

УДК 621.396.677

ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВАЯ ПЕЧАТНАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С МАТРИЦЕЙ БАТЛЕРА НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ

А. П. Горбачев, профессор Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), д.т.н.; argor@ngs.ru
Т. В. Мичурина, аспирантка НГТУ

Приводится численный анализ печатной многолучевой антенны с матрицей Батлера и дипольными излучателями. Рассматриваются правила формирования диаграмм направленности многолучевой антенны и условие импедансного согласования. Экспериментальные результаты, полученные с помощью российских технологий на российских диэлектрических материалах, подтверждают данный подход.

Ключевые слова: многолучевая антенна, матрица Батлера, дипольный излучатель, печатное исполнение.

Введение. Известно, что многолучевые фазированные антенные решетки (ФАР) используются для радиосвязи с пространственно разнесенными по азимуту корреспондентами без изменения ориентации самой ФАР [1]. Известно также, что дипольные излучатели обеспечивают при построении систем радиосвязи весьма высокую чистоту линейной поляризации излучения (т.е. малый уровень кросс-поляризации) [2]. Неснижающийся уровень требований в отношении габаритно-массовых показателей современных систем связи обуславливает все более широкое использование интегрально-групповых методов их реализации, когда все элементы ФАР выполняются либо путем удаления медной фольги с пробельных мест на несущей диэлектрической заготовке из органического материала, либо за счет вакуумного осаждения меди на соответствующие участки керамической подложки. В связи с этим по-прежнему остаются актуальными проблемы совершенствования как самих печатных дипольных излучателей, так и многолучевых ФАР на их основе с использованием в качестве диаграммо-образующего устройства (ДООУ) матрицы Батлера, работающих в самых различных диапазонах [3, 4].

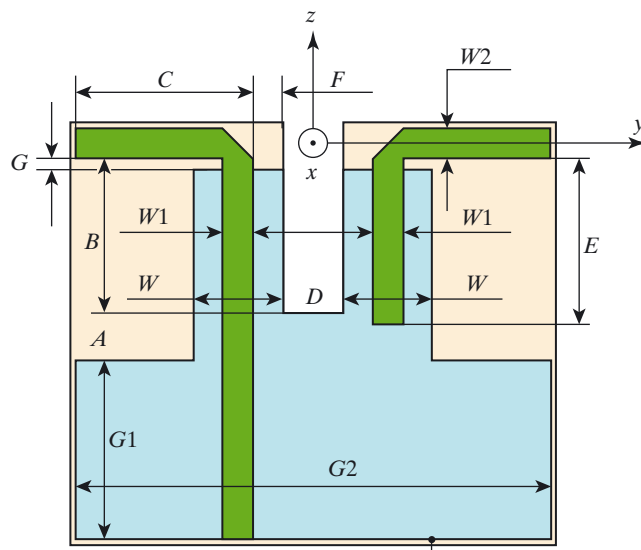
Рассмотрим потенциальные характеристики печатной четырехлучевой ФАР диапазона 2,8 ГГц, базовыми элементами которой являются усовершенствованные печатные дипольные излучатели.

Топология излучающей части ФАР. Топология используемого дипольного излучателя (рис. 1), предложенного в [5] и усовершенствованного в [6], реализована на несимметричной полосковой структуре и позволяет обеспечить относительную рабочую полосу частот не менее 6% при коэффициенте стоячей волны $K_{с.ч.} \leq 1,5$ и достаточно высокой чистоте поляризации. При этом уровень кросс-поляризации не превышает -12 дБ в пределах телесного угла главного максимума диаграммы направленности; ее ширина по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}^E$ в верхней половине плоскости $Y0Z$ электрического вектора \vec{E} (т.е., в направлении орта \vec{z}_0) практически совпадает с таковой для классического полуволнового диполя и равна 88° .

