

ФАЗОВОЕ СКАНИРОВАНИЕ В КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

Ю.С. Ушаков, В.Н. Лозовский, А.А. Глухов

Рассмотрена возможность применения диаграммообразующей схемы Батлера для организации фазового сканирования в кольцевых антенных решетках.

Известные достоинства фазового управления лучом в плоских фазированных антенных решетках (ФАР) непосредственно реализовать в кольцевых (цилиндрических) антенных решетках (АР) не удастся из-за необходимости формировать перемещающееся по кольцу с движением луча не только фазовое, но и амплитудное распределение. Вместе с тем кольцевые АР, благодаря осевой симметрии, обеспечивают электронное управление лучом на 360° в азимутальной плоскости, что дает возможность заменить ненадежные и дорогие в эксплуатации механические системы сканирования на бесприводные электронносканирующие ФАР с высоким темпом обзора пространства.

Принципиальная возможность фазового управления лучом в кольцевых АР была установлена давно [1], причем было показано, что применение для возбуждения кольцевой АР диаграммообразующей схемы (ДОС) с матрицей возбуждений

$$U = \frac{e^{-j\frac{2\pi}{N}(n-1)(m-1)}}{\sqrt{N}}, \quad n, m = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

т.е. известной схемы Батлера, позволяет ансамблем из N фазуемых генераторов, подключенных ко входам схемы, сканировать в азимутальной плоскости.

Естественно, что применение ДОС Батлера для управления лучом в кольцевой АР будет иметь практический смысл лишь при условии реализуемости схемы с приемлемыми параметрами.

Для прояснения возможностей данного способа фазового сканирования в кольцевой АР мы приводим результаты исследования характеристик решетки из 128-ми элементов в виде волновых каналов (ВК), размещенных перед металлическим цилиндром, возбуждаемой системой из 128-ми фазуемых генераторов через ДОС Батлера. Диаграммообразующая схема Батлера представляет собой многослойную полосковую конструкцию на симметричных полосковых линиях (СПЛ). Пересечения линий внутри схемы, число которых при $N = 128$ равно 5664 (см. [2] формулу 1), устранены ценой размещения элементов ДОС в 4-х слоях СПЛ и оптимального выбора топологии схемы и ее элементов. В диапазоне частот 5...6 ГГц полная длина каналов составляет примерно 0,9 м, а сама ДОС размещается в блоке размерами $6 \times 6 \times 0,2$ дм³. Расчетная величина потерь в схеме на частоте 6 ГГц равна 1,5 дБ.

Известно, что максимальный коэффициент усиления антенны при незначительной величине взаимной связи излучателей достигается при их возбуждении токами, пропорциональными комплексно-сопряженным выборкам из диаграмм направленности (ДН) излучателей в направлении фазирования решетки.

Сформировав по этому правилу столбец оптимальных токов i_{opt} образуем циклической перестановкой его элементов квадратную матрицу оптимальных токов:

$$[i_{\text{opt}}] = \begin{bmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_{N-1} & i_N \\ i_2 & i_3 & \dots & i_N & i_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ i_{N-1} & i_N & \dots & i_2 & i_{N-2} \\ i_N & i_1 & \dots & i_{N-2} & i_{N-1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В азимутальной плоскости ей соответствует веер из N одинаковых, смещенных друг относительно друга на угол $\Delta\varphi = 2\pi/N$ оптимальных ДН.

Найдем комплексные амплитуды возбуждений генераторов, формирующих ДН в направлении $\varphi = 0^\circ$, применив известную [1] процедуру диагонализации матрицы [2] системой N ее собственных ортонормированных векторов (мод (1)):

$$\{|\lambda_n| e^{j\psi_n}\} = [U^*] [i_{\text{opt}}][U], \quad (3)$$

где $|\lambda_n|$ и ψ_n – модуль и фаза n -го элемента диагональной матрицы, которые и есть амплитуды и фазы возбуждений n -го генератора на входах ДОС Батлера, (*) – знак комплексного сопряжения.

