительно:  $-17...-17.2$  дБ. Период размещения элементов эквивалентного линейного раскрыва АР по оси  $X$  равен  $0.57\lambda$ . Максимальный угол отклонения луча до появления дифракционного лепестка составляет в этом случае  $\theta_{\max} = 49^\circ$ . Поэтому уже при  $\theta_0 = 45^\circ$  на краю области видимых углов появляется первый боковой лепесток ближайшего интерференционного максимума, а при  $\theta_0 = 60^\circ$  интерференционный максимум оказывается в области видимых углов. Это приводит к снижению коэффициента усиления до  $36.9$  дБ при  $\theta_0 = 45^\circ$  и  $33$  дБ при  $\theta_0 = 60^\circ$ . Отметим, что в данном случае при сканировании допускается появление на краю СЭС дифракционных лепестков с уровнем, не превышающим уровень главного луча.

При сканировании АР в плоскости  $YOZ$  интерференционный максимум остается за пределами области видимых углов. Коэффициент усиления снижается по сравнению с исходным значением ( $39.14$  дБ) до  $38.5$  дБ при  $\theta_0 = 30^\circ$ ,  $37.6$  дБ при  $\theta_0 = 45^\circ$  и  $36$  дБ при  $\theta_0 = 60^\circ$  соответственно.

Для проверки практической реализуемости данного технического решения был изготовлен макет 60-канальной распределительной системы на РВ (рис.3). Макет изготовлен на прецизионном фрезерном и электроэрозионном центрах и состоит из 4-х блоков или «слоев» (рис.3,б). Блок 1 представляет собой РВ без верхней крышки и содержит коаксиальный фидер и настроечные винты. По периметру радиального волновода располагаются клиновидные поглощающие нагрузки из специального диэлектрика (на рис. не показаны). Блок 2 образует верхнюю крышку РВ с системой круглых отверстий под коаксиальные выходы. Блок 3 содержит переходы на волноводы прямоугольного сечения и коаксиальные зонды с фторопластовыми втулками, которые вставляются в отверстия блока 2, образуя отрезки коаксиальных линий. Последние входят в состав коаксиально-волноводных переходов с коаксиального на прямоугольный волновод. Верхний 4-й блок состоит из отрезков прямоугольных волноводов. В процессе измерений в каждый волновод помещается согласованная нагрузка в виде диэлектрического клина, а на измеряемый выход помещается волноводно-коаксиальный переход.

Результаты измерений частотной характеристики КСВ при возбуждении распределительной системы с коаксиального входа при согласованных волноводных выходах, показали, что в рабочем диапазоне частот, составляющем 3%,  $КСВ=1.4...1.65$ .

В расширенном диапазоне частот (30%) КСВ не превышает 2.1, что в целом хорошо согласуется с результатами расчетов.

Таким образом, изложенный численно-аналитический электродинамический метод расчета распределительной системы на радиальном волноводе, позволяет найти вектор длин коаксиальных зондов, обеспечивающих необходимое амплитудно-фазовое распределение, и получить оценки характеристик направленности и согласования многоэлементной ФАР.

Исследованы характеристики согласования и направленности 2220-элементной ФАР миллиметрового диапазона с распределительной системой на радиальном волноводе в секторе сканирования до  $\pm 60^\circ$ . Реализуемость предложенного технического решения подтверждена в ходе экспериментального исследования макета 60-элементной распределительной системы на радиальном волноводе.

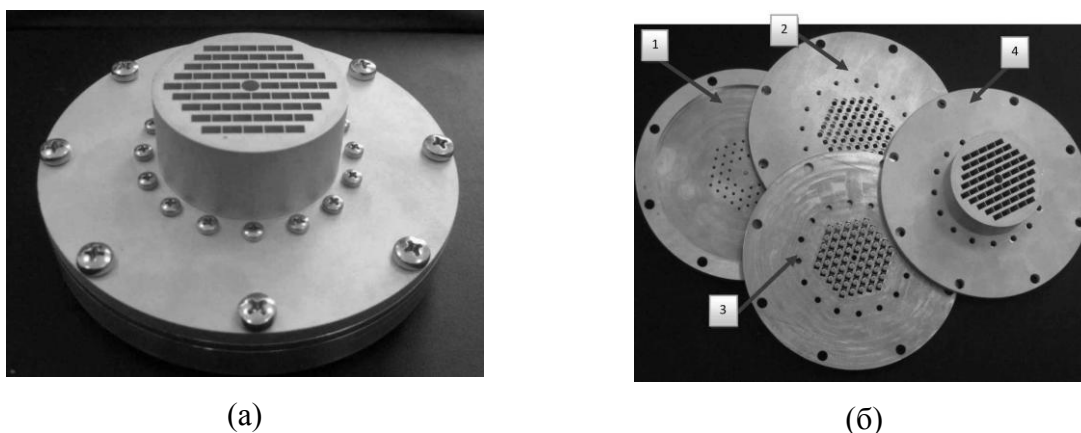


Рис. 3.

#### Библиографический список

1. Котов Ю.В., Яковлев А.С. Характеристики запердельных волноводных излучателей в ФАР на радиальной линии // *Антенны*, № 3 (118), 2007, с. 36-40.
2. Voskresensky D. I., Emelchenkov F. I., Kotov Y. V., Bukharev Y. V. Combined monopulse airborne phased-array antenna based on a radial waveguide // *15<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"* (CriMiCo'2005) 12-16 Sept., 2005, Sevastopol, pp.354-355.
3. N. Takemura, H. Miyashita, and S. Makino. Wave Analysis of Aperture Field Distribution for Probe-Fed Radial Line Planar Antennas // *Proc. IEEE Int. Microw. Symp.*, 2005, pp.363-367.
4. Miyashita H., Katagi T. Radial Line Planar Monopulse Antenna // *IEEE Trans on Antennas Propag.*, vol.44, №8, 1996, pp. 1158-1165.
5. H. Nakano, H. Takeda, Y. Kitamura, H. Mimaki, J. Yamauchi. Low-Profile Helical Array Antenna Fed from a Radial Waveguide // *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol.40, №3, 1992, pp. 279-284.
6. N. Takemura, H. Miyashita, S. Makino. Wave Analysis of Aperture Field Distribution for Probe-Fed Radial Line Planar Antennas // *Proc. IEEE Antennas and Propag. Society Int. Symp.*, 2005, pp.363-365.
7. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: 1988.