

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.677

**ФАНЯЕВ**  
Иван Александрович

**ПОЛОСКОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Минск 2018

Научная работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины».

Научный руководитель: **Кудин Виктор Пантелеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого

Официальные оппоненты: **Гринчик Николай Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отделения теплофизики ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

**Калинин Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент, начальник сектора НПООО «ОКБ ТСП»

Оппонирующая организация: Государственное учреждение «НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Защита диссертации состоится 21 марта 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: [dissovet@bsuir.by](mailto:dissovet@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 13 » февраля 2019 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций Д 02.15.02  
кандидат технических наук, доцент

Т.А. Пулко

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Решение трехмерной электродинамической задачи для цилиндрических антенных решеток над проводящим цилиндрическим экраном в литературе не встречается. Ввиду этого обстоятельства в данной работе предлагаются метод и алгоритм решения задачи о полях бесконечной цилиндрической фазированной антенной решетки (ФАР) над проводящей цилиндрической поверхностью, состоящей из одинаковых излучателей произвольной геометрии с заданным распределением тока. Рассмотрены два частных случая использования электрических излучателей в виде тонких полосков вертикальной и горизонтальной поляризации. Проведены численные исследования и установлены новые закономерности поведения основных характеристик рассматриваемых антенных решеток (АР). Проведен синтез амплитудного распределения на излучателях цилиндрических антенных решеток по критерию минимума уровня боковых и задних лепестков (УБЛ и УЗЛ) диаграммы направленности (ДН).

В диссертации для реализации многолучевого режима и питания ФАР над цилиндрической поверхностью предложены две новые диаграммообразующие схемы (ДОС)  $8 \times 8$  входов, которые в сравнении с классической матрицей Батлера имеют на 6 пересечений линий передачи меньше. Для одной из ДОС разработана компактная топология в виде трехслойной печатной платы. Устройство работает в широкой полосе частот благодаря предложенным широкополосным базовым элементам таким, как щелевой переход и «магический» Т-мост. Также произведен расчет и анализ основных характеристик схемы.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа подготовлена на основе результатов исследований, проведенных в ходе работ по следующим научным программам и темам:

- государственная программа научных исследований «Электроника и фотоника», НИР по теме «Математическое моделирование диаграммообразующих схем многолучевой антенной системы» с периодом 03.01.2011–31.12.2013, № ГР 20112847;

- государственная программа научных исследований «Электроника и фотоника», НИР по теме «Разработка математической модели, принципов схемотехнического построения и электродинамическое моделирование активных фазированных антенных решеток» с периодом 03.01.2014–31.12.2015, № ГР 20140958.

### **Цель и задачи исследования**

**Целью диссертации** являлась разработка метода и алгоритма электродинамического анализа антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью и определение закономерностей поведения характеристик фазированных антенных решеток для частных случаев полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации, а также синтез новой матричной диаграммообразующей схемы, реализующей многолучевой режим антенной системы на широкополосной элементной базе.

#### **Основные задачи диссертации, вытекающие из цели:**

– получить общие выражения для полного электромагнитного поля, возбуждаемого бесконечной цилиндрической фазированной антенной решеткой из излучателей произвольной геометрии с заданным распределением тока, расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью;

– разработать методы, алгоритмы и вычислительные программы для численного исследования фазированных антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации;

– провести численные исследования и установить закономерности поведения основных характеристик антенных решеток над цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации;

– провести синтез амплитудного распределения на излучателях цилиндрических антенных решеток по критерию минимума уровня боковых и задних лепестков;

– осуществить синтез топологии матричной диаграммообразующей схемы;

– провести численные исследования и оптимизацию характеристик базовых элементов выбранной топологии;

– провести численные исследования характеристик матричной диаграммообразующей схемы выбранной топологии.

**Объектами исследования** диссертации являлись: АР из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над цилиндрической поверхностью для радиоэлектронных систем кругового обзора; диаграммообразующая схема многолучевой антенной решетки.

**Предметом** исследования диссертации являлись: методы и алгоритмы численного решения задач возбуждения антенной решетки полосковыми излучателями вертикальной (горизонтальной) поляризации над цилиндрической поверхностью; методы синтеза диаграммообразующей схемы; основные характеристики вышеуказанных антенных решеток и ДОС.

### Научная новизна

1. Разработаны методика и алгоритм анализа фазированных антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризаций. Предложенный алгоритм реализован в виде эффективных вычислительных программ, которые позволяют в 100-300 раз быстрее по сравнению с известной коммерческой программой HFSS проводить численные исследования характеристик АР.

2. Проведены обширные численные исследования характеристик (КНД, УБЛ, УЗЛ, ширина главного лепестка) фазированных антенных решеток из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью и установлены закономерности их поведения при изменении геометрических параметров, а именно:

1) для ФАР из полосковых излучателей вертикальной поляризации:

- впервые показано, что для достижения уровня боковых и задних лепестков ниже -10 дБ значения периодов не должны превышать  $d_\varphi \approx 0,75\lambda$ ,  $d_z \approx 1\lambda$ ;
- при увеличении периода  $d_\varphi$  в пределах от  $0,55\lambda$  до  $1,85\lambda$  независимо от других геометрических параметров АР четко прослеживается монотонное увеличение УЗЛ, при этом УЗЛ достигает значения -4 дБ;

- оптимальным значением сектора возбуждения по критерию минимальности УБЛ, УЗЛ и достижения максимума КНД является сектор с углом  $\alpha = 120^\circ$ , что совпадает с результатами, полученными другими авторами;

- при изменении расстояния между цилиндром и излучателем в пределах  $\Delta \in [0,05\lambda; 0,45\lambda]$  и периодов  $d_z, d_\varphi \in [0,5\lambda; 0,7\lambda]$  КНД максимален при  $\Delta = 0,25\lambda$ .

2) для ФАР из полосковых излучателей горизонтальной поляризации:

- впервые установлено, что при увеличении периода  $d_\varphi$  в пределах от  $0,55\lambda$  до  $1,85\lambda$  независимо от других геометрических параметров АР четко прослеживается монотонное увеличение УЗЛ. При этом УЗЛ достигает значения -2,4 дБ. Оптимальными значениями периодов, когда УБЛ и УЗЛ достигают минимума, являются  $d_z = 0,6\lambda$ ,  $d_\varphi = 0,7\lambda$ ;

- показано, что для достижения уровня боковых и задних лепестков ниже -10 дБ значения периодов не должны превышать  $d_\varphi \approx 0,7\lambda$ ,  $d_z \approx 0,9\lambda$ ;

- численно подтверждено, что оптимальным сектором возбуждения по критерию минимальности УБЛ, УЗЛ является сектор  $\alpha = 130^\circ$ . Полученный результат на  $10^\circ$  больше, чем в ФАР из вертикальных полосковых излучателей;

- впервые установлено, что оптимальным значением расстояния между излучателем и цилиндром является  $\Delta = 0,3\lambda$ , при котором КНД максимален.

3. Произведен синтез амплитудного распределения ФАР из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью с помощью двух модификаций метода роя частиц по заданным критериям к параметрам ДН. Использованные методы

отличаются своей простотой, скоростью поиска экстремума и более эффективны по сравнению с известными итерационными или градиентными методами при решении подобных задач, позволяют добиться снижения УБЛ на 13–15 дБ.

4. Для реализации многолучевого режима и питания ФАР над цилиндрической поверхностью предложены два варианта синтезированных ДОС  $8 \times 8$  входов, которые в сравнении с классической матрицей Батлера имеют на 6 пересечений линий передачи меньше и являются конструктивно более простыми.

5. Предложена новая топология матричной диаграммообразующей схемы для реализации многолучевого режима цилиндрических антенных решеток на неиспользовавшихся ранее широкополосных базовых элементах, таких как щелевой переход и «магический» Т-мост, работающая в диапазоне 8,6–10,8 ГГц.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод и алгоритм анализа фазированных антенных решеток из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью. Предложенный алгоритм реализован в виде эффективных вычислительных программ, которые позволяют в 100-300 раз быстрее по сравнению с известной коммерческой программой HFSS проводить численные исследования характеристик антенных решеток.