В то же время в плоскости $Y0Z$ магнитного вектора \vec{H} (рис. 1) диаграмма направленности не является всенаправленной (т.е. окружностью), так как заземленный участок металлизации $G1 \times G2$ существенно ослабляет излучение «назад» в направлении орта $-\vec{z}_0$. В результате ширина диа-

граммы направленности $2\theta_{0,5}^H$ в верхней половине плоскости $Y0Z$ составляет 163° . Использование предложенного в [6] симметрирующего устройства в форме «ласточкина хвоста» позволяет обеспечить не только упомянутую полосу частот 6%, но и существенно упростить сопряжение излучателя с печатной матрицей Батлера, которая имеет минимальные среди всех матричных схем (каковыми являются матрицы Батлера, Бласса и Ноленя [7]) диссипативные потери мощности в каналах. В итоге появляется возможность реализовать матрицу Батлера на связанных линиях и излучающие диполи в едином технологическом цикле на обеих сторонах стандартной отечественной двухсторонне фольгированной заготовки S_1 из материала ФЗМФ-2 (армированный стекловолокном фторопласт-4) толщиной $h = 0,27$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2,5$ (рис. 2).

Симметрирующие устройства («ласточкины хвосты») каждого излучателя формируются в заземленном участке металлизации заготовки S_2 одного из двух односторонне фольгированных наружных диэлектрических листов из отечественного материала ФАФ-4 ($\epsilon_r = 2,5$) толщиной $H = 1,5$ мм, между нефольгированными поверхностями которых размещается упомянутая тонкая заготовка S_1 с двухсторонней печатью согласно рис. 2. В результате матрица Батлера реализуется на симметричной полосковой структуре, заземленными плоскостями которой являются с одной стороны участок металлизации $L1 \times L2$ заготовки S_2 , а с другой — участок металлизации такого же размера третьей, более узкой, заготовки S_3 без «ласточкиных хвостов», т.е. полностью металлизированной с одной стороны. Все дипольные излучатели и их симметрирующие устройства



