

УДК 621.372.6

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ПИТАНИЯ ВОСЬМИЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

И. А. ФАНЯЕВ, В. П. КУДИН

Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь

Введение

Управление положением луча в пространстве может осуществляться с помощью многолучевых антенных решеток (МАР), представляющих антенны с несколькими независимыми входами, каждому из которых соответствует своя парциальная диаграмма направленности (луч). При возбуждении любого входа в раскрыве решетки формируется равноамплитудное распределение с линейным изменением фазы, причем величина фазового сдвига между соседними излучателями (и соответственно направление максимума диаграммы направленности) зависит от номера входа. В многолучевых антеннах возможно также одновременное возбуждение нескольких входов, что соответствует одновременному существованию нескольких лучей в пространстве и существенно расширяет возможности применения подобных антенных решеток. Формирование требуемого распределения обеспечивается специальным многополюсником, называемым диаграммообразующей схемой (ДОС).

Известно множество практических схем МАР. Наиболее распространенными являются МАР на основе параллельной ДОС (матрица Батлера) и последовательной ДОС (матрица Бласса) [2]. Отличительным признаком и достоинством МАР на основе матричных ДОС является возможность составления схем из одинаковых, восьми-полюсных делителей мощности (мостов, направленных ответвителей), и набора фиксированных фазосдвигателей [3]. На практике чаще всего используется широко известная матрица Батлера [4], [5].

Главным недостатком, снижающим применение МАР на практике, является схемная и конструкторско-технологическая сложность ДОС. Этот недостаток особенно проявляется с увеличением числа лучей МАР. Поэтому основной целью является изыскание нового принципа построения ДОС, позволяющего существенно упростить ее конструкторскую реализацию. Значительная часть распределительных антенных систем изготавливается с использованием печатной технологии. Они обладают хорошими массогабаритными характеристиками и низкой стоимостью изготовления. Матрица Батлера имеет существенный недостаток, а именно, при увеличении числа излучателей растет число пересечений линий передач, что, в свою очередь, затрудняет реализацию схемы в полосковом исполнении на печатной плате. В схеме присутствуют узлы, в которых пересекаются одновременно до трех линий передач. От этого недостатка можно избавиться применением делителей мощности с полной связью (кроссоверы) или же построением схемы на многослойной плате.

В данной работе синтезируется схема с новой топологией. Построение схемы многополюсника предполагает определение его структуры, состава базовых элементов и требований к их номиналам исходя из заданной системы параметров. Синтез матричных ДОС с произвольным количеством входов приводится в ста-

тье [6], но в синтезируемых схемах получается большое число пересечений линий передач. Представленный метод не избавляет синтезированные ДОС от главного недостатка, ограничивающего их применение. В [7] также приводится синтез ДОС с произвольным числом входов на основе матрицы рассеяния многополюсника. Решение задачи синтеза не имеет определенной последовательности действий: существуют элементы и узлы СВЧ с одинаковыми характеристиками, и можно ожидать, что и многополюсники, имеющие разную структуру и разные элементы, могут обладать одинаковыми матрицами параметров. В ходе расчета определяют только параметры структуры, т. е. очередность соединения базовых элементов. Большая часть алгоритма синтеза основана на произвольном выборе тех или иных действий, что, к сожалению, приводит к затруднению использования данного метода для получения новых схем.

Основная часть

Для построения новой схемы была взята классическая матрица Батлера 8×8 выходов. Амплитудно-фазовое распределение на выходах ДОС описывается следующей формулой:

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

где $N = 8$ – число каналов; m – номер входа; n – номер выхода.

Схему нового распределительного многополюсника с заданной матрицей рассеяния (1) составим в виде каскадного соединения простейших (элементарных) распределительных многополюсников той же размерности, т. е. с тем же числом N входных и выходных линий (рис. 1). Каждый каскад – элементарный распределительный многополюсник – должен быть настолько простым, чтобы по его матрице рассеяния можно было воссоздать структуру получаемого элемента.

