

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.П. ГОРБАЧЕВ

СИНТЕЗ
МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ
НА СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Монография

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 621.372.8.029.6

Г 672

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.П. Разинкин*,

д-р техн. наук, проф. *Г.Н. Девятков*,

д-р техн. наук, проф. *Ю.А. Пальчун*,

канд. техн. наук, доц. *Н.Э. Унру*

Работа выполнена на кафедре
радиоприемных и радиопередающих устройств

Горбачев А.П.

Синтез микроволновых устройств на связанных линиях передачи : монография / А.П. Горбачев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 414 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1296-1

Монография посвящена синтезу новой элементной базы антенн и микроволновых устройств. Основой этих элементов являются электромагнитно связанные полосковые и микрополосковые линии передачи. Синтез элементов и узлов ведется с позиций современных тенденций и воззрений, включая использование систем трехмерного электродинамического моделирования электромагнитного излучения антенн в дальней зоне Фраунгофера. Все результаты, полученные в работе, поддерживаются печатными работами и патентами автора в соавторстве с коллегами и учениками. Каждый раздел работы содержит табулированные и графические результаты, пригодные для непосредственного использования в проектировании антенн и микроволновых устройств с соблюдением отечественных норм конструкторско-технологических требований микроэлектроники.

Работа предназначена для радиоинженеров, ведущих разработку антенн и микроволновых устройств различного назначения. Она будет полезна студентам старших курсов, а также магистрантам, специализирующимся в области антенн и микроволновых устройств.

УДК 621.372.8.029.6

ISBN 978-5-7782-1296-1

© Горбачев А.П., 2010

© Новосибирский государственный
технический университет, 2010

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

A.P. GORBACHEV

**SYNTHESIS
OF MICROWAVE DEVICES BASED
ON COUPLED TRANSMISSION LINES**

Monograph

NOVOSIBIRSK
2010

UDC 621.372.8.029.6
G 672

Reviewers:

Prof. *V.P. Razinkin*, D.Sc. (Eng.),
Prof. *G.N. Devyatkov*, D.Sc. (Eng.),
Prof. *Yu.A. Palchun*, D.Sc. (Eng.),
Assoc. Prof. *N.E. Unru*, PhD (Eng.)

Research has been done at the department of radio
receivers and radio transmitters

Gorbachev A.P.

G 672 Synthesis of microwave devices based on coupled transmission
lines : monograph / A.P. Gorbachev. – Novosibirsk : NSTU Pub-
lisher, 2010. – 414 pp. (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-1296-1

The monograph deals with the synthesis of a new elemental circuitry of antennas and microwave devices. Electromagnetically coupled strip and microstrip transmission lines are the basis of these elements. The synthesis of elements is carried out based on up-to-date tendencies and concepts, including the use of 3D systems of electrodynamic modelling of antenna electromagnetic radiation in the Fraunhofer far-field zone. All the results obtained in the research are supported by published papers and patents taken out by the author jointly with his colleagues and pupils/doctoral students. Every section of the book contains tabulated and graphic results available for direct use in designing antennas and microwave devices in conformity with Russian design and engineering standards used in microelectronics.

The book is intended for radio engineers involved in designing antennas and microwave devices for various purposes. It will be of use for senior students as well as for graduate students specializing in antennas and microwave devices.

UDC 621.372.8.029.6

ISBN 978-5-7782-1296-1

© Gorbachev A.P., 2010
© Novosibirsk State Technical
University, 2010

Оглавление

Введение	15
Глава 1. Объект и предмет исследований	17
Глава 2. Синтез направленных ответвителей с неминимально фазовыми свойствами	26
2.1. Ступенчатые направленные ответвители	26
2.2. Ступенчатые направленные ответвители с тандемной секцией	53
2.3. Направленные ответвители с плавно изменяющимися параметрами	64
Глава 3. Синтез направленных фильтров бегущей волны	84
3.1. Направленные фильтры бегущей волны в диапазоне СВЧ	84
3.2. Синтез однопетлевых направленных фильтров	88
3.2.1. Несимметричные направленные фильтры с неминимально фазовыми характеристиками	88
3.2.2. Направленные фильтры на основе тандемных секций	94
3.2.3. Однопетлевые фильтры с электромагнитной связью противоположных сторон резонатора	106
3.2.4. Направленные фильтры с повышенной селективностью	111
3.3. Синтез двухпетлевых направленных фильтров	117
3.3.1. Несимметричные направленные фильтры с неминимально фазовыми свойствами	117
3.3.2. Направленные фильтры из тандемных секций	124
3.3.3. Фильтры с эллиптическими частотными характеристиками	127
3.3.4. Направленные фильтры со связью резонаторов по двум противоположным сторонам	132