2. Новые закономерности поведения уровней боковых и задних лепестков при изменении геометрических параметров фазированных антенных решеток из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью, а именно:

- впервые установлено, что при увеличении периода  $d_\varphi$  в пределах от  $0,55\lambda$  до  $1,85\lambda$  независимо от других геометрических параметров антенной решетки четко прослеживается монотонное увеличение уровня задних лепестков от -20 дБ до -2,4 дБ;

- показано, что для достижения уровня боковых и задних лепестков ниже -10 дБ значения периодов не должны превышать  $d_\varphi \approx 0,75\lambda$ ,  $d_z \approx 1\lambda$  (для ФАР из излучателей вертикальной поляризации) и  $d_\varphi \approx 0,7\lambda$ ,  $d_z \approx 0,9\lambda$  (для ФАР из излучателей горизонтальной поляризации).

3. Новые матричные диаграммообразующие схемы для осуществления многолучевого режима и питания цилиндрической фазированной антенной решетки, которые в сравнении с классической матрицей Батлера имеют на 6 пересечений линий передачи меньше.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в постановке задач исследований. Представленные в диссертации положения и

основные результаты получены лично соискателем под руководством доктора технических наук Кудина В.П. Соискателем разработаны: методика решения задачи возбуждения АР над проводящей цилиндрической поверхностью; программы численного моделирования АР вертикальной и горизонтальной поляризации, синтезирована диаграммообразующая схема для многолучевой антенной решетки. Все численные исследования осуществлены лично.

Соавтором опубликованных работ является научный руководитель.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты работы докладывались на следующих конференциях: научно-техническая конференция студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины»: «Творчество молодых 2012», апрель, 2012, Гомель; 8-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012», 23-27 апреля, 2012, Севастополь, Украина; The sixth International Conference «Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals», 17-21 September, 2012, Sevastopol, Ukraine; 10-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2014», 12-17 мая, 2014, Севастополь, Россия; III Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», апрель, 2014, Гомель; X International Conference on Antenna Theory and Techniques, 21–24 April, 2015, Kharkiv, Ukraine.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основное содержание диссертации отражено в 13 печатных работах, в том числе: 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК; 2 статьи в сборниках материалов международных научно-технических конференций; 4 тезиса докладов в сборниках материалов научно-технических конференций.

### **Структура и объем диссертации**

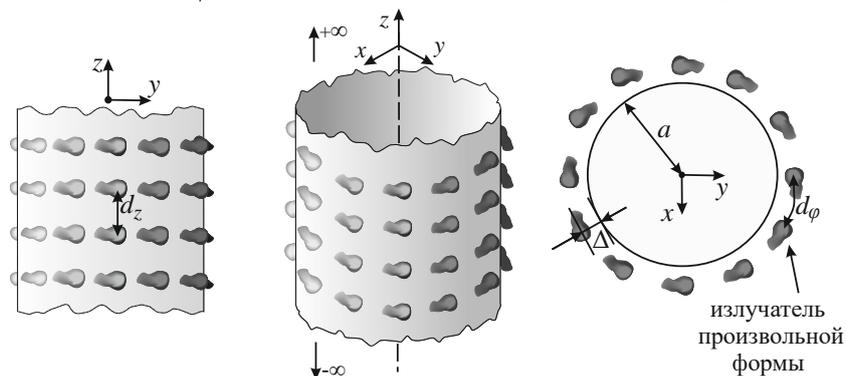
Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 158 страниц, из них 94 страницы основного текста, 63 рисунка на 21 странице, список использованных источников из 146 наименований на 11 страницах, список публикаций автора из 13 наименований на 2 страницах, 7 приложений на 30 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведен обзор литературы по методам решения задач о цилиндрических антенных решетках, современного состояния теории и практики диаграммообразующих схем для реализации многолучевого режима, а также сформулированы цель и основные задачи диссертации.

Во второй главе описана математическая модель бесконечной ФАР и разработана методика решения задачи о полях возбуждаемых бесконечной цилиндрической фазированной антенной решеткой над проводящей цилиндрической поверхностью из одинаковых излучателей произвольной геометрии с заданным распределением тока.

Фазированная антенная решетка расположена над идеально проводящим бесконечно длинным цилиндром (рисунок 1). Ось цилиндра совмещена с осью  $z$  цилиндрической системы координат; радиус цилиндра –  $a$ ; период решетки по оси  $z$  равен  $d_z$ ; излучатели располагаются на расстоянии  $\Delta$  от цилиндра; период решетки по оси  $\varphi$  равен  $d_\varphi = (a + \Delta)2\pi / N$ , где  $N$  – число излучателей в кольце.



**Рисунок 1. – Бесконечная антенная решетка излучателей над идеально проводящим круговым цилиндром**

Нумерация излучателей по оси  $z$  начинается с нуля и осуществляется индексом  $m$ , причем  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm\infty$ . Нумерация излучателей по оси  $\varphi$  начинается с нуля и осуществляется индексом  $p_\varphi$ , причем  $p_\varphi \in [0; N-1]$ . Излучатели по координате  $\varphi$  возбуждаются кольцевыми гармониками тока равноамплитудно с линейно изменяющейся фазой, равной  $2\pi q / N$ , где  $q \in [0; N-1]$  – номер гармоники (номер моды). Вдоль оси  $z$  линейный сдвиг фаз между соседними излучателями обозначен через  $\psi$ .

Полученные в главе и используемые в дальнейшем строгие выражения для нахождения полного электромагнитного поля цилиндрической решетки излучателей значительно проще и эффективнее известных, поскольку содержат меньшее количество сумм и интегралов. Для примера, поперечная составляющая электрического поля, создаваемого ФАР над проводящей цилиндрической поверхностью определяется выражением

$$E_{\varphi q}^{\Sigma} = \frac{-\pi ib}{2d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{\nu} e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \left\{ \begin{array}{l} \frac{-h_m}{\nu_m^2} \frac{q_n}{r} \cdot \left[ \begin{array}{l} Q_1^{\circ}(h_m) \left[ J_{q_n}(\nu_m r) - \frac{J_{q_n}(\nu_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(\nu_m a)} H_{q_n}^{(2)}(\nu_m r) \right], r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(\nu_m r) \left[ Q_2^{\circ}(h_m) - \frac{J_{q_n}(\nu_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(\nu_m a)} Q_1^{\circ}(h_m) \right], r > r' \end{array} \right. \\ \left. + \frac{ikW}{\nu_m} \cdot \left[ \begin{array}{l} Q_1^M(h_m) \left[ J'_{q_n}(\nu_m r) - \frac{J'_{q_n}(\nu_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(\nu_m a)} H_{q_n}^{(2)'}(\nu_m r) \right], r < r' \\ H_{q_n}^{(2)'}(\nu_m r) \left[ Q_2^M(h_m) - \frac{J'_{q_n}(\nu_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(\nu_m a)} Q_1^M(h_m) \right], r > r' \end{array} \right] \right\} d\nu,$$

где  $r$  – координата точки наблюдения поля;  $r'$  – координата точки источников поля;  $J_n(\nu r)$ ,  $H_n^{(2)}(\nu r)$  – функция Бесселя и Ханкеля 2-го рода соответственно и их производные;  $k$  – волновое число;  $b = a + \Delta$ ;  $\nu_m = \sqrt{k^2 - h_m^2}$ ;  $h_m = k_{z0} + \frac{2\pi m}{d_z}$ ,

$k_{z0} = \frac{\psi}{d_z}$  – начальный волновой вектор;  $q_n = q + nN$ ,  $n \in (-\infty; +\infty)$ ;  $W = 120\pi$  (Ом) –

волновое сопротивление свободного пространства;