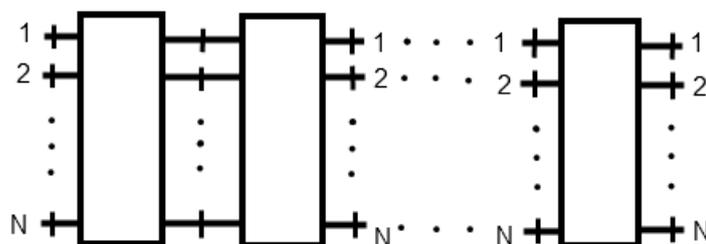


Рис. 1. Каскадное представление распределительного N -канального многополюсника

В матрице Батлера остается неизменным расположение направленных ответвителей, но заменяется элементарный каскад соединительных линий, который соединяет схему с выходами на каскад с меньшим числом пересечений. Тогда, зная конкретное расположение базовых элементов в схеме и вид элементарных каскадов соединительных линий, вследствие решения задачи синтеза по заданной ранее матрице рассеяния (1) получаем новую диаграммообразующую схему с более простой топологией. На рис. 2 приведена новая ДОС 8×8 выходов. Квадратами обозначены 3 дБ направленные ответвители с разностью фаз между выходами 180° . Цифрами слева (справа) схемы обозначены входы (выходы). Жирными точками – фазосдвигатели (значения фаз представлены в градусах).

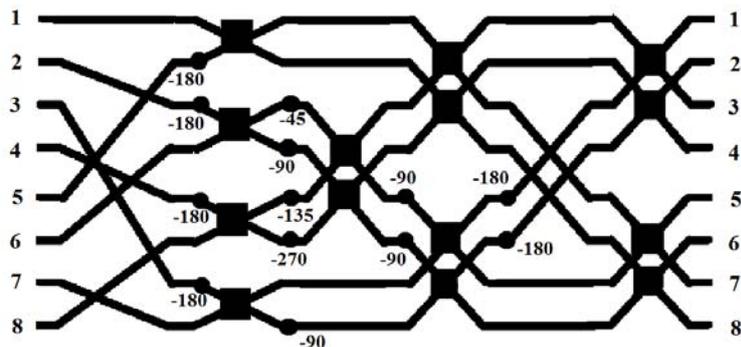


Рис. 2. Синтезированная ДОС 8×8 выходов

Из рис. 2 видно, что схема имеет 14 пересечений линий передач, если исключить последовательную нумерацию входов. Общее число пересечений составляет 22 – это на 6 пересечений меньше, чем в классической матрице Батлера. Синтезированная схема, также как и матрица Батлера, имеет симметричную структуру.

Сравнительный анализ

Расчет матрицы Батлера 8×8 выходов и синтезированной схемы был проведен методами теории СВЧ цепей [2] и матричного аппарата линейной алгебры. Весь алгоритм расчета параллельной ДОС можно свести к следующим этапам:

- расчет S -параметров базовых элементов (использование метода декомпозиции симметричных многополюсников – метод синфазного и противофазного возбуждения; использование матриц передачи и их свойств [7]);
- компоновка базовых элементов (объединение элементов определенным образом в многополюсник, который имеет N входов и N выходов с определенной матрицей рассеяния);
- последовательное объединение скомпонованных базовых элементов в многополюсник $N \times N$ выходов и расчет общей матрицы рассеяния (использование метода расчета матрицы рассеяния каскадного соединения двух многополюсников [2]);
- в случае необходимости перенумерация входов ДОС (использование матрицы перенумерации G [2]);
- расчет требуемых характеристик, используя компоненты общей матрицы рассеяния всей ДОС.

В качестве базовых элементов в схемах были взяты широко известный шлейфовый мост с затуханием 3 дБ и набор дискретных фазосдвигателей.

Были рассчитаны основные характеристики (амплитудно-фазовое распределение, коэффициенты отражения, развязка выходов, коэффициенты связи) матрицы Батлера 8×8 выходов и синтезированной схемы в частотном диапазоне 9–11 ГГц.

В качестве характеристик диаграммообразующих схем служат частотные зависимости амплитудных и фазовых распределений на выходах. Однако при большом числе выходов сложно проследить за изменением численных значений амплитуды (фазы) на всех выходах в частотном диапазоне. С целью упрощения визуализации результатов во всей рассматриваемой полосе частот предлагается просмотр амплитудного или фазового распределений на всех выходах ДОС одновременно. На рис. 3 и 4 приводятся графики зависимостей амплитуды, фазы от частоты соответственно. На определенной частоте строится интервал значений (от минимального до максимального) амплитуды (фазы), которые возникают на всех выходах ДОС при подаче сигнала на определенный вход.