E2-116/1

Рис. 1

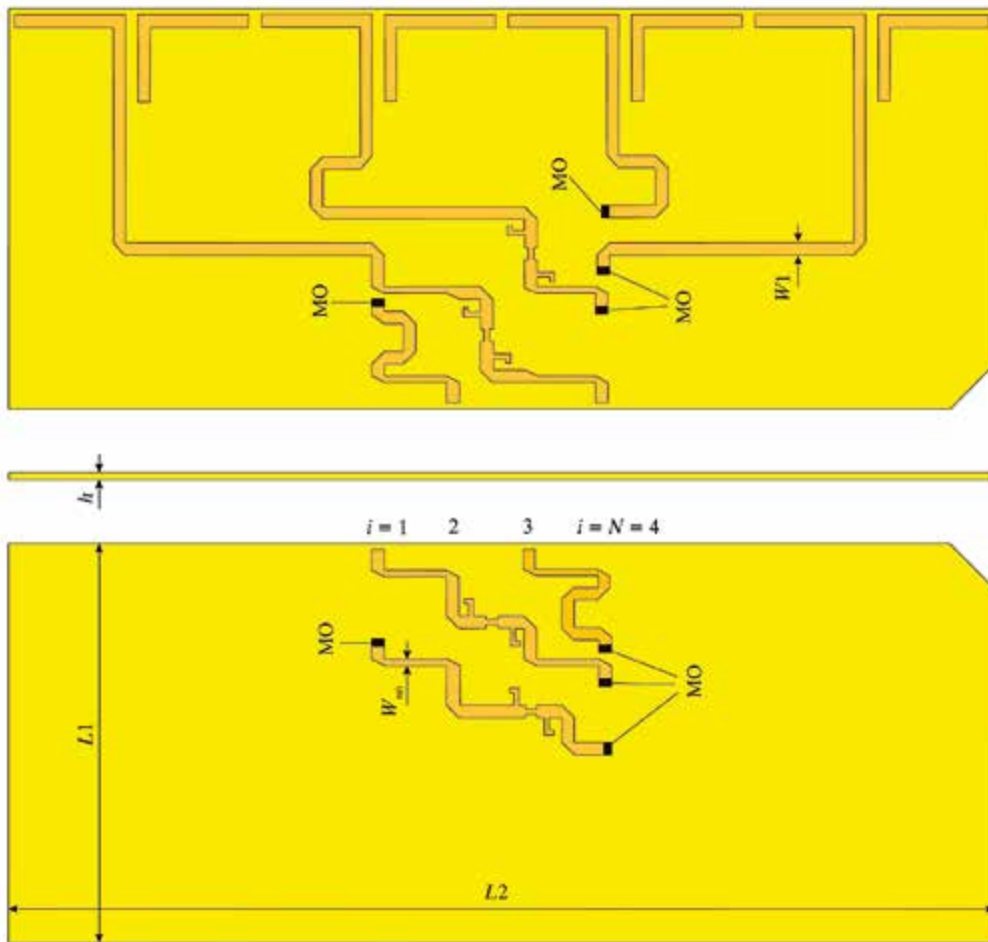


Рис. 2

(«ласточкины хвосты»), несмотря на то, что последние реализованы на заготовке S_2 , образованы несимметричной полосковой структурой, что достигается разными размерами заготовок S_2 и S_3 по ширине: у заготовки S_2 она (без учета краевых полей величиной 0,2 мм) равна $L1 + A + B + W2$, а у заготовки S_3 — только $L1$ (рис. 1, рис. 2). При этом длина $L2$ всех заготовок рассчитывается из условия [1], согласно которому расстояние между осями z соседних излучателей ФАР равно $\lambda_0/2$, т.е.

$$L2 = 3\lambda_0/2 + 2(G2/2) = 3\lambda_0/2 + G2. \quad (1)$$

Сформированная таким образом трехслойная фольгово-диэлектрическая (или металло-диэлектрическая) структура после сборки помещается в металлический прямоугольный

корпус с четырьмя коаксиально-полосковыми переходами СРГ-50-751ФВ таким образом, что заготовки S_1 и S_2 (с диполями и «ласточкиными хвостами») выступают за пределы корпуса (иными словами: возвышаются над ним) на величину (рис. 3, краевыми полями размера 0,2 мм вновь пренебрегаем):

$$H_{ФАР} = A + B + W2. \quad (2)$$

Матрица Батлера. Четырехлучевая матрица Батлера исследуемой ФАР выполнена традиционно [7] с использованием классических процедур расчета четвертьволновых направленных ответвителей [8]. В качестве фазовращателей (точнее говоря, фазозадерживателей) со сдвигом фазы -45° применяются рекомендованные в [4] удлинения соединительных симметричных полосковых линий между ответвителями в крайних каналах (рис. 2, $i = 1,4$), выполненными в форме тромбона с удлинением каждой его стороны на $\lambda_0/16$ (для удобства регулирования фазового сдвига за счет его изменения посредством перепайки перемычки длины тромбона при настройке ФАР). Принятая здесь замена 45-градусных широкополосных дифференциальных фазовращателей Шиффмана,

обычно используемых в матрицах Батлера [2, 3, 7], на более узкополосные тромбоны с той же фазовой задержкой $2(2\pi/16) = \pi/4$ на центральной частоте продиктована

стремлением упростить топологию ДОО и снизить стоимость ФАР в целом. Такое решение оправдано еще и потому, что печатные дипольные излучатели, как бы они не модифицировались конструктивно, все-таки достаточно узкополосные [6]. При этом в матрице использовались четвертьволновые полосковые направленные ответвители с квадратурными фазовыми характеристиками трактов. Ответвители реализованы путем полного наложения (перекрытия) широких сторон полосок в области связи на заготовке S_1 . При их ширине $W_{НО} = 0,4(2H + h) = 1,3$ мм (рис. 2), рассчитываемой для волнового сопротивления тракта 50 Ом по материалу справочника [8], обеспечивается коэффициент связи линий, равный 0,72 (переходное затухание равно 2,85 дБ, т.е. связь линий чуть сильнее 3 дБ), что способствует выравниванию уровней мощности в каналах ДОО с учетом диссипативных потерь в проводниках и диэлектрике конструкции ФАР. В то же время ширина $W1$ как несвязанных соединительных линий матрицы (рис. 2), так и питающей излучатель линии (рис. 1), составляет по данным того же справочника $W1 = 0,81(2H + h) = 2,7$ мм.

