

УДК 621.396.677  
А 478

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *В. П. Разинкин*  
д-р техн. наук, профессор *В. А. Хрусталёв*  
д-р техн. наук, профессор *Ю. Т. Криворучко*

**Алексейцев С. А.**

А 478 Печатные двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбудителя дипольного вида: монография / С. А. Алексейцев, А. П. Горбачев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 216 с. – (Монографии НГТУ).

ISBN 978-5-7782-4841-0

Рассматриваются вопросы расчета и конструирования печатных двухдиапазонных директорных антенн с возбудителями дипольного вида, питаемыми на их удаленных клеммах. В ходе исследований получены новые расчетные соотношения для определения входных импедансов антенн данного семейства, позволяющие связать размеры печатных фрагментов и расстояния между ними с требуемым входным коэффициентом стоячей волны напряжения (КСВН).

Анализ результатов проектирования и экспериментальных исследований показал, что предлагаемые двухдиапазонные директорные антенны характеризуются достаточным для практического применения качеством согласования в каждом из двух несмежных поддиапазонов частот при хорошей форме обеих пространственных диаграмм направленности.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-37-90018, 15 публикациями в рецензируемых журналах, включая одну работу 1-го квартиля и одну работу 3-го квартиля цитатно-аналитической системы “Web of Science”, а также двумя патентами Российской Федерации № 2712798 (2020 год) и № 2743624 (2021 год).

УДК 621.396.677

DOI 10.17212/978-5-7782-4841-0  
ISBN 978-5-7782-4841-0

© Алексейцев С. А., Горбачев А. П., 2022  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2022

УДК 621.396.677  
А 478

Reviewers:

Professor *V. P. Razinkin*, D.Sc. (Eng.)  
Professor *V. A. Khrustalev*, D.Sc. (Eng.)  
Professor *Yu. T. Krivoruchko*, D.Sc. (Eng.)

**Alekseitsev S. A.**

A 478 Printed dual-band director-type antennas with an end supply dipole exciter: monograph / S. A. Alekseitsev, A. P. Gorbachev. – Novosibirsk: NSTU Publisher, 2022. – 216 p. – (NSTU Monographs)

ISBN 978-5-7782-4841-0

The issues of calculation and design of printed dual-band director-type antennas with dipole exciters powered at their remote terminals are considered in the monograph. In the course of research, new calculation ratios were obtained for determining the input impedances of antennas of this family, which make it possible to relate the sizes of printed fragments and the distance between them with the required input voltage standing wave ratio (VSWR).

An analysis of the results of design and experimental studies has shown that the proposed dual-band director-type antennas are characterized by a quality of matching sufficient for practical use in each of two non-adjacent frequency sub-bands with a good shape of both spatial directional patterns.

The work was supported by RFBR grant No. 20-37-90018, 15 publications in peer-reviewed journals, including one paper of the 1st quartile and one paper of the 3rd quartile of the Web of Science scientometric system, as well as two patents of the Russian Federation No. 2712798 (2020) and No. 2743624 (2021).

DOI 10.17212/978-5-7782-4841-0  
ISBN 978-5-7782-4841-0

УДК 621.396.677

© Alekseitsev S. A., Gorbachev A. P., 2022  
© Novosibirsk State  
Technical University, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список используемых сокращений .....	7
Введение .....	8
<b>1. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ</b>	
<b>ДВУХДИАПАЗОННЫХ АНТЕНН .....</b>	<b>11</b>
1.1. Общие сведения .....	11
1.2. Двухдиапазонные директорные антенны .....	15
1.2.1. Двухдиапазонные директорные антенны с объемными проводниками .....	15
1.2.2. Печатные двухдиапазонные директорные антенны .....	17
Печатные однодиапазонные прототипы и их общие принципы проектирования .....	17
Печатные версии двухдиапазонных директорных антенн .....	22
1.3. Постановка задачи исследования .....	33
<b>2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК</b>	
<b>ДВУХДИАПАЗОННЫХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ</b>	
<b>ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДИПОЛЬНОГО ВИДА С КОНЦЕВЫМ ПИТАНИЕМ .....</b>	<b>37</b>
2.1. Метод наводимых электродвижущих сил .....	37
2.2. Решение внутренней задачи электродинамики тонкого электрического	
излучателя дипольного вида при концевом типе возбуждения .....	38
2.3. Характеристики ближнего поля и входного импеданса ИДВКП .....	44
2.4. Решение внешней задачи электродинамики тонкого электрического	
излучателя дипольного вида при концевом типе возбуждения .....	54
2.5. Анализ диаграммы направленности двух совместно работающих ИДВКП	
как возбудителя для двухдиапазонной антенны .....	58
2.6. Анализ диаграммы направленности директорной антенны	
с возбудителем из двух ИДВКП .....	69
Выводы по разделу 2 .....	74
<b>3. МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЭСКИЗНОЙ МОДЕЛИ</b>	
<b>ТОНКОПРОВОЛОЧНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ ДВУХДИАПАЗОННОЙ АНТЕННЫ .....</b>	<b>75</b>
3.1. Формулировка задачи двухдиапазонной работы по согласованию .....	75
3.2. Методика синтеза возбудителя двухдиапазонной антенны .....	81
Выводы по разделу 3 .....	86
<b>4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТОНКОПРОВОЛОЧНОЙ МОДЕЛИ ДВУХДИАПАЗОННОЙ АНТЕННЫ</b>	
<b>НА БАЗЕ ДВУХ ИДВКП В КАЧЕСТВЕ ВОЗБУДИТЕЛЯ .....</b>	<b>87</b>
4.1. Постановка задачи .....	87
4.2. Оптимизация по согласованию возбудителя двухдиапазонной антенны	
на базе двух ИДВКП в свободном пространстве .....	90
4.3. Оптимизация по согласованию пары активных ИДВКП над бесконечным экраном ...	102
4.4. Оптимизация по согласованию пары активных ИДВКП с двумя директорами .....	106
4.5. Методы учета омических потерь в тонкопроволочных антеннах .....	110