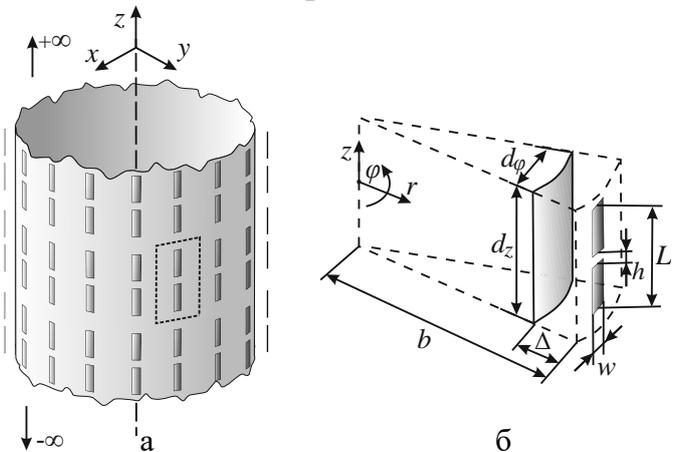
$$Q_s^{\circ}(h_m) = \frac{k^2 - h_m^2}{i\omega\varepsilon'_a} j_z^{\circ} R_{q_n}(\nu_m r') + \left( \frac{h_m}{\omega\varepsilon'_a} j_{\varphi}^{\circ} - j_r^M \right) \frac{in}{r'} R_{q_n}(\nu_m r') + \left( \frac{h_m}{\omega\varepsilon'_a} j_r^{\circ} + j_{\varphi}^M \right) \nu_m R'_{q_n}(\nu_m r'),$$

$$Q_s^M(h_m) = \frac{k^2 - h_m^2}{i\omega\mu'_a} j_z^M R_{q_n}(\nu_m r') + \left( \frac{h_m}{\omega\mu'_a} j_{\varphi}^M + j_r^{\circ} \right) \frac{in}{r'} R_{q_n}(\nu_m r') + \left( \frac{h_m}{\omega\mu'_a} j_r^M - j_{\varphi}^{\circ} \right) \nu_m R'_{q_n}(\nu_m r'),$$

при  $s=1$   $R_{q_n}(\nu_m r') = H_{q_n}^{(2)}(\nu_m r')$  и при  $s=2$   $R_{q_n}(\nu_m r') = J_{q_n}(\nu_m r')$ ;  $j_l^{(s)}$  – электрические и магнитные токи, возбуждаемые на нулевом излучателе ( $l$  – координаты  $r, \varphi, z$ ).

Полученные в диссертации общие выражения описывают полное электромагнитное поле в любой точке пространства, имеют значительно более простую форму по сравнению с известными и удобны для численных расчетов, а также построения эффективных вычислительных алгоритмов.

В третьей главе рассмотрена бесконечная ФАР, расположенная над идеально проводящим цилиндром, которая состоит из излучателей вертикальной поляризации (рисунок 2, а). Модели электрических излучателей выполнены в виде тонких полосок, ориентированных вдоль оси  $z$  (рисунок 2, б). Поперечные размеры излучателей гораздо меньше длины волны и продольных



а – антенная решетка; б – модель излучателя  
Рисунок 2. – Бесконечная антенная решетка над проводящим цилиндром

размеров, поэтому в решении учитывалась только  $z$ -ая компонента токов. Излучатель возбуждался напряжением в зазоре между полосками.

С учетом предложенной модели излучателя объемная плотность тока на нулевом излучателе определялась как:  $j_\varphi^0(r', \varphi', z') = K(\varphi', z')\delta(r' - b)$ , где  $K(\varphi', z')$  – поверхностная плотность тока. Полученное интегральное уравнение решалось методом Галеркина. В результате получалась система линейных уравнений с  $Q$  неизвестными:  $\sum_{u=1}^Q A_{p,u} \hat{c}_u = B_p$ , где  $p \in [1; Q]$ ;  $\hat{c}_u = c_u w \frac{NkL^2 \pi^2 W}{4d_z V_g}$ ,  $c_u$  – неизвестные коэффициенты;  $V_g = -E_g h$ ,  $E_g$  – напряженность электрического поля в зазоре;

$$A_{p,u} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \frac{v_m}{k} \right)^2 H_{q_n}^{(2)}(v_m b) Z_{q_n}(v_m a, v_m b) S_{q_n}^2 C_{n,p} C_{n,u}^*; B_p = \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{p\pi h_m}{2L}\right)}{p\pi h_m / 2L};$$

$$Z_{q_n}(v_m a, v_m b) = J_{q_n}(v_m b) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m b); S_{q_n} = \frac{\sin\left(\frac{q_n w}{2b}\right)}{q_n w / 2b}; C_{n,p} = \frac{p \left( (-1)^p e^{i \frac{h_m L}{2}} - e^{-i \frac{h_m L}{2}} \right)}{(h_m L)^2 - (p\pi)^2};$$

$C_{n,u}^*$  – комплексно-сопряженное  $C_{n,p}$ .

В цилиндрической решетке формирование однолучевой ДН осуществлялось с использованием концепции кольцевых (азимутальных) гармоник. В результате интеграл по спектральному параметру находился, используя метод стационарной фазы. Парциальная диаграмма направленности имеет вид

$$F(\theta, \varphi) = \frac{i}{\pi k b \sin(\theta)} \sqrt{\frac{Z_{inc}}{W}} \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{0,n}(q, k \cos(\theta)) e^{-iq_n \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right)},$$

где  $T_{m,n}(q, k_{z0}) = -\frac{\sqrt{d_z d_\varphi}}{\pi L} \frac{V_g}{V_{inc}} \left( \frac{v_m}{k} \right)^2 Z_{q_n}(v_m a, v_m b) S_{q_n} \sum_{u=1}^Q \hat{c}_u C_{n,u}^*$ ,  $Z_{inc}$  – сопротивление линии питания.

Диаграмма направленности антенной решетки равна

$$F^{общ.}(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{t=-\infty}^{\infty} F\left(\theta, \varphi - \frac{2\pi}{N} s\right) e^{ik d_z t \cos(\theta)} a_s e^{-ik b \sin\left(\varphi_0 - \frac{2\pi}{N} s\right)} a_t e^{-ik d_z t \cos(\theta_0)},$$

где  $\varphi_0$ ,  $\theta_0$  – направление фокусировки луча,  $a_s$ ,  $a_t$  – нормированные единичные амплитуды.

Предложенные алгоритмы реализованы в виде набора эффективных вычислительных программ, которые позволяют в 100-300 раз быстрее по сравнению с известной коммерческой программой HFSS, проводить численные исследования характеристик антенных решеток.

Ввиду того, что излучатели, лежащие вдоль образующей цилиндра, реализуют линейную антенную решетку свойства и характеристики которой достаточно хорошо описаны во многих источниках, здесь рассматривались поля

