

## Печатная многолучевая антенная решётка.

И.А. Богачёв, В.В. Демшевский, С.С. Сидоренко

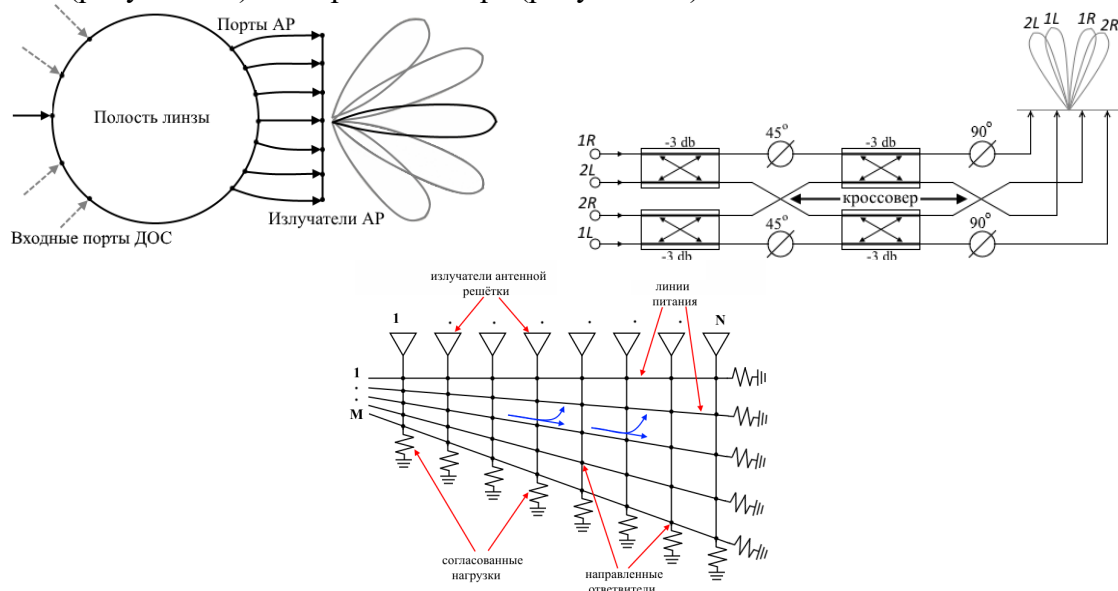
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в работе представлены результаты разработки и исследования многолучевой антенной решётки с диаграммообразующей схемой (ДОС), представляющую собой матрицу Батлера, размерностью 4x4. Антенная решетка с ДОС разработаны на основе технологии интегрированного в подложку волновода в К-диапазоне частот. Были выявлены особенности, влияющие на углы отклонения каждого из лучей ДН, оценен коэффициент усиления АР, а также проведена общая оценка параметров устройства.

**Ключевые слова:** многолучевая антенная решётка; диаграммообразующая схема; матрица Батлера; интегрированный в подложку волновод; коэффициент усиления.

### Введение

Увеличение скорости сканирования пространства в бортовых радиолокационных системах является актуальной задачей. При выборе способов решения такой задачи, отдельное место занимают многолучевые антенные решётки, свойства которых позволяют обеспечивать относительно простой способ практически мгновенного обзора области пространства, сохраняя сравнительно небольшие масса-габаритные характеристики и простоту схем управления, нежели антенные решётки (АР), использующие другие методы сканирования. Формирование независимых лучей диаграммы направленности (ДН) обеспечивается за счёт применения специальных устройств, называемых диаграммообразующими схемами. На протяжении многих лет широкое применение находят такие ДОС как: линза Ротмана (рисунок 1.1), матрица Бласса (рисунок 1.2) и матрица Батлера (рисунок 1.3).



**Рисунок 1.** Диаграммообразующие схемы 1- линза Ротмана; 2 – матрица Бласса; 3 – матрица Батлера

Использование волноводов, интегрированных в подложку (SIW – Substrate Integrated Waveguide) даёт большую возможность в разработке и технической реализации многолучевых антенных решеток, благодаря экранированной структуре,

малых габаритов и массы, а также технологичности изготовления.

Стоит отметить, что в отечественной литературе отражено небольшое количество работ, посвященных изучению многолучевых антенных решёток, особенно связанных с применением технологии интегрированного в подложку волновода. Например, работа [2] посвящена реализации антенной решётки с плоской диаграммообразующей схемой на основе линзы Ротмана. ДОС, реализованная в этой работе, выполнена на основе микрополосковой линии. Отметим, что применение открытых типов линий передач в подобных структурах нецелесообразно из-за большого уровня паразитных влияний близкорасположенных МПЛ, что может существенно исказить выходные характеристики.