Сканирование лучом кольцевой АР осуществляется за счет управления фазами ψ_n , т.е. является фазовым, при неизменных для всех положений луча амплитудах возбуждений $|\lambda_n|$ собственных векторов (1) по входам ДОС.

В частности, как это показано в [1], равноамплитудное возбуждение входов ДОС Батлера

$$|\lambda_n| = 1 \quad n = 1, 2 \dots N \quad (4)$$

обеспечивает среднеквадратическое приближение ДН кольцевой АР к оптимальным ДН с токами в излучателях из (2).

На рис. 1 показана ДН кольцевой АР, оптимизированная по критерию максимума КНД. Ей соответствует спадающее распределение амплитуд N генераторов (рис. 2) на входах ДОС. Ширина луча $\sim 2,8^\circ$. Шаг решетки выбран равным $d/\lambda = 0,58$, т.е. больше полуволны и, как следствие, в области углов $100 \dots 150^\circ$ от нормали наметился широкий дифракционный максимум.

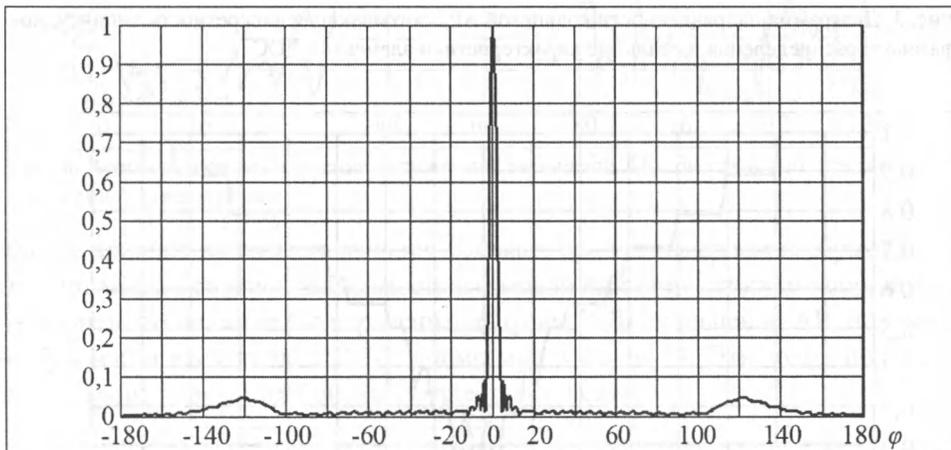


Рис. 1. Диаграмма направленности кольцевой АР с максимальным КНД

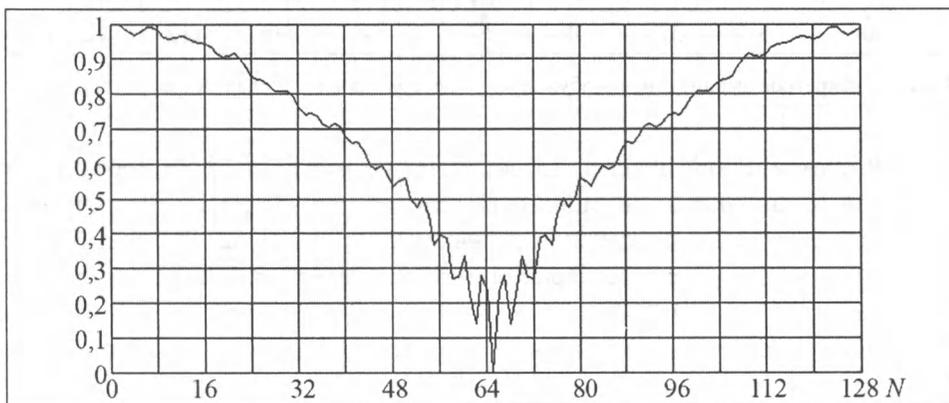


Рис. 2. Амплитудное возбуждение генераторов на входах схемы Батлера в зависимости от номера N фазированного генератора

В целом, уровень боковых лепестков (УБЛ) менее 20 дБ. Отметим, что максимуму КНД в плоской решетке соответствует уровень боковых 13 дБ.