3.3.5. Направленные фильтры сокращенных габаритов с эллиптическими частотными характеристиками.....	138
3.4. Исследование влияния допусков на рабочие параметры направленных фильтров.....	146
3.4.1. О необходимости учета влияния допусков	146
3.4.2. Влияние конструкторско-технологических погрешностей размеров на параметры полосковых фильтров и ответвителей	149
3.4.3. Влияние конструкторско-технологических погрешностей на параметры микрополосковых направленных фильтров.....	154

Глава 4. Симметрирующие и разделительно-суммирующие устройства дипольных активных фазированных антенных решеток	159
4.1. Печатные дипольные интегрированные излучающие модули.....	159
4.1.1. Симметрирующие устройства	159
4.1.2. Разделительно-суммирующие устройства	169
4.2. Делители мощности, выполненные цепочечным соединением несимметричных ответвителей	174
4.3. Делители мощности, выполненные по бинарной схеме соединения несимметричных ответвителей.....	187
4.4. Диссипативные потери в многоканальных делителях мощности	195
4.5. Развязка между каналами делителей.....	202
4.6. Разделительно-суммирующие устройства для сложения мощностей усилителей.....	204
4.7. Несимметричные направленные ответвители и делители мощности с несогласованными нагрузками.....	212

Глава 5. Диаграммообразующие устройства фазированных антенных решеток на ответвителях	226
5.1. Диаграммообразующие устройства в диапазоне СВЧ.....	226
5.2. Диаграммообразующие устройства на неминимально фазовых ступенчатых ответвителях	229
5.2.1. Структурные схемы диаграммообразующих устройств и анализ их потенциальных возможностей	229
5.2.2. Синтез каскадных дифференциальных фазовращателей	235

5.2.3. Дифференциальные фазовращатели новой структуры на основе четвертьволновых ответвителей	252
5.3. Диаграммообразующие устройства с плавно изменяющимися погонными параметрами ответвителей	280
Глава 6. Синтез эллиптических фильтров СВЧ на основе направленных ответвителей	291
6.1. Постановка задачи	291
6.2. Эллиптические фильтры на четвертьволновых ответвителях	292
6.3. Эллиптические фильтры на основе неминимально фазовых ступенчатых ответвителей	307
6.4. Эллиптические фильтры с полубесконечной полосой заграждения	319
Глава 7. Особенности конструктивной реализации устройств. Результаты их исследования и внедрения	328
7.1. Основные способы реализации связанных полосковых и микрополосковых линий	328
7.2. Микрополосковый ступенчатый неминимально фазовый ответвитель	331
7.3. Трехэлементный полосковый направленный ответвитель	333
7.4. Микрополосковые направленные фильтры	338
7.5. Четырехканальный полосковый мультиплексер	342
7.6. Широкополосные делители мощности	346
7.6.1. Четырехканальный делитель на двухсекционных направленных ответвителях	346
7.6.2. Четырехканальный делитель с плавно изменяющимися погонными параметрами линий	348
7.6.3. Пятиканальный микрополосковый делитель	350
7.6.4. Делитель мощности с корректирующим звеном	354
7.7. Четырехлучевое диаграммообразующее устройство	357
7.8. Функциональные узлы СВЧ для мобильных радиосредств	359
7.9. Направленные ответвители и сумматор с электрической регулировкой параметров	364

7.10. Микрополосковое бинарное разделительно-суммирующее устройство	366
7.11. Фазовые контуры первого порядка на отрезках трехпроводных линий	368
Библиографический список	375
Приложение 1. Синтез двухступенчатого ответвителя	397
Приложение 2. Синтез двухэлементного ответвителя	401
Приложение 3. Формирование равнопульсирующих полиномов	409