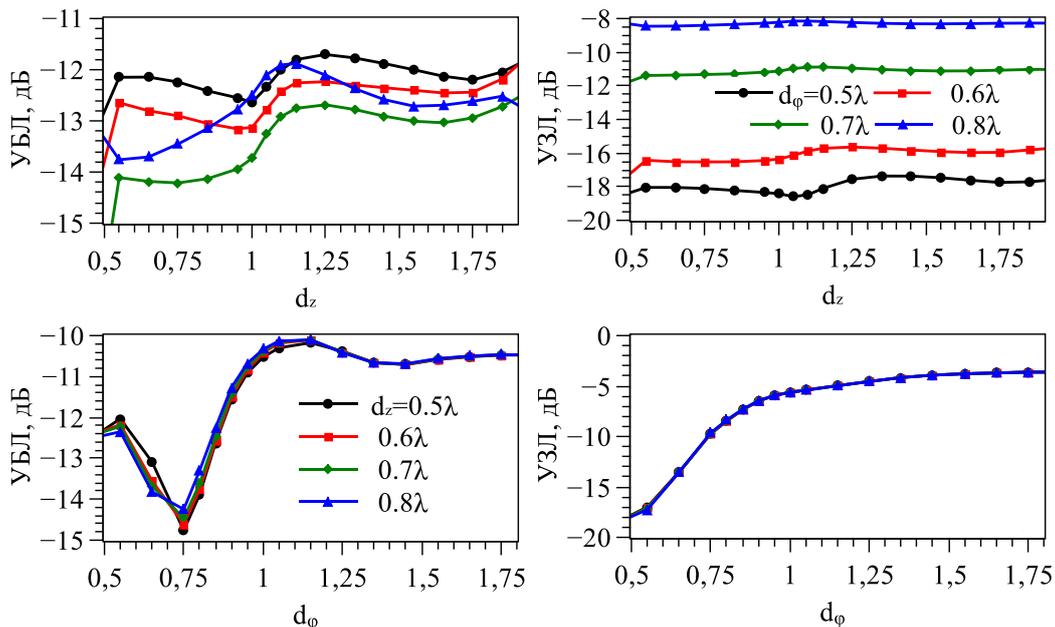
только в плоскости координаты  $\varphi$ . По всей работе рассматривалось возбужденное кольцо излучателей. Все остальные кольца излучателей были нагружены на согласованные нагрузки. Луч фокусировался в направлении  $\theta_0=\pi/2$ ,  $\varphi_0=0$ . Параметры излучателя:  $w=0,05\lambda$ ,  $L=0,5\lambda$ ,  $h=0,01\lambda$ . В качестве оптимизации энергетических затрат производилось возбуждение определенного сектора антенной решетки.

В главе проведены численные исследования характеристик (КНД, УБЛ, УЗЛ, ширина главного лепестка) ФАР над цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной поляризации при изменении геометрических параметров и установлены закономерности их поведения.

С помощью метода адаптивного роя частиц (APSO) была проведена оптимизация геометрических параметров АР, что позволило достичь низкого уровня КСВ на всех входах одновременно, не превышающего значения 1,75.

Впервые показано, что для достижения уровня боковых и задних лепестков ниже -10 дБ значения периодов не должны превышать  $d_\varphi \approx 0,75\lambda$ ,  $d_z \approx 1\lambda$ .

При увеличении периода  $d_\varphi$  в пределах от  $0,55\lambda$  до  $1,85\lambda$  независимо от других геометрических параметров АР четко прослеживается монотонное увеличение УЗЛ, при этом УЗЛ достигает значения -4 дБ (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Зависимости уровня боковых и задних лепестков фазированной антенной решетки от периодов антенной решетки ( $N=32$ ,  $\alpha=120^\circ$ )**

Оптимальным значением сектора возбуждения по критерию минимальности УБЛ, УЗЛ и достижения максимума КНД является сектор с углом  $\alpha=120^\circ$ , что совпадает с результатами, полученными другими авторами.

При изменении расстояния между цилиндром и излучателем в пределах  $\Delta \in [0,05\lambda; 0,45\lambda]$  и периодов  $d_z, d_\varphi \in [0,5\lambda; 0,7\lambda]$  КНД максимален при  $\Delta=0,25\lambda$ .

В главе для синтеза амплитудного распределения в раскрыве ФАР по критерию минимума УБЛ использовались две модификации метода роя частиц: хаотический двоичный рой частиц (CBPSO) и адаптивный рой частиц (APSO). На рисунке 4 показаны ДН ФАР при возбуждении синтезированными амплитудными распределениями. Кривая  $A_{Ns=1}$  – ДН при равноамплитудном распределении.  $N_s$  – номер возбуждаемого излучателя. Рассчитывалась кольцевая антенная решетка из  $N=32$  вертикальных излучателей с сектором возбуждения  $\alpha=120^\circ$ , с параметрами:  $d_z=0,7\lambda$ ,  $d_\varphi=0,6\lambda$ ,  $\Delta=0,25\lambda$ ,  $V_{inc}=1$  В,  $Z_{inc}=144$  Ом.

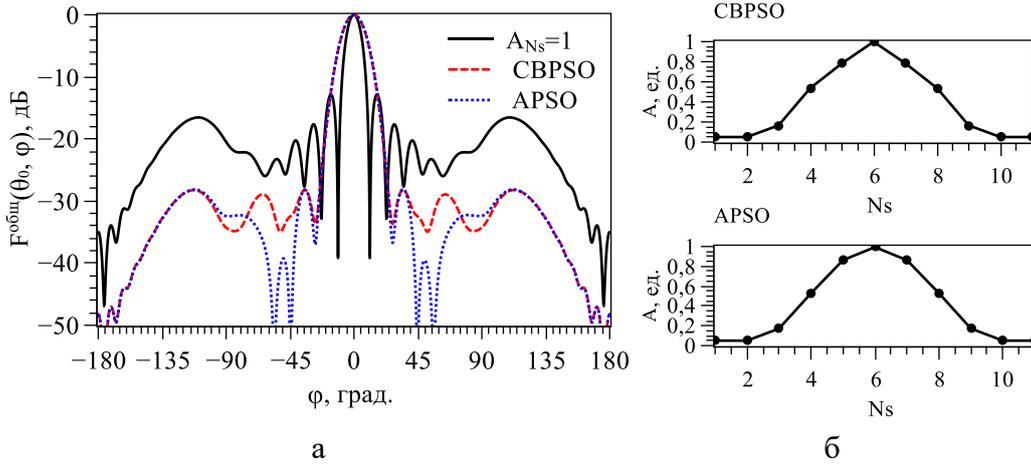


Рисунок 4. – Характеристики направленности антенной решетки при двух синтезированных амплитудных распределениях

Использованные методы по сравнению с известными итерационными или градиентными методами отличаются своей простотой, высокой скоростью поиска экстремума при решении подобных задач, позволили добиться снижения УБЛ на 13–15 дБ.

В четвертой главе рассмотрена бесконечная ФАР (рисунок 5), расположенная над идеально проводящим бесконечно длинным круглым цилиндром, которая состоит из полосковых излучателей, ориентированных вдоль цилиндрической координаты  $\varphi$  (горизонтальная поляризация). В решении учитывалась только  $\varphi$ -ая компонента токов. Граничная задача сведена к решению интегрального уравнения, которое решалось методом Галеркина. В результате получалась система линейных уравнений с  $Q$  неизвестными:

$$\sum_{u=1}^Q A_{p,u} \hat{c}_u = B_p, \quad \text{где} \quad \hat{c}_u = c_u \frac{k W b w \pi^3 L^2}{2 d_\varphi d_z V_g}; \quad B_p = \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{p\pi h}{2L}\right);$$

$$A_{p,u} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \left( \frac{h_m q_n}{k b v_m} \right)^2 H_{q_n}^{(2)}(v_m b) Z_{q_n}^{(1)}(v_m a, v_m b) + H_{q_n}^{(2)'}(v_m b) Z_{q_n}^{(2)}(v_m a, v_m b) \right) \text{sinc}^2\left(\frac{h_m w}{2}\right) C_{n,u} C_{n,p}^* ;$$

$$Z_{q_n}^{(1)}(v_m a, v_m b) = J_{q_n}(v_m b) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m b), \quad Z_{q_n}^{(2)}(v_m a, v_m b) = J_{q_n}'(v_m b) - \frac{J_{q_n}'(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)'}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)'}(v_m b);$$

$$C_{n,u} = \frac{u \left[ (-1)^u e^{i\frac{q_n L}{2b}} - e^{-i\frac{q_n L}{2b}} \right]}{\left( \frac{q_n L}{b} \right)^2 - (u\pi)^2}, \quad C_{n,p}^* = -$$

комплексно-сопряженное  $C_{n,u}$ .