В спроектированном ДОО приняты также меры по снижению взаимного влияния соединительных линий передачи в области их пересечения, каковых в 4-лучевой матри-

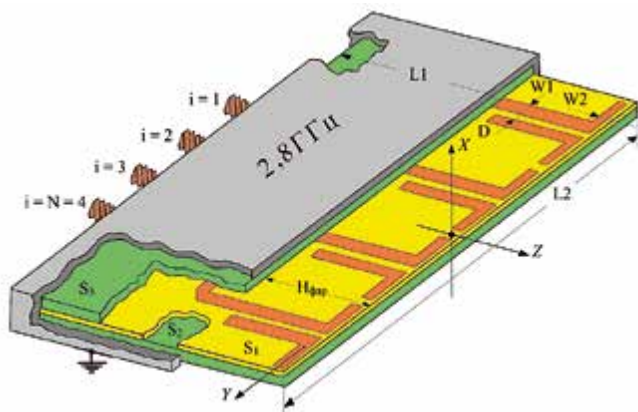


Рис. 3

це Батлера два. И хотя эти линии расположены с противоположных сторон заготовки S_1 (т.е., гальванический контакт исключен), их нежелательное взаимодействие через емкость взаимного перекрытия на частотах порядка 3 ГГц, может быть заметным. Для существенного уменьшения этого влияния в сравнительно узкой полосе частот диполей применено рекомендованное в [9] компенсирующее сужение соединительных линий в области их пересечения с параллельно включенными с обеих сторон пересечения короткими высокоомными разомкнутыми шлейфами (рис. 2). При этом для перехода соединительных полосковых линий с одной стороны заготовки ФЗМФ2 на другую ее сторону используются прямоугольные металлизированные отверстия шириной 0,5 мм, расположенные поперек соединительных линий на всю их ширину (рис. 2, аббревиатура МО). Последующие экспериментальные исследования подтвердили допустимость такой совокупности этих, известных из [3, 4, 9] решений, упрощающих топологию четырехлучевой ДДУ исследуемой ФАР. Ее печатная реализация выполнена с соблюдением отечественных конструкторско-технологических норм и требований, действующих на ряде радиотехнических предприятий г. Новосибирска.

Экспериментальные исследования. В результате удалось реализовать четырехлучевую дипольную ФАР (рис. 3) с габаритами печатной топологии $L_1 = 75$ мм, $L_2 = 216$ мм, $H_{\text{ФАР}} = 21,5$ мм и следующими ключевыми размерами (рис. 1, рис. 2, в миллиметрах):

$$A = 5; B = 14; C = 21;$$

$$D = 1; E = 12,5; F = 0,8;$$

$$G = 1; W = 5,7; W_1 = 2,7;$$

$$W_2 = 2,2; G_1 = 35; G_2 = 55.$$

Такая ФАР может найти применение не только как самостоятельная антенная система, но и как (после доработки ее топологии) базовый фрагмент более сложных 8- и 16-лучевых ФАР. Поскольку отклонение лучей симметрично относительно оси Z (рис. 3) при сохранении неизменной плоскости их поляризации Y_0Z , то результаты экспериментальных исследований отражены на графиках в полярной системе координат (рис. 4). На рисунке отображены сечения пространственных диаграмм направленности этой плоскостью при возбуждении ДДУ с соответствующего входа i ($i = 1...4$) для частоты $f_0 = 2,8$ ГГц. Наблюдается хорошее соответствие с классической теорией как по углам отклонения лучей, так и по степени сужения их диаграмм направленности за счет множителя решетки в плоскости Y_0Z электрического вектора \vec{E} при приемлемом уровне боковых лепестков, соответствующем равноамплитудному распределению возбуждения вдоль диполей. В то же время ширина лучей в плоскости их магнитного вектора \vec{H} сохраняется практически неизменной и равной таковой для уединенного печатного диполя (рис. 1) независимо от угла отклонения