Работа [8] – это одна из немногих статей, в которых рассматривается ДОС на основе волноводов, интегрированных в подложку. В ней описан ход моделирования матрицы Батлера, а также продемонстрирована работоспособность созданного прототипа, представляющего требуемые выходные характеристики.

### Матрица Батлера.

Имеется несколько вариантов реализации матрицы Батлера, которые детально описаны в статьях [7-10], но наиболее простой в реализации является схема с применением двух пар направленных ответвителей, двух кроссоверов и двух типов линий задержки.

Выберем в качестве материала подложки выберем композитный PTFE материал с малым значением диэлектрической проницаемости и низкими потерями. Наиболее подходящим является материал марки Rogers 5880. Рассчитаем устройство для работы в диапазоне частот 23-25 ГГц, чтобы КСВН на входах устройства был не более 2.

Для начала поочередно спроектируем все составные элементы матрицы Батлера: направленный ответвитель, кроссовер, линии задержки 45° и 90°, антенную решетку.

### Направленный ответвитель и кроссовер

Направленный ответвитель представляет собой два, соединенных по длинной стенке отрезка волновода (рисунок 2), в которой имеется разрыв для обеспечения ответвления мощности в заданном соотношении на выходы устройства.

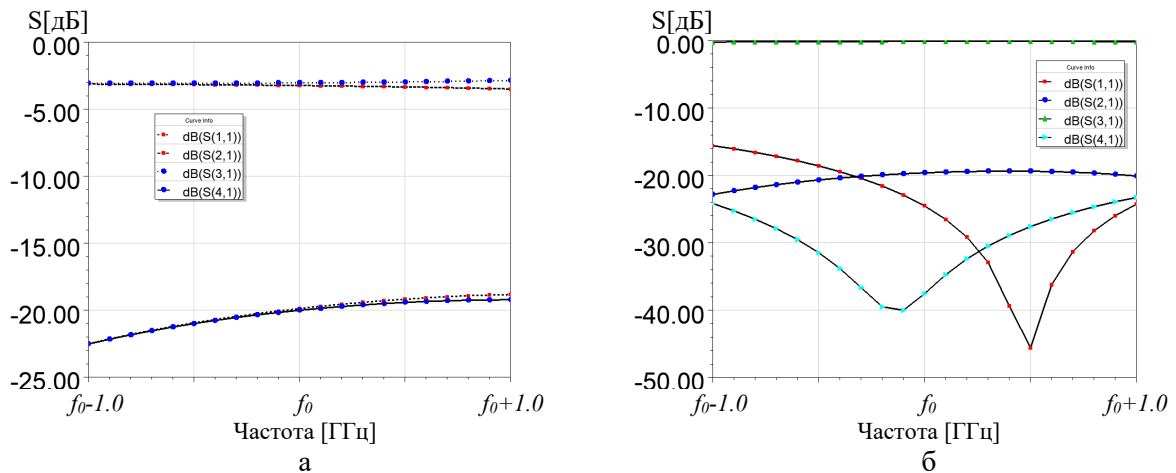


Рисунок 2. а - внешний вид направленного ответвителя, б - внешний вид кроссовера

На выходе формируются сигналы, равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на 90°. Разность фаз между двумя сигналами определяется уравнением (1).

$$\Delta\Phi = (\beta_1 - \beta_2)l \quad (1)$$

где  $\Delta\Phi$  – разность фаз;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – фазовые постоянные сигнала на выходах 1 и 2;  $l$  – длина направленного ответвителя. На рисунке 3 представлены S-параметры ответвителя.



**Рисунок 3.** а - S-параметры на выходах направленного ответвителя б - S-параметры на выходах кроссовера

Кроссовер (Рис.4) представляет собой направленный ответвитель вся мощность которого проходит в диагональное плечо и в целом напоминает классический направленный ответвитель, но имеет увеличенный разрыв в общей стенке.

Сдвиг фазы сигнала на выходе диагонального плеча (Рис.4, плечо 3) к прямому (Рис.4, плечо 2) должен составлять  $180^\circ$ . На рисунке 5 представлены S-параметры кроссовера.