За счет простой модели излучателя интегралы в формулах вычислялись аналитически, что позволило построить эффективный численный алгоритм расчета матричных элементов и решения всей граничной задачи. В вычислениях учитывалось асимптотическое поведение функций Бесселя и Ханкеля и их производных при больших значениях порядка и аргумента, а также осуществлялось ускорение сходимости медленно сходящегося ряда методом Куммера.

Парциальная диаграмма направленности имеет вид

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1}{\pi k b} \sqrt{\frac{Z_{inc}}{W}} \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{0,n}(q, k \cos(\theta)) Z_{q_n}^{(2)}(k a \sin(\theta), k b \sin(\theta)) e^{-i q_n \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right)},$$

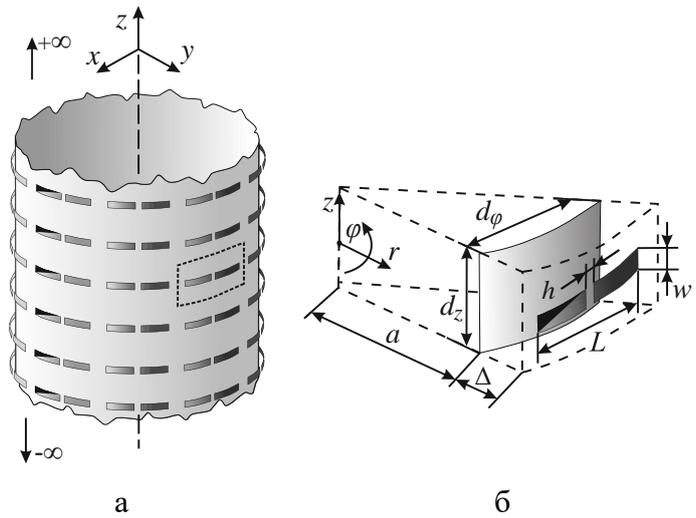
$$\text{где } T_{m,n}(q, k_{z0}) = -\frac{\sqrt{d_\varphi d_z}}{\pi L} \frac{V_g}{V_{inc}} \text{sinc}\left(\frac{h_m w}{2}\right) \sum_{u=1}^Q \hat{c}_u C_{n,u}.$$

Предложенные алгоритмы реализованы в виде набора эффективных вычислительных программ, позволяющих в 100-300 раз быстрее проводить численные исследования характеристик ФАР над цилиндрической поверхностью из излучателей горизонтальной поляризации по сравнению с известной коммерческой программой HFSS.

Для цилиндрической ФАР произведена оптимизация геометрических параметров методом APSO, которая позволила достигнуть низкого уровня КСВ на всех входах, не превышающего значения 1,5.

В четвертой главе были проведены обширные численные исследования характеристик ФАР при изменении геометрических параметров и установлены закономерности их поведения.

Впервые установлено, что при увеличении периода  $d_\varphi$  в пределах от  $0,55\lambda$  до  $1,85\lambda$  независимо от других геометрических параметров АР четко прослеживается монотонное увеличение УЗЛ от -20 дБ до -2,4 дБ (рисунок 6).



а – антенная решетка; б – модель излучателя  
Рисунок 5. – Бесконечная фазированная антенная решетка полосковых излучателей горизонтальной поляризации над цилиндрической поверхностью

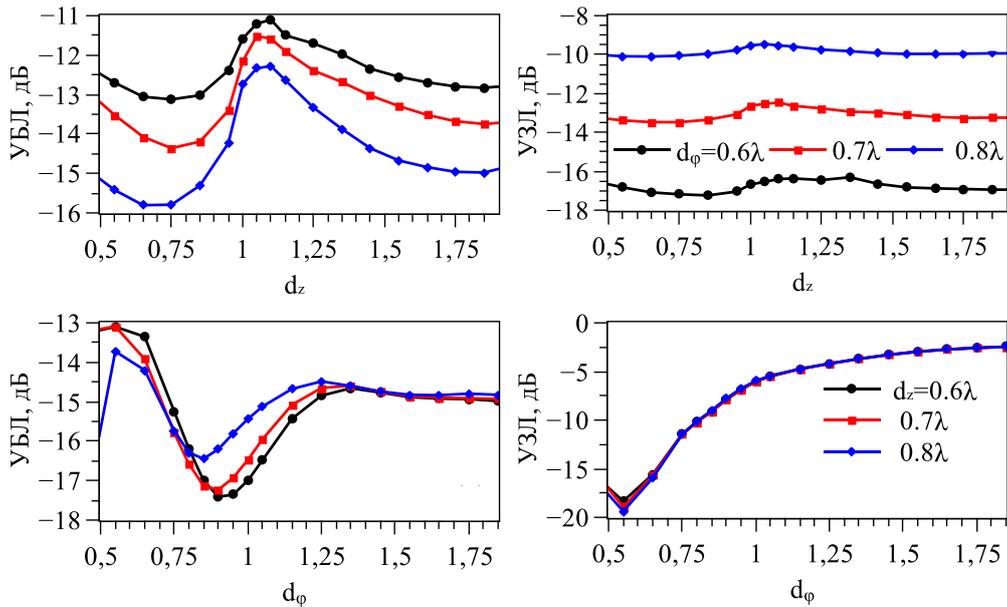


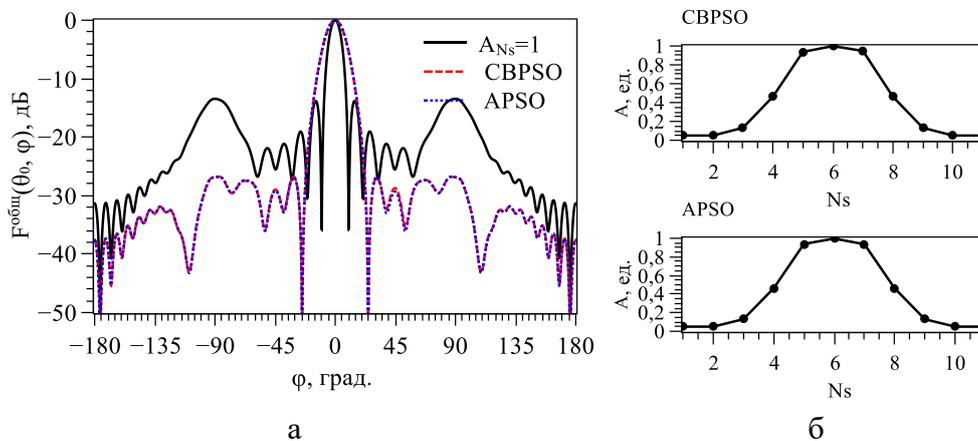
Рисунок 6. – Зависимости выходных характеристик антенной решетки от периодов

Показано, что для достижения уровня боковых и задних лепестков ниже -10 дБ значения периодов не должны превышать  $d_\phi \approx 0,7\lambda$ ,  $d_z \approx 0,9\lambda$ .

Численно подтверждено, что наиболее подходящим сектором возбуждения по критерию минимальности УБЛ, УЗЛ является сектор с углом  $\alpha=130^\circ$ . Полученный результат на  $10^\circ$  больше, чем в ФАР из вертикальных излучателей.

Впервые установлено, что оптимальным значением расстояния между излучателем и цилиндром является  $\Delta=0,3\lambda$ , при котором КНД максимален.

В четвертой главе осуществлен синтез амплитудного распределения на излучателях ФАР по критерию минимума УБЛ ДН (рисунок 7). Использовались те же методы, что и в третьей главе. Рассчитывалась кольцевая антенная решетка над цилиндрической поверхностью из  $N=32$  горизонтальных излучателей с сектором возбуждения  $\alpha=120^\circ$ , с параметрами:  $d_z=0,6\lambda$ ,  $d_\phi=0,7\lambda$ ,  $\Delta=\lambda/4$ ,  $w=0,05\lambda$ ,  $L=0,5\lambda$ ,  $h=0,01\lambda$ ,  $V_{inc}=1$  В,  $Z_{inc}=105$  Ом.