Было исследовано влияние дискретности реализации амплитуд и фаз возбуждения генераторов, а также влияние реальных характеристик элементов ДОС на ДН кольцевой АР. На рис. 3 представлена ДН, амплитуды возбуждения генераторов которой реализовывались дискретно с шагом в 1 дБ (рис. 4), фазовое распределение устанавливалось с дискретом $22,5^\circ$ (четырёхразрядные фазовращатели), в матрице рассеяния ДОС, учитывались реальные характеристики элементов ДОС. Ширина луча при этом составила 3° , уровень боковых не превысил – 20 дБ.

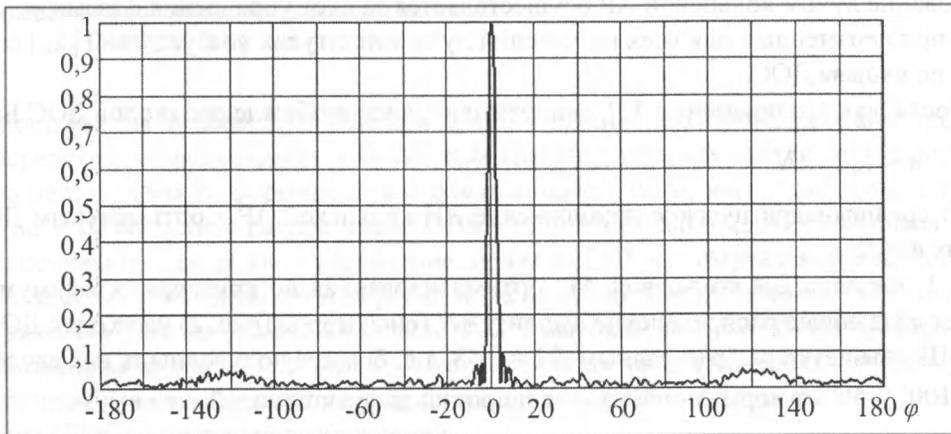


Рис. 3. Диаграмма направленности кольцевой АР, учитывающая дискретность амплитудно-фазового распределения и реальные характеристики элементов ДОС