### Линии задержки.

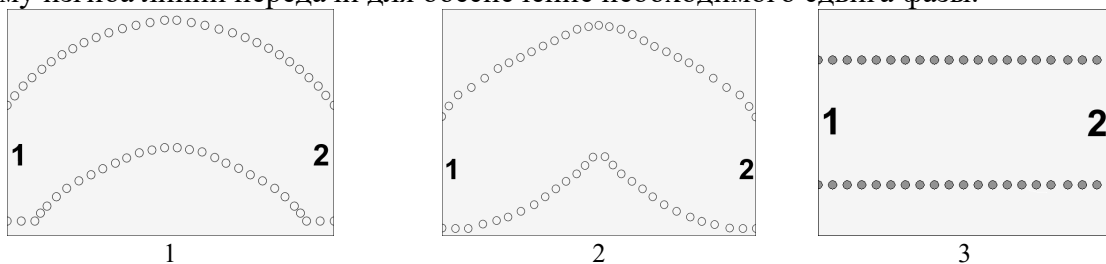
Линии задержки являются одним из способов получения нужного значения фазы сигнала на выходах устройства. Задержка фазы в рассматриваемых линиях определяется уравнением (2).

$$\Phi = k_z l \quad (2)$$

где  $\Phi$  – фазовая задержка;  $k_z$  – фазовая постоянная распространяющейся моды, а  $l$  – длина линии задержки. Разность фаз между двумя линиями задержки неравной ширины и равной длины определяется уравнением (3).

$$\Delta\Phi = (k_{z1} - k_{z2})l \quad (3)$$

где  $\Phi$  – так же фазовая задержка;  $k_{z1}$  и  $k_{z2}$  – фазовые постоянные распространяющейся моды в зависимости от ширины линии;  $l$  – длина линии задержки. Сдвиг фазы в представленной конструкции получается при намеренном изгибе отрезка линии передачи. На рисунке 6 представлены фазовращатели на  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , на которых видно форму изгиба линии передачи для обеспечения необходимого сдвига фазы.



**Рисунок 6.** Внешний вид линий задержки 1 –  $45^\circ$ ; 2 –  $90^\circ$ ; 3 – прямой отрезок линии

Рисунок 6 демонстрирует амплитуду линий задержки для  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , а также прямого участка линии задержки.

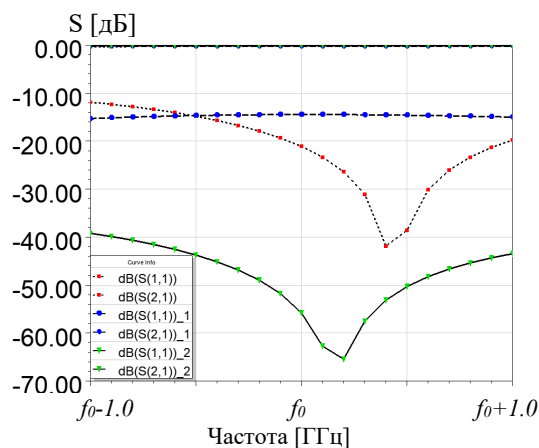


Рисунок 7. S-параметры линий задержки

### Антенная решётка

В качестве антенной решетки в представленной статье будем использовать волноводно-щелевую антенную решетку (ВЩАР). Выбор этого типа антенной решетки сделан по следующим соображениям:

- ВЩАР глубоко исследованы и поэтому легко рассчитываются;
- имеют простую конструкцию и легко реализуются на практике;
- в решаемой задаче ВЩАР не требуют дополнительной разработки СВЧ-перехода.

На рисунке 8 представлен внешний вид ВЩАР на основе SIW.

В ходе моделирования антенной решётки при синфазном и равноамплитудном возбуждении всей ВЩА, получены диаграммы направленности, которые представлены на рисунке 9.