а – диаграммы направленности; б – амплитудные распределения

Рисунок 7. – Диаграммы направленности антенной решетки при двух синтезированных амплитудных распределениях

Использованные методы позволяют добиться снижения УБЛ на 13 дБ.

В пятой главе рассмотрен способ расширения функциональных возможностей цилиндрической ФАР при диаграммоформировании вдоль образующей цилиндра путем использования ДОС в качестве составного блока распределительной системы питания АР. Из всего множества схем для рассмотрения была выбрана наиболее распространенная матричная ДОС – матрица Батлера. Однако матричные ДОС имеют существенный технологический недостаток, а именно, при увеличении числа излучателей растет число пересечений линий передач, что, в свою очередь, усложняет реализацию схемы в полосковом исполнении на печатной плате. Поэтому в пятой главе был реализован синтез новой матричной ДОС, в которой исключались бы присущие ей недостатки.

Предложены два варианта синтезированных ДОС 8×8 выходов. На рисунке 8 приведены новые ДОС 8×8 выходов. Квадратами обозначены 3 дБ направленные ответвители с разностью фаз между выходами 180°. Цифрами слева (справа) схемы обозначены входы (выходы). Полыми точками – фазовращатели (сдвиг фаз представлен в градусах).

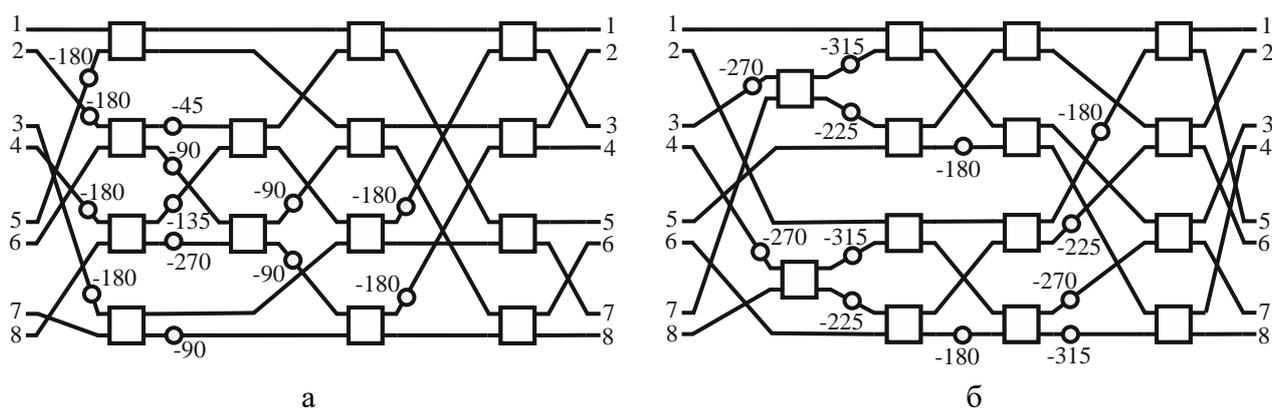


Рисунок 8. – Синтезированные диаграммообразующие схемы 8×8 выходов

Общее число пересечений для каждой схемы составляет 22 – это на 6 пересечений меньше, чем в классической матрице Батлера.

Методом эквивалентных схем с использованием матричного аппарата линейной алгебры были рассчитаны основные характеристики (коэффициенты отражения, развязка выходов, коэффициенты связи, амплитудно-фазовое распределение) матрицы Батлера 8×8 выходов и синтезированных схем в частотном диапазоне 9-11 ГГц. В качестве базовых элементов в схемах были взяты широко известный шлейфный мост с затуханием 3 дБ и набор дискретных фазовращателей. Сравнение частотных характеристик показало, что работа двух синтезированных ДОС не отличается от работы матрицы Батлера. Рабочий частотный диапазон всех схем по уровню -20 дБ составил 9,8–10,2 ГГц. Значения коэффициентов передачи лежат в пределах  $(-9 \pm 0,16)$  дБ.

Для одной из синтезированных ДОС (рисунок 8, б) была разработана компактная топология в виде трехслойной печатной платы  $140 \times 97 \times 1,051$  мм на широкополосных базовых элементах, таких как щелевой переход и «магический» Т-мост (рисунки 9 и 10). Линейные размеры Т-моста оптимизированы и показаны в миллиметрах. P1, P2, P3, P4 – нумерация входов.

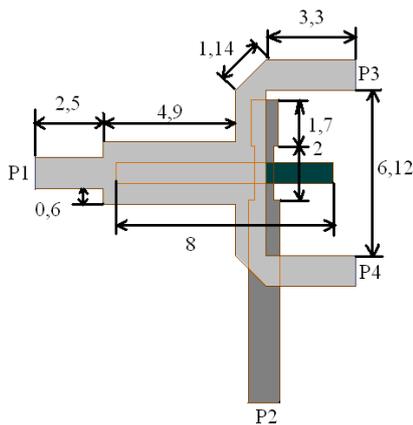


Рисунок 9. – Топология «магического» Т-моста

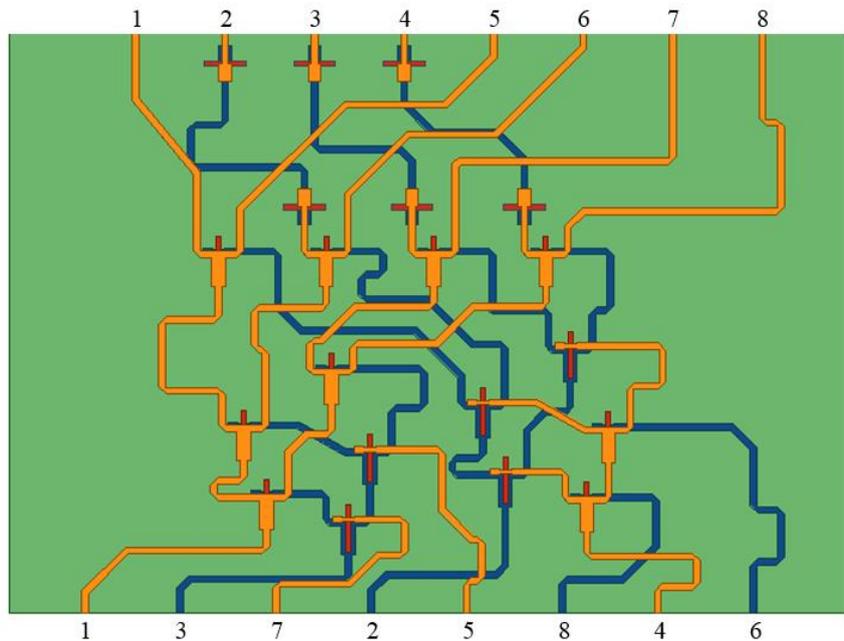


Рисунок 10. – Топология диаграммообразующей схемы в печатном исполнении

Для щелевого перехода коэффициент передачи имеет среднее значение  $(-0,54 \pm 0,04)$  дБ, коэффициент отражения лежит ниже уровня  $-26$  дБ в частотном диапазоне 8–12 ГГц, это на 2 дБ ниже в сравнении с известными аналогами. На центральной частоте 9,75 ГГц фаза на выходе равна  $0,4^\circ$ .

Для «магического» Т-моста полоса частот по уровню  $-15$  дБ лежит в пределах от 7,8–12,2 ГГц. Кривые  $S_{2,2}$  и  $S_{3,3}$  лежат ниже  $-22$  дБ во всем X-диапазоне. Среднее значение коэффициента передачи  $(-3,7 \pm 0,5)$  дБ. Значения разности фаз изменяются в пределах  $\pm 0,5^\circ$  в диапазоне 8–12 ГГц. Ширина рабочей полосы частот увеличена на 16% в сравнении с известными конструкциями.

Питание входов ДОС осуществляется несимметричной полосковой линией передачи с входным сопротивлением 50 Ом. На рисунке 10 показана топология ДОС в печатном исполнении. Расстояние между соседними входами составляет 16 мм, что вполне достаточно для крепления коаксиальных разъемов.