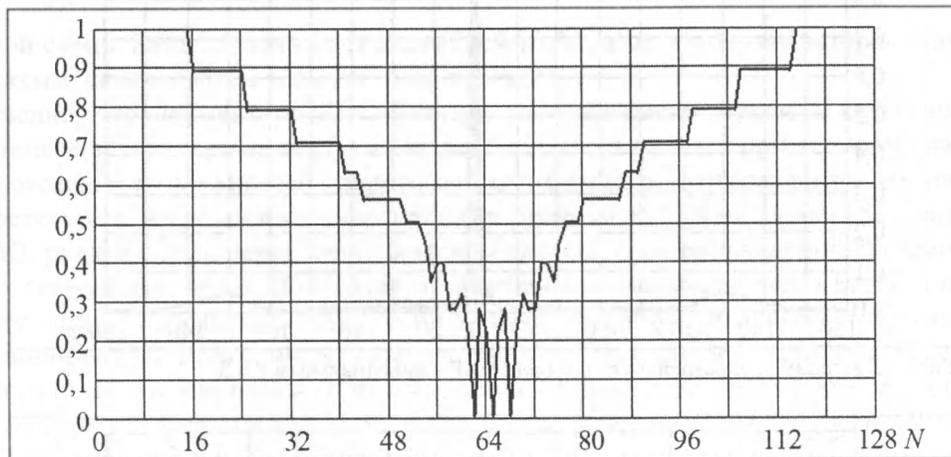


Рис. 4. Дискретное амплитудное возбуждение N генераторов на входах схемы Батлера

Значительный практический интерес представляет возможность формирования остронаправленной ДН системой N одинаковых по мощности генераторов. На рис. 5 показана такая ДН, возбуждение которой осуществлено дискретным фазовым распределением ($\Delta\varphi = 22,5^\circ$), а также в матрице рассеяния ДОС учтены реальные характеристики элементов. Ширина луча составила $2,8^\circ$, уровень боковых не хуже 15 дБ, причем существенно на эту величину влияет разреженность решетки. Представление о характере возбуждения излучателей решетки дает рис. 6, на котором для рассматриваемого случая возбуждения приведено амплитудное возбуждение излучателей кольцевой АР, там же показана парциальная ДН излучателя (пунктирная кривая), рассчитанная с учетом взаимодействия излучателей кольцевой АР.

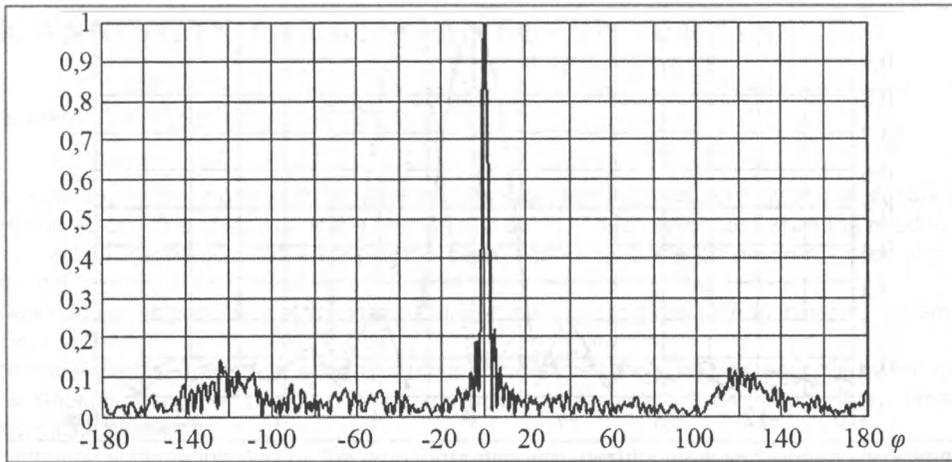


Рис. 5. Диаграмма направленности кольцевой АР при равноамплитудном возбуждении генераторов и реальных характеристиках элементов ДОС

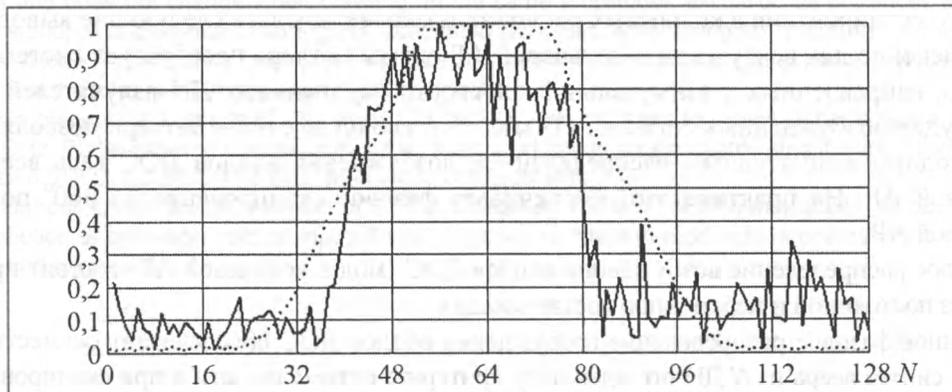


Рис. 6. Амплитудное возбуждение излучателей кольцевой АР при равноамплитудном возбуждении N генераторов

Значительное влияние на уровень дальних боковых при равномерном возбуждении входов ДОС, т.е. мод, оказывают моды с сильной зависимостью фазовой характеристики от координаты φ .