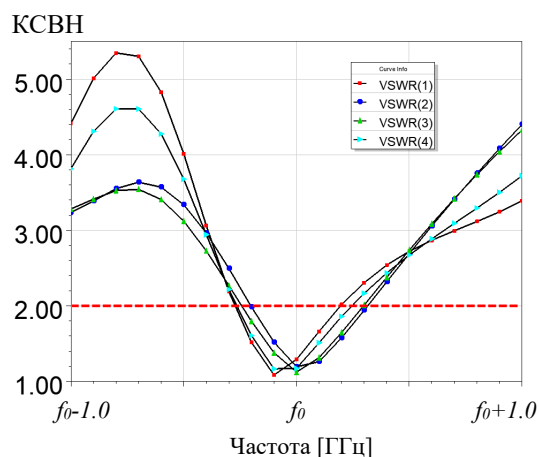
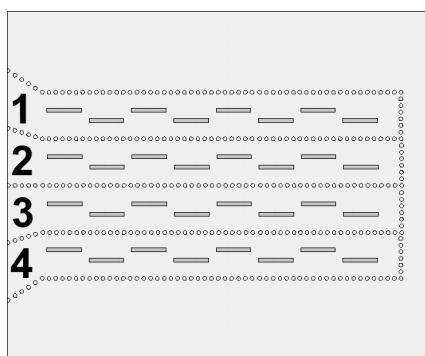
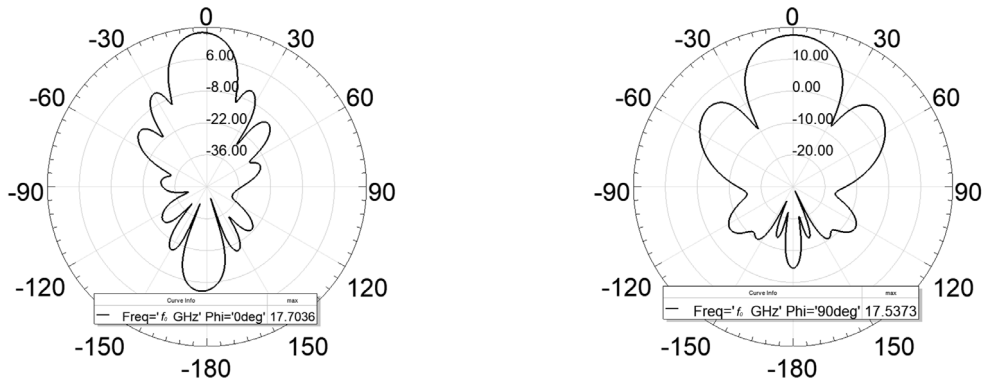


Рисунок 8. а - внешний вид волноводно-щелевой антенной решётки, б – КСВН на входах волноводно-щелевой антенной решётки

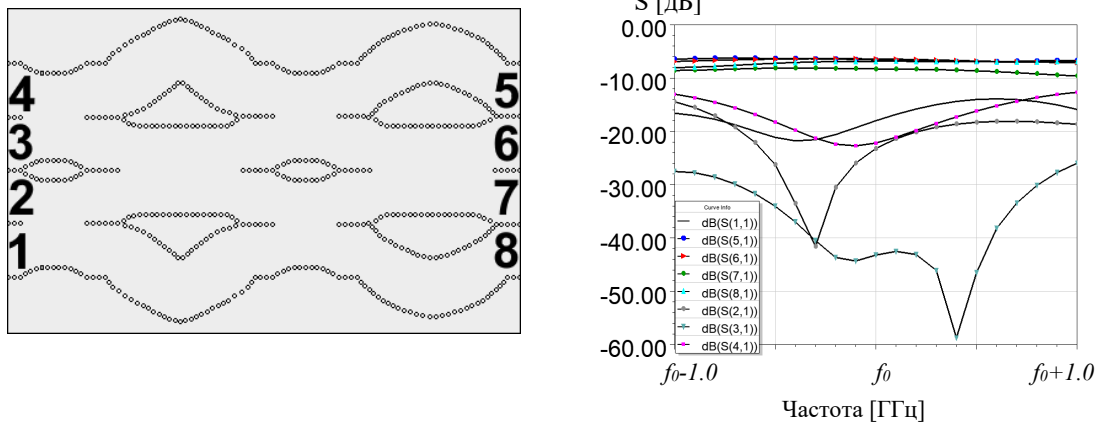


**Рисунок 9.** ДН волноводно-щелевой антенной решётки в азимутальной и угломестной плоскостях

Исходя из графика, представленного на рисунке 10, можно сделать вывод, что ДН ВЩАР в азимутальной плоскости имеет уровень боковых лепестков (УБЛ) -11.9 дБ и ширину по уровню -3 дБ 30.31°, и, соответственно, в угломестной -19.3 дБ, 16.09°.

### ДОС

Интеграция составных компонентов, описанных ранее, в единое устройство формирует матрицу Батлера. На рисунке 11 представлена структура 4-х канальной матрицы, в которой указаны входные/выходные порты.