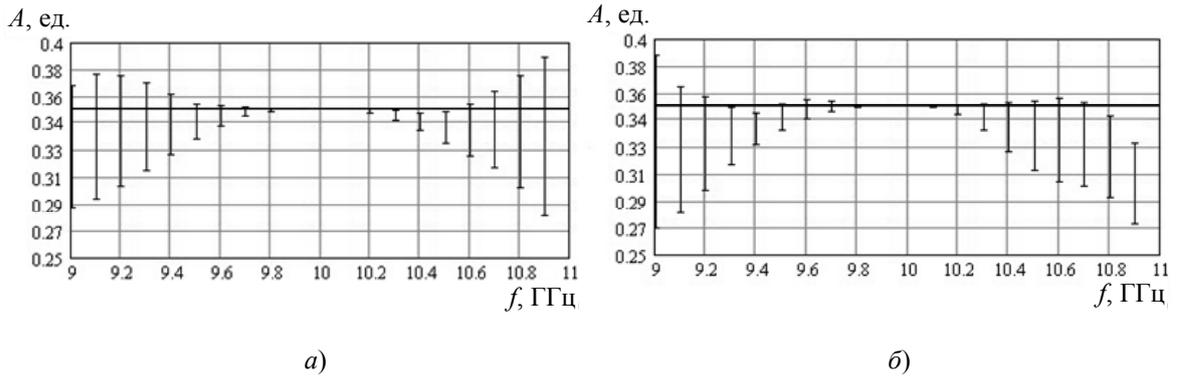


Рис. 3. Частотные зависимости амплитуды при подаче сигнала на 2-й вход ДОС:
 а – матрица Батлера; б – новая ДОС

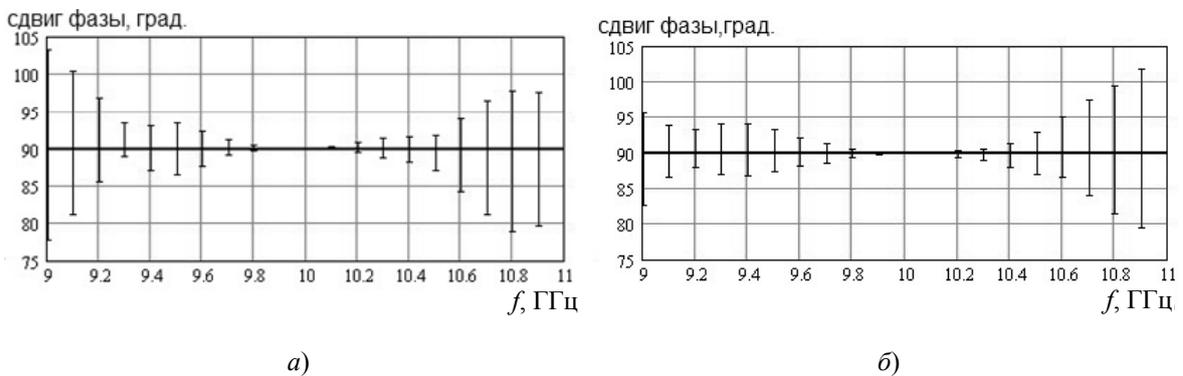


Рис. 4. Область возможных значений сдвига фаз, равного 90°:
 а – матрица Батлера; б – новая ДОС

Анализ зависимостей амплитуды от частоты позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении частоты ухудшается развязка и значительно возрастает уровень отражений на входах обеих схем (рис. 3). При увеличении же частоты в схемах преобладает нарушение равного деления мощности и сигнал начинает накапливаться на определенных выходах. Из-за этого значения амплитуды на разных выходах могут существенно отличаться между собой.

Из рис. 4 видно, что на определенной частоте сдвиг фаз может существенно отличаться от начального значения (90°), что приводит к искажению всей фазовой картины на выходах диаграммообразующих схем.