Чтобы ослабить это влияние была рассчитана (рис. 7) ДН кольцевой АР, полученная при равномерном возбуждении всех входов ДОС, кроме мод с 51 по 79. Эти моды полагались равными нулю. Как видим уровень дальних боковых существенно снизился.

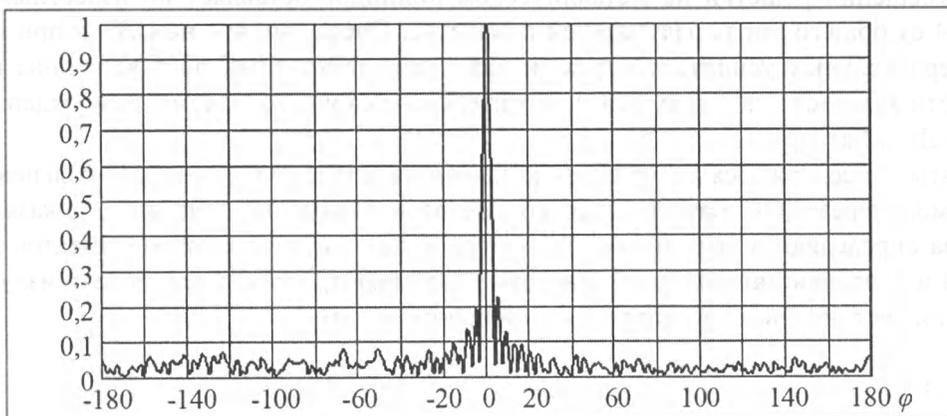


Рис. 7. Диаграмма направленности кольцевой АР при равномерном возбуждении мод. Моды с 51 по 79 равны нулю

Представление о фазовом сканировании в кольцевой АР дает рис. 8, на котором показаны три положения луча равномерно возбужденной по входам ДОС кольцевой АР с шагом $\Delta\varphi/2 = \pi/N \sim 1,4^\circ$.

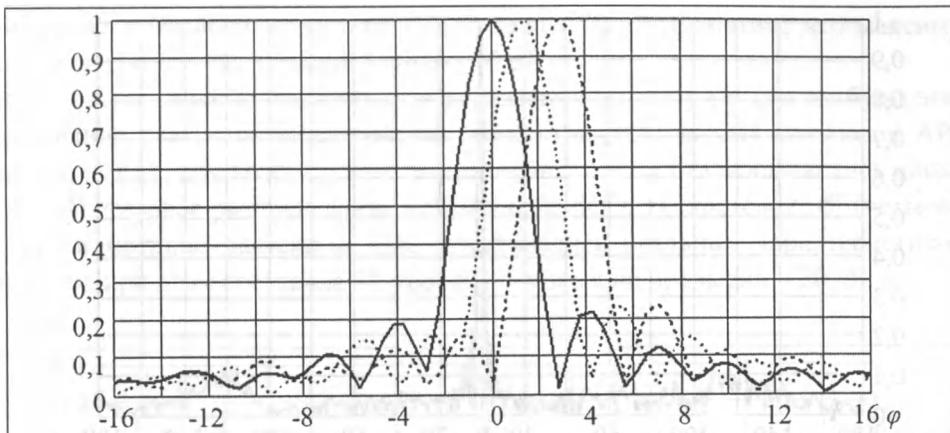


Рис. 8. Фазовое сканирование ДН в кольцевой АР

● Выполненное на примере кольцевой АР из 128-ми элементов исследование возможности фазового сканирования в кольцевых решетках позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение для возбуждения кольцевой АР схемы Батлера преобразует систему из N , как правило, направленных в азимутальной плоскости парциальных ДН излучателей в N равноамплитудно возбужденных согласно (1) мод. Это свойство схемы Батлера позволяет синтезировать одним амплитудным распределением возбуждения входов ДОС весь веер из N ДН кольцевой АР. На практике это обеспечивает фазовое сканирование на 360° по азимуту в кольцевой АР;

2. Фазовое распределение возбуждения входов ДОС (мод в кольцевой АР) состоит при сканировании из постоянной и переменной составляющих.