Contents

Introduction.....	15
Chapter 1. The Object and Subject of the Research. A Brief Description of Initial Propositions	17
Chapter 2. The Synthesis of Directional Couplers with Nonminimal Phase Properties	26
2.1. Stepped directional couplers	26
2.2. Stepped directional couplers with a tandem section.....	53
2.3. Stepped directional couplers with smoothly changing parameters.....	64
Chapter 3. The Synthesis of Traweling-wave Directional Filters	84
3.1. The traweling-wave directional filters in the microwave region.....	84
3.2. The synthesis of one-loop directional filters	88
3.2.1. Asymmetric directional filters with nonminimal phase characteristics.....	88
3.2.2. Directional filters based on tandem sections	94
3.2.3. One-loop filters with electromagnetic coupling of the resonator opposite sides.....	106
3.2.4. Increased selectivity directional filters	111
3.3. The synthesis of two-loop directional filters	117
3.3.1. Asymmetric directional filters with nonminimal phase characteristics.....	117
3.3.2. Directional filters based on tandem sections	124
3.3.3. Filters with elliptic frequency characteristics	127

3.3.4. Directional filters with resonator coupling along the two opposite sides.....	132
3.3.5. Reduced size directional filters with elliptic frequency characteristics.....	138
3.4. A study of an influence of allowances on working parameters of directional filters	146
3.4.1. A need to take into account an influence of allowances	146
3.4.2. An influence of design and engineering resolutions on parameters of strip directional filters and couplers.....	149
3.4.3. An influence of design and engineering resolutions on parameters of microstrip directional filters	154
Chapter 4. Balance Units and Dividing-Summing Devices of Dipole Active Phased Arrays	159
4.1. Printed dipole integrated radiating modules.....	159
4.1.1. Balance units	159
4.1.2. Dividing-summing devices.....	169
4.2. Power dividers based on chain connection of asymmetric couplers.....	174
4.3. Power dividers based on the binary connection of the asymmetric couplers.....	187
4.4. Dissipation losses in multichannel power dividers	195
4.5. Divider channel isolation	202
4.6. Dividing-summing devices for adding amplifier powers	204
4.7. Asymmetric directional couplers and power dividers with unmatched loads	212
Chapter 5. Coupler Beam Formers of Phased Arrays	226
5.1. Microwave Beam Formers in the microwave region	226
5.2. Beam Formers based on nonminimal phase stepped couplers.....	229
5.2.1. Block diagrams of beam formers and an analysis of their potentialities	229
5.2.2. The synthesis of cascade differential phase shifters	235

5.2.3. Differential phase shifters of a new structure based on quarter-wave couplers	252
5.3. Beam formers with smoothly changing coupler linear parameters	280
Chapter 6. The Synthesis of Elliptic Filters Based on Directional Couplers	291
6.1. Characteristics of previous models and problem statement	291
6.2. Elliptic filters based on quarter-wave directional couplers	292
6.3. Elliptic filters based on nonminimal phase stepped couplers.....	307
6.4. Elliptic filters with a semi-infinite stop band	319
Chapter 7. Peculiarities of design implementation of devices. Results of their study and introduction	328
7.1. Major ways of implementation of coupled strip and microstrip lines	328
7.2. Microstrip two-step nonminimal phase couplers	331
7.3. Three-element strip directional couplers	333
7.4. Microstrip directional filters.....	338
7.5. Four-channel strip multiplexers	342
7.6. Broadband power dividers	346
7.6.1. Four-channel dividers based on two-section directional couplers	346
7.6.2. Four-channel dividers with smoothly changing linear parameters of lines	348
7.6.3. Five-channel microstrip dividers	350
7.6.4. Power dividers with a correcting element	354
7.7. Four-channel beam former	357
7.8. Microwave functional modules for mobile radio sets	359
7.9. Directional couplers and a totalizer with electrical parameter control	364
7.10. Microstrip binary dividing-summing device	366
7.11. First-order phase contours in three-wire line sections.....	368

References.....	375
Supplement 1. The synthesis of a two-step coupler.....	397
Supplement 2. The synthesis of a two-element coupler.....	401
Supplement 3. The formation of equi-ripple polynomials	409