Построенные таким образом частотные зависимости позволяют оценивать разбаланс амплитуды (фазы) и производить анализ полученных значений на всех выходах ДОС одновременно.

На рис. 5 и 6 для сравнения приведены частотные зависимости S -параметров (дБ) двух схем. Пунктирными линиями (рис. 5) обозначены коэффициенты передачи $L_{i,j}$ с 1-го входа на первые 4 выхода для матрицы Батлера, сплошными линиями – коэффициенты передачи с 1-го входа на первые 4 выхода для синтезированной ДОС.

Частотные кривые коэффициентов передачи матрицы Батлера (рис. 5) имеют плавный, спадающий характер, а у кривых, описывающих коэффициенты передачи синтезированной ДОС, присутствуют незначительные осцилляции значений. Значения коэффициентов передачи лежат в пределах $-9 \pm 0,15$ дБ в частотном диапазоне 9,8–10,2 ГГц.

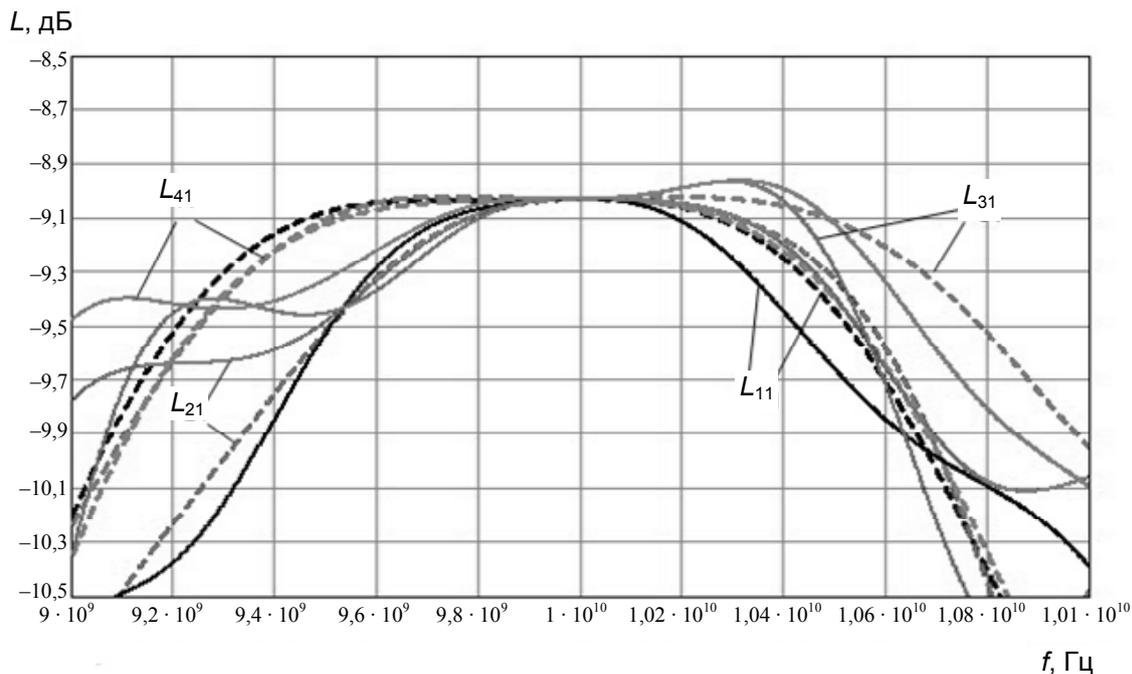


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов передачи для двух ДОС

На рис. 6 пунктирными линиями показаны коэффициенты связи $L_{i,j}$ 1-го входа с первыми 4 входами для матрицы Батлера, сплошными линиями – коэффициенты связи для синтезированной ДОС.