Расчет и анализ основных характеристик схемы показал, что разработанная ДОС  $8 \times 8$  входов имеет рабочий диапазон 8,6–10,8 ГГц, амплитуда на выходах составляет  $(-14 \pm 3)$  дБ, разбаланс фаз  $\pm 17^\circ$ , развязка всех входов ниже  $-20$  дБ во всем рабочем диапазоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Предложена методика нахождения общих выражений для полного электромагнитного поля, возбуждаемого бесконечной цилиндрической фазированной антенной решеткой из излучателей произвольной геометрии с заданным распределением тока, расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью [4, 12, 13]. Полученные общие выражения описывают полное электромагнитное поле в любой точке пространства, имеют значительно более простую форму по сравнению с известными и удобны для численных расчетов.

2. Разработан метод и алгоритм для численного анализа цилиндрических фазированных антенных решеток из полосковых излучателей горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью [5, 9].

3. Проведены обширные численные исследования характеристик (КНД, УБЛ, УЗЛ, ширина главного лепестка) фазированных антенных решеток из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью и установлены закономерности их поведения при изменении геометрических параметров. Для ФАР из полосковых излучателей горизонтальной поляризации [6]:

- впервые установлено, что при увеличении периода  $d_\varphi$  в пределах от  $0,55\lambda$  до  $1,85\lambda$  независимо от других геометрических параметров АР четко прослеживается монотонное увеличение УЗЛ от -20 дБ до -2,4 дБ;

- показано, что для достижения уровня боковых и задних лепестков ниже -10 дБ значения периодов не должны превышать  $d_\varphi \approx 0,7\lambda$ ,  $d_z \approx 0,9\lambda$ ;

- с ростом сектора возбуждения при разных периодах величина УБЛ практически не изменяется и составляет в среднем -14 дБ с отклонением в  $\pm 2$  дБ, при этом УЗЛ монотонно увеличивается до -7 дБ;

- численно подтверждено, что наиболее подходящим сектором возбуждения по критерию минимальности УБЛ, УЗЛ является сектор с углом  $\alpha = 130^\circ$ . Полученный результат на  $10^\circ$  больше, чем в ФАР из вертикальных полосковых излучателей;

- впервые установлено, что оптимальным значением расстояния между излучателем и цилиндром является  $\Delta = 0,3\lambda$ , при котором КНД максимален.

4. Произведен синтез амплитудного распределения на полосковых излучателях вертикальной и горизонтальной поляризации фазированных антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью по критерию минимальности УБЛ ДН на основе двух модификаций метода роя частиц, а именно, CBPSO и APSO [7]. Используемые методы отличаются своей простотой, скоростью поиска экстремума и более эффективны по сравнению с

известными итерационными или градиентными методами при решении подобных задач и позволяют снизить УБЛ на 13–15 дБ.

5. Для реализации многолучевого режима и питания ФАР над цилиндрической поверхностью предложены два варианта синтезированных ДОС  $8 \times 8$  входов, которые в сравнении с классической матрицей Батлера имеют на 6 пересечений линий передачи меньше и являются конструктивно более простыми [1, 2, 8, 10, 11]. Предложено технологическое решение одной из ДОС без пересечений линий передачи и последовательной нумерацией входов и выходов с использованием переходов со щелевой связью [1]. По разработанным алгоритмам и программам осуществлен численный анализ частотных характеристик ДОС и проведено сопоставление с матрицей Батлера.

6. Для одной из синтезированных ДОС была разработана компактная топология в виде трехслойной печатной платы  $140 \times 97 \times 1,051$  мм на неиспользовавшихся ранее широкополосных базовых элементах, таких как щелевой переход и «магический» Т-мост [3]. Расчет и анализ основных характеристик схемы показал, что разработанная ДОС  $8 \times 8$  входов имеет частотный диапазон 8,6–10,8 ГГц, амплитуда на выходах составляет  $(-14 \pm 3)$  дБ, разбаланс фаз  $\pm 17$  градусов, развязка всех входов ниже -20 дБ во всем рабочем диапазоне.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Математические модели АР кругового обзора и методика их расчета, позволяют вычислить полное электромагнитное поле цилиндрических антенных решеток, возбуждаемых произвольной системой излучателей.

Предложенный в диссертации алгоритм реализован в виде набора эффективных вычислительных программ, которые целесообразно использовать для численных исследований фазированных антенных решеток над цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной (горизонтальной) поляризации. Программы позволяют в 100-300 раз быстрее проводить численные исследования основных характеристик АР и используют в 100-200 раз меньше оперативной памяти по сравнению с известной коммерческой программой HFSS.

Обширные численные исследования характеристик АР в зависимости от геометрических параметров и установленные закономерности их поведения могут быть использованы в проектировании ФАР из полосковых излучателей вертикальной или горизонтальной поляризации над проводящей цилиндрической поверхностью.

Предложенные в диссертации ДОС с широкой рабочей полосой частот могут быть использованы в реализации микроволновых многолучевых распределительных систем для широкополосного доступа.

Установлен ряд закономерностей изменения частотных характеристик и дан ряд рекомендаций по проектированию щелевого перехода и «магического» Т-моста на заданный частотный диапазон.

Для получения наилучших частотных характеристик щелевого перехода следует учитывать влияние одновременно несколько параметров: короткозамкнутый отрезок линии передачи должен быть близок к четверти длины волны, а также необходим контроль линейных размеров щели. Что касается «магического» Т-моста то, во-первых, поперечные размеры симметричной щелевой линии должны быть меньше размеров несимметричной полосковой линии, чтобы избавиться от возбуждения других типов волн, кроме основной волны, а, во-вторых, для хорошего согласования входа 1 необходим, по крайней мере, четвертьволновой трансформатор; в-третьих, для согласования входа 2 также необходим трансформатор, учитывающий ширину щели.

В целом, результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке САПР для анализа ФАР над проводящей цилиндрической поверхностью.

Разработанная модель и алгоритм для исследований активных фазированных антенных решеток были использованы в Центре 1.6 «Научно-конструкторский центр перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн» (БГУИР) при выполнении задания 1.3.16 «Разработка и исследование новых методов создания радиолокационных систем с активной фазированной антенной решеткой на основе СВЧ-твердотельной и оптоэлектронной элементной базы для обзора воздушного пространства». Имеется акт о практическом использовании результатов исследований.

### **Список публикаций соискателя ученой степени**

#### **Статьи в научных журналах**

1. Фаняев, И.А. Распределительная матрица для питания восьмиэлементной антенной решетки / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 4(51). – С. 52–57.

2. Фаняев, И.А. Матричная диаграммообразующая схема на восемь каналов // Антенны. – 2013. – № 3. – С. 58–62.

3. Фаняев, И.А. Топология и характеристики разработанного антенного модуля Х-диапазона / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Доклады БГУИР. – 2014. – № 3 (81). – С. 87–92.

4. Фаняев, И.А. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной

поляризации. / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6(87). – С. 191–198.

5. Фаняев, И.А. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей горизонтальной поляризации. Часть 1: Методика электродинамического моделирования / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Антенны. – 2016. – № 2. – С. 3–10.

6. Фаняев, И.А. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей горизонтальной поляризации. Часть 2: Результаты численных исследований / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Антенны. – 2016. – № 4. – С. 34–40.

7. Фаняев, И.А. Синтез амплитудного распределения на входах излучателей фазированной антенной решетки над цилиндрической поверхностью методом роя частиц / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3 (81). – С. 87–92.

#### **Статьи в материалах научных конференций**

8. Fanyaev, I.A. Beamforming network for eight-element antenna array / I.A. Fanyaev, V.P. Kudzin // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 17-21 September, 2012, Sevastopol, Ukraine, p. 186-188.