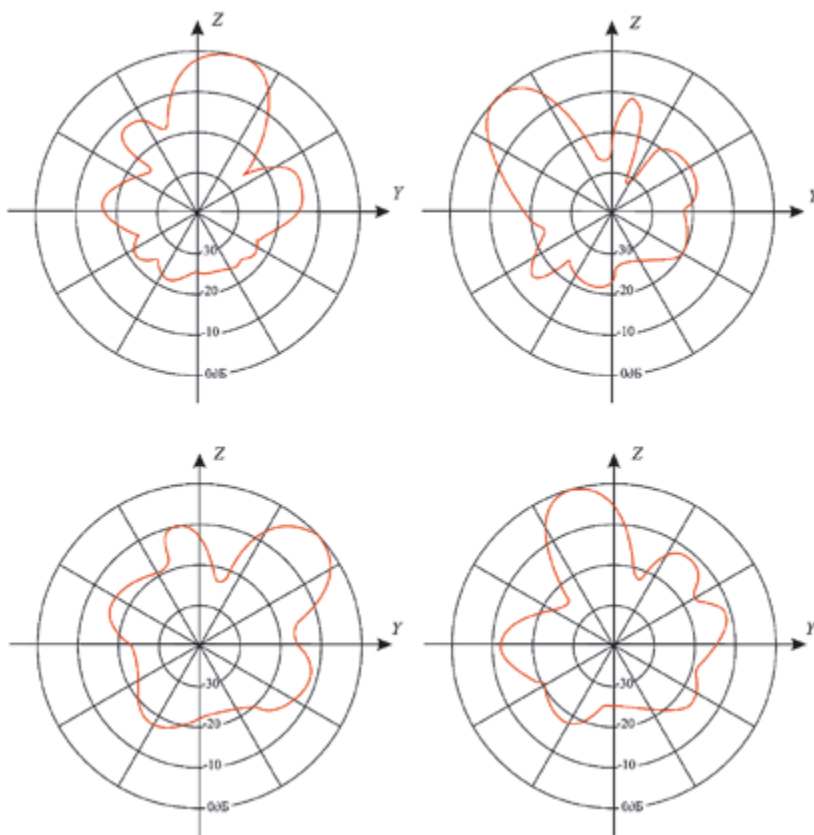


Рис. 4

луча в плоскости Y_0Z . Здесь целесообразно подчеркнуть, что плоскости магнитного вектора \vec{H} лучей, в отличие от уединенного дипольного излучателя (рис. 1), не совпадают с плоскостью X_0Z указанной на рис. 3 системы координат из-за отклонения лучей в окружающем ФАР пространстве (рис. 4). На приемлемом уровне остается также и величина кросс-поляризационного излучения, худшее значение которой в верхней полусфере ($z > 0$) составило -11 дБ для четвертого ($i = 4$) луча. При этом упомянутые излучательные свойства описанной ФАР сохраняются в полосе частот 2,74—2,86 ГГц: наибольшая величина входного $K_{\text{ст.У}}$ составила 1,6 на частоте 2,85 ГГц по входу второго ($i = 2$) луча. В этой же полосе частот минимальное значение развязки наблюдалось между третьим и четвертым каналами и составило 18 дБ на частоте 2,84 ГГц. Уровень потерь в каждом из каналов матрицы Батлера не превышал 0,6 дБ, а неравномерность деления мощности в каналах в рабочей полосе частот составила $\pm 0,3$ дБ при среднем значении 6,64 дБ. Расфазирование трактов, характеризующееся неравномерностью фазо-частотных характеристик, в рассматриваемой полосе частот не превышало $\pm 5^\circ$ от требуемых значений.

Заключение. Полученные в работе результаты свидетельствуют о перспективности использования предложенных в [5, 6] модифицированных печатных дипольных излучателей для построения компактных планарных многолучевых антенных решеток для мобильных инфокоммуникационных систем СВЧ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, грант № 7.1667.2011.

Получено после доработки 29.03. 13