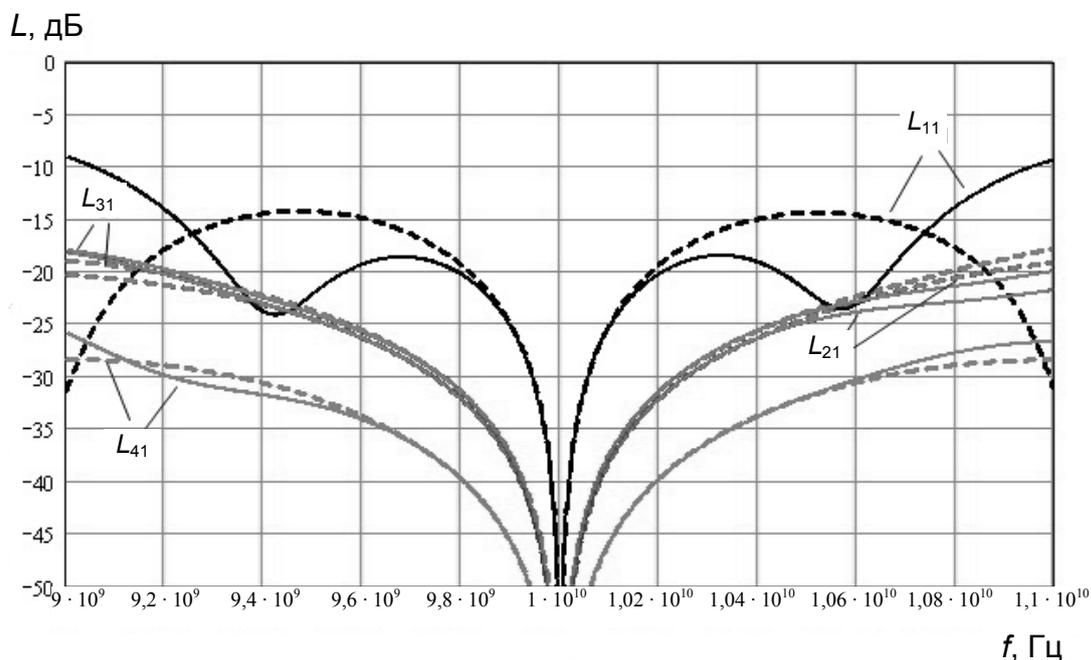


Рис. 6. Графики зависимости коэффициентов связи от частоты

Сопоставление полученных зависимостей коэффициентов связи для новой ДОС и схемы Батлера показывает, что кривые, характеризующие матрицу Батлера, в сравнении с кривыми синтезированной схемы являются более симметричными относительно центральной частоты (рис. 6). Рабочий частотный диапазон обеих схем по уровню -20 дБ составляет $9,8$ – $10,2$ ГГц.

Заключение

Для питания многолучевой антенной решетки предложена новая схема матричного коммутатора, которая в сравнении с классической матрицей Батлера имеет на 6 пересечений линий передачи меньше и, следовательно, является конструктивно более простой.

При численном анализе синтезированной схемы и классической матрицы Батлера 8×8 входов было установлено, что основные характеристики схем на всем рассматриваемом частотном диапазоне 9–11 ГГц ведут себя практически одинаково. Новая ДОО обеспечивают ее работоспособность в полосе частот $\pm 2\%$ от центральной частоты 10 ГГц.

Литература

1. Воскресенский, Д. И. Проблемы антенной техники / Д. И. Воскресенский ; под ред. Л. Д. Бахраха. – М. : Радио и связь, 1989. – 368 с.
2. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учеб. для радиотехн. специальностей вузов / Д. М. Сазонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 432 с.
3. Fakoukakis F. E., Diamantis S. G., Orfanides A. P., Kyriacou G. A. Development of an Adaptive and a Switched Beam Smart Antenna System for Wireless Communications. – 2005, Progress In Electromag. Research Symp., Hangzhou, China. – P. 276–280.
4. Neron, J.-S., Gilles-Y. Delisle Microstrip EHF Butler Matrix Design and Realization – 2005, ETRI Journal, Vol. 27, № 6. – P. 788–797.
5. Denidni T. A., Djaiz A., Habib A. M. A new ultra-wideband beamforming for wireless communications in underground mines. – 2008, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 4. – P. 1–21.
6. Sodin L. G. Method of Synthesizing a Beam-Forming Device for the N-Beam and N-Element Array Antenna for any N. – 2012, IEEE Tran. on Antennas and Prop., Vol. 60, № 4. – P. 1771–1776.
7. Сазонов, Д. М. Устройства СВЧ : учеб. пособие / под ред. Д. М. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1981. – 295 с.

Получено 25.10.2012 г.