9. Fanyaev, I.A. A phased antenna array of horizontally polarized radiators near a cylindrical surface / I.A. Fanyaev, V.P. Kudzin // X International Conference on Antenna Theory and Techniques, Kharkiv, Ukraine, 2015, p. 205-207.

#### **Тезисы докладов в материалах научных конференций**

10. Фаняев, И.А. Алгоритм расчета и анализа параллельных диаграммообразующих схем / И.А. Фаняев // Творчество молодых 2012: сб. науч. работ студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины»: в 2 ч. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012, с. 181–185.

11. Фаняев, И.А. Матричная диаграммообразующая схема для многолучевой антенной решетки / И.А. Фаняев // Материалы 8-я международной молодежной науч.-техн. конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012», 23-27 апреля 2012г., Севастополь, с. 223.

12. Фаняев, И.А. Фазированная антенная решетка над цилиндрическим экраном / И.А. Фаняев // Материалы 10-й международной молодежной науч.-техн. конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2014», 12-17 мая 2014г., г. Севастополь, с. 170.

13. Фаняев, И.А. Общее решение задачи о фазированной антенной решетке вблизи цилиндрической поверхности / И.А. Фаняев // III Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», ГГУ им. Ф. Скорины, 17 апр. 2014 г., с. 63–67.

**РЭЗІЮМЭ****Фаняеў Іван Аляксандравіч****Паласковыя антэнныя рашоткі над праводнай цыліндрычнай паверхняй**

**Ключавыя словы:** фазаваная антэнная рашотка, цыліндрычная паверхня, выпраменьвальнік, колькасны метада, дыяграма скіраванасці, узровень бакавых пялёсткаў, сектар ўзбуджэння, дыяграма утваральная схема.

**Мэта працы:** распрацоўка метада і алгарытма электрадынамічнага аналізу антэнных рашотак над праводнай цыліндрычнай паверхняй і вызначэнне заканамернасцей паводзін характарыстык фазаваных антэнных рашотак для прыватных выпадкаў паласковых выпраменьвальнікаў вертыкальнай і гарызантальнай палярызацыі, а таксама сінтэз новай матрычнай дыяграма утваральнай схемы, якая рэалізуе шматпрамянёвы рэжым антэннай сістэмы на шырокапалоснай элементнай базе.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:**

1. Распрацаваны метадыка і алгарытм аналізу фазаваных антэнных рашотак над праводнай цыліндрычнай паверхняй з паласковых выпраменьвальнікаў вертыкальнай і гарызантальнай палярызацыяй.

2. Праведзены шырокія лікавыя даследаванні характарыстык фазаваных антэнных рашотак з паласковых выпраменьвальнікаў вертыкальнай і гарызантальнай палярызацыі над праводным цыліндрам і ўстаноўлены новыя заканамернасці іх паводзін пры змене геаметрычных параметраў.

3. Праведзен сінтэз амплітуднага размеркавання фазаваных антэнных рашотак з дапамогай двух мадыфікацый метада роя часціц па зададзеных крытэрах да параметраў дыяграмы накіраванасці. Выкарыстаныя метады дазваляюць дамагчыся зніжэння ўзроўню бакавых пялёсткаў на 13–15 дБ.

4. Прапанаваны новыя дыяграма утваральныя схемы для ажыццяўлення шматпрамянёвага рэжыму і харчавання фазаваных антэнных рашотак, якія ў параўнанні з класічнай матрыцай Батлера маюць на 6 перасячэнняў ліній перадачы менш. Распрацавана кампактная тапалогія шырокапалоснай дыяграма утваральнай схемы ў выглядзе трохслаёвай друкаванай платы, якая працуе ва ўсім X-дыяпазоне.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Прапанаваны ў дысертацыі алгарытм рэалізаваны ў выглядзе эфектыўных праграм, якія дазваляюць у 100-300 разоў хутчэй вядомай камерцыйнай праграмы HFSS праводзіць лікавыя даследаванні характарыстык цыліндрычных антэнных рашотак.

**Вобласць прымянення.** Вынікі дысертацыйнай працы могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы САПР для аналізу цыліндрычных фазаваных антэнных рашотак над праводнай цыліндрычнай паверхняй.

**РЕЗЮМЕ****Фаняев Иван Александрович****Полосковые антенные решетки над проводящей цилиндрической поверхностью**

**Ключевые слова:** фазированная антенная решетка, цилиндрическая поверхность, излучатель, численный метод, диаграмма направленности, уровень боковых лепестков, сектор возбуждения, диаграммообразующая схема.

**Цель работы:** разработка метода и алгоритма электродинамического анализа антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью и определение закономерностей поведения характеристик фазированных антенных решеток для частных случаев полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации, а также синтез новой матричной диаграммообразующей схемы, реализующей многолучевой режим антенной системы на широкополосной элементной базе.

**Полученные результаты и их новизна:**

1. Разработаны методика и алгоритм анализа фазированных антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризаций.

2. Проведены обширные численные исследования характеристик фазированных антенных решеток из полосковых излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации над проводящим цилиндром и установлены новые закономерности их поведения при изменении геометрических параметров.

3. Произведен синтез амплитудного распределения фазированных антенных решеток с помощью двух модификаций метода роя частиц по заданным критериям к параметрам диаграммы направленности. Используемые методы позволяют добиться снижения УБЛ на 13–15 дБ.

4. Предложены новые диаграммообразующие схемы для осуществления многолучевого режима и питания фазированных антенных решеток, которые в сравнении с классической матрицей Батлера имеют на 6 пересечений линий передачи меньше. Разработана компактная топология широкополосной диаграммообразующей схемы в виде трехслойной печатной платы, работающая во всем X-диапазоне.

**Рекомендации по использованию.** Предложенный в диссертации алгоритм реализован в виде эффективных вычислительных программ, которые позволяют в 100-300 раз быстрее коммерческой программы HFSS проводить численные исследования характеристик цилиндрических антенных решеток.

**Область применения.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке САПР для анализа цилиндрических фазированных антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью.

## SUMMARY

**Fanyaev Ivan Aleksandrovich**

### **Strip antenna array over a conductive cylindrical surface**

**Key words:** phased antenna array, cylindrical surface, radiator, numerical method, radiation pattern, main lobe width, excitation sector, beamforming network.

**The purpose of the work:** the development of method and algorithm for electrodynamic analysis of antenna arrays over the conductive cylindrical surface and determining patterns of behavior the characteristics of phased antenna arrays in particular cases of strip radiators of vertical and horizontal polarization, and also the synthesis new matrix beamforming network, that realizes the multibeam mode of the antenna system on broadband element base.

**The obtained results and their novelty:**

1. The method and algorithm for analyzing phased antenna arrays over a conducting cylindrical surface of strip radiators with vertical and horizontal polarizations are developed.

2. Extensive numerical studies of the characteristics of phased antenna arrays from strip radiators of vertical and horizontal polarization over conducting cylinder has carried out, and new regularities of their behavior have been established with changing geometric parameters.

3. The amplitude distribution of phased antenna arrays was synthesized using two modifications of the particle swarm method according to the specified criteria for the parameters of the radiation pattern. The methods used make it possible to achieve a decrease in the level side lobes of 13–15 dB.

4. A new beamforming networks is proposed for the realization of multipath mode and powering of the phased antenna arrays, that has six intersections of the transmission lines in comparison with the classical Butler matrix. A compact topology of the broadband beamforming network has been developed as a three-layer printed circuit board operating throughout the X-band.

**Recommendations for use.** The proposed algorithm in the thesis were developed as a set of effective programs that allow 100-300 times faster commercial program HFSS carry out numerical studies the characteristics of cylindrical antenna arrays.

**Area of application.** The results of the thesis can be used in the development of CAD for the analyzing of cylindrical phased antenna arrays over the conductive cylindrical surface.

*Научное издание*

**ФАНЯЕВ** Иван Александрович

**ПОЛОСКОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

---

Подписано в печать 12.02.2019.	Формат 60×84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 30.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6