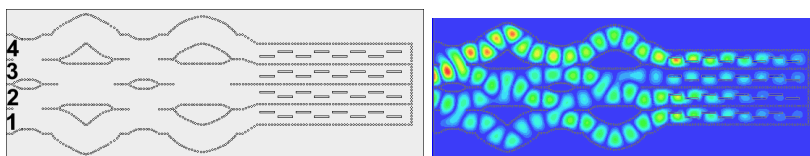


**Рисунок 11.** а - внешний вид матрицы Батлера б - S-параметры матрицы Батлера

На рисунке 12 представлены амплитуды сигналов всех портов при возбуждении порта 1. Из данного рисунка можно сказать, что все представленные сигналы имеют значение, хотя равномерное распределение мощности могло бы быть лучше, но из-за кроссоверов и других потерь наблюдается некоторое искажение амплитуды сигналов.

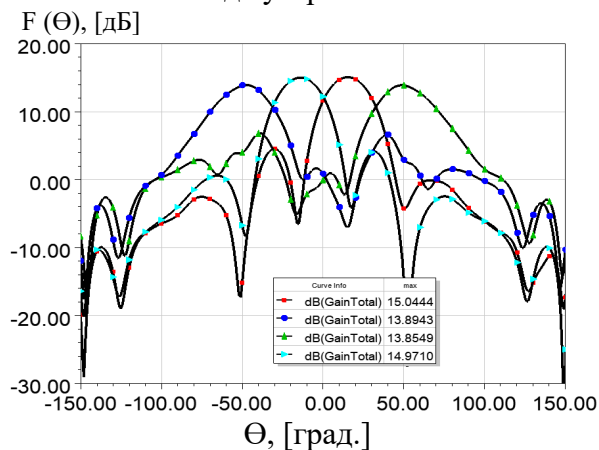
### Многолучевая антенная решётка.

На Рис.13 представлена полная конструкция матрицы Батлера в составе с ВЩАР и распределение электрического поля E. Отдельные входы ДОС показаны номерами 1-4.



**Рисунок 12.** а - Внешний вид многолучевой антенной решётки б - распределение поля  $E$  в многолучевой AP

В результате проведения электродинамического расчета были получены следующие ДН в зависимости от входа устройства.



**Рисунок 15.** Семейство ДН многолучевой антенной решётки

Как видно из графиков, представленных на рисунке 15, многолучевая антенная решётка, реализованная в настоящей работе способна формировать 4 независимых ДН, максимумы которых отклонены на  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ .

## Выводы

Результаты работы основываются на численном расчете разработанной строгой электродинамической модели многолучевой антенной решётки, соответствуют ожиданиям и демонстрируют полную работоспособность представленного устройства, а также схожи с результатами, приведенными в зарубежной литературе.

Разработанная многолучевая антенная решетка имеет небольшие габаритные размеры 125x45 мм, является полностью закрытой и может быть легко интегрирована в бортовые радиолокационные системы, к которым предъявляются жесткие требования по массе и габаритам.

### Список используемой литературы

1. Исследование диаграммообразующих устройств многолучевых антенных решёток на основе плоской линзы Ротмана / Д. Ю. Крюков и др. Воронеж – 2018;
2. Антенная решётка на основе линзы Ротмана / И.А. Зеленин и др. Воронеж – 2018;
3. Обзор принципов построения излучающих устройств с возможностью формирования нескольких лучей / С.Н. Паньчев и др. Воронеж – 2018;
4. Design of a Novel UWB Microstrip Antenna with SIW Feed / Abbas Ebrahimi, Hamid Khodabakshi. 2018;
5. Design of Rothman Lens Antenna at Ku-Band Based on Substrate Integrated Technology / S.A.R. Hosseini and others. Journal of Communication Engineering, Vol. 3 – 2014;
6. Multibeam SIW Slotted Waveguide Antenna System Feed by a Compact Dual-Layer Rothman Lens / K. Tekkouk and others. 2016. 504-516;
7. Design and Simulation of Switched-Beam Antenna using Butler Matrix Feed Network / Amit N. Kshirsagar and others. IJERT – 2014;
8. Design and Implementation of Planar 4x4 Butler Matrix in SIW Technology for Wide Band High Power Applications / T. Djerafi, N.J.G. Fonseca. Progress In Electromagnetics Research B, 2011 – 29-51;
9. Switched Beam Smart Antenna Based on a Planar 4x4 Butler Matrix For Wireless Power Transfer at 8.5 GHz / S. Al Morabeti and others. Mediterranean Telecommunications Journal, 2018;
10. A Novel Design Method for Blass Matrix Beam-Forming Networks / F. Casini and others. University of Perugia, 2015.