Постоянное фазовое распределение возбуждения входов ДОС обеспечивает совместно с амплитудным синтезом веера из N ДН по заданному критерию оптимальности и при сканировании не меняется. Переменная составляющая обеспечивает сканирование в пределах 360° по азимуту.

3. Амплитудное распределение возбуждения мод в кольцевой АР определяется требованиями, которым должна соответствовать ДН решетки, т.е. заданным критерием оптимальности. При равноамплитудном возбуждении мод и распределения, найденного согласно процедуре диагонализации (3), ДН кольцевой решетки представляет собой среднеквадратическое приближение к заданной оптимальной ДН. На практике последнее позволяет «фокусировать» мощность N усилителей в возбуждаемые излучатели кольцевой решетки, число которых при размещении решетки на металлическом цилиндре оставляет по известным причинам $1/3 \dots 1/4$ от общего числа излучателей в решетке. Очевидно, что на СВЧ и при использовании твердотельных усилителей трех- и даже четырехкратный рост величины излученной мощности является значительным положительным свойством схемы возбуждения с применением ДОС Батлера;

4. В статье не содержится материалов, касающихся диапазонных свойств кольцевой АР, возбуждаемой через ДОС Батлера, однако предварительные исследования показали, что эти свойства определяются частотными характеристиками излучателей и элементов ДОС-ответвителей и фазосдвигающих цепей. Расчеты показывают, что характеристики излучения и согласования устойчивы в десятипроцентной полосе частот.

Литература

1. Сазонов Д.М., Ушаков Ю.С. Синтез многолучевых кольцевых антенных решеток с полной круговой симметрией. – Радиотехника и электроника, АН СССР, 1970, №5, с. 897 – 904.
2. Ушаков Ю.С., Лозовский Н.В., Верига Б.А. Проблемные вопросы применения многолучевых антенн в базовых станциях сотовой связи, размещаемых на стратосферных платформах. – Научно-технические ведомости СПб ГПУ, 2007, №8, с. 8 – 11.

Поступила 16 июля 2008 г.

PHASE SCANNING IN THE RING ANTENNA ARRAYS

Yu.S. Ushakov, V.N. Lozovsky, A.A. Gluhov

Electronic scanning in the ring antenna arrays (AA) management involves not only phase signals in the radiator, but the amplitude and that complicates the options and costs of such antennas, while the need to replace existing devices with a mechanical movement in the beam azimuthal plane on electron - scanning system is extremely topical.

The article explores the possibility of a phase circular scanning roundabout AA to initiate a system of generators through Butler scheme.

Using scheme Butler in arrays with a large number of radiators ($N \geq 100$) was possible by the development of multi-layer stripline design, which eliminated many crossing connecting lines through the optimal choice of topology and circuit elements.

Butler distribution scheme initiated by the radiator grates are used for synthesis of fans the same direction diagrams (DD), optimized for specific criteria. Scanning beacon roundabout AA manages phases excitations entrances Butler scheme, that is fashion. Amplitude distribution at the entrances Butler scheme ensures optimum DD grills and does not change when crawling. In the same amplitudes excitation all entrances ensured Butler scheme standard approximation to a given actionable DD chart, while going on "focusing" all the power of the same amplitude N generators in amplitude-phase distribution of the radiator grates, which typically amounts to 0.25...0.3 of the total number of elements in the ring-AA.

The article presents the results of a study of 128 ring-AA - we radiators to initiate Butler scheme at frequencies of 5...6 GHz. Butler scheme is a voluminous an integrated circuit on symmetric stripline lines component in the block size 6.0x6.0x0.2 dm³. The estimated value of 1.5 dB loss.

DD roundabout AA have a beam width of 2.8...3.0 degrees, the level of side minus 20...15 dB, depending on the distribution of excitation sold on inputs Butler scheme, resistant to moderate largest discrete amplitudes (up to 1 dB) and phases (22, 5°).