Выводы по разделу 4 .....	115
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХДИАПАЗОННЫХ АНТЕНН С ИДВКП В КАЧЕСТВЕ ВОЗБУДИТЕЛЯ .....	117
5.1. Конструкторско-технологическая реализация излучающих плеч возбудителя.....	117
5.2. Выбор и обоснование конструкции симметрирующих устройств.....	119
5.2.1. Шлейфный делитель мощности.....	120
5.2.2. Делитель мощности на НСПЛ с общей «землей» .....	121
5.2.3. Щелевой делитель мощности .....	122
5.3. Возбудитель печатной двухдиапазонной модифицированной директорной антенны со щелевым делителем мощности .....	123
5.4. Печатная директорная модифицированная Яги-антенна с концевым возбуждением со щелевым делителем мощности .....	126
5.5. Печатная директорная антенна со щелевым делителем мощности и линейными ИДВКП .....	129
5.6. Двухдиапазонный ИДВКП с дополнительными директорами.....	132
5.7. Возбудитель двухдиапазонной антенны на шлейфном делителе мощности .....	135
5.8. Двухдиапазонная директорная антенна на шлейфном делителе мощности .....	137
5.9. Интегрированный трехслойный возбудитель двухдиапазонной антенны .....	144
5.10. Интегрированная трехслойная печатная двухдиапазонная директорная антенна.....	147
5.11. Уменьшенный по габаритам вариант двухдиапазонной директорной антенны .....	150
Выводы по разделу 5 .....	157
6. ВЕРИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗРАБОТАННЫХ ИДВКП ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ .....	159
6.1. Двухдиапазонная директорная антенна с противофазным щелевым делителем мощности.....	159
6.2. Трехслойная двухдиапазонная директорная антенна с противофазным делителем мощности.....	163
6.3. Двухдиапазонная директорная антенна с противофазным шлейфным делителем мощности.....	165
6.4. Методика оценки влияния разброса значений диэлектрической постоянной на согласование и направленность серийно изготавливаемых антенн .....	168
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	171
Библиографический список .....	173
Приложение А. Код программы для вычисления собственного и взаимных импедансов ИДВКП .....	181
Приложение Б. Двухдиапазонный излучатель дипольного вида с центральным питанием .....	189
Приложение В. Расчет делителя мощности для 8-элементной антенной решетки.....	196
Приложение Г. Расчет гистограмм коэффициента усиления и согласования двухдиапазонной антенны дипольного вида с центральным питанием.....	205

## CONTENTS

List of used abbreviations .....	7
Introduction.....	8
1. REVIEW OF THE RESULTS OF DUAL-BAND ANTENNA RESEARCH AND DESIGN .....	11
1.1. General information.....	11
1.2. Dual band director-type antennas.....	15
1.2.1. Dual band director-type antennas with volumetric conductors .....	15
1.2.2. Printed dual-band director-type antennas.....	17
Printed single-band prototypes and their general design principles.....	17
Printed versions of dual-band director-type antennas.....	22
1.3. Statement of the research problem .....	33
2. THEORETICAL ANALYSIS OF THE ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF DUAL-BAND ANTENNAS BASED ON THIN DIPOLE TYPE ELECTRIC RADIATING ELEMENT WITH END-FEEDING (EFDRE).....	37
2.1. The method of induced electromotive forces .....	37
2.2. Solution to the internal problem of electrodynamics of a thin electric dipole-type radiating element with an end excitation type.....	38
2.3. Characteristics of the near field and EFDRE input impedance .....	44
2.4. Solution to the external problem of electrodynamics of a thin electric dipole-type radiating element with an end excitation type.....	54
2.5. Directional pattern analysis of two collaborating EFDREs as an exciter for a dual-band antenna.....	58
2.6. Directional pattern analysis of a director-type antenna with exciters consisting of two EFDRE.....	69
Conclusions.....	74
3. METHODS FOR A PARAMETRIC SYNTHESIS OF A SKETCH MODEL OF A THIN-WIRE EXCITER OF A DUAL-BAND ANTENNA .....	75
3.1. Formulation of the task of matching dual-band operation.....	75
3.2. Methods for synthesizing the exciter of a dual-band antenna.....	81
Conclusions.....	86
4. OPTIMIZATION OF A THIN-WIRE MODEL OF A DUAL-BAND ANTENNA BASED ON TWO EFDREs AS AN EXCITOR .....	87
4.1. Problem statement .....	87
4.2. Dual band antenna exciter matching optimization based on two EFDREs in an empty space.....	90
4.3. Optimization by matching a pair of active EFDREs over an infinite screen .....	102
4.4. Optimization by matching a pair of active EFDREs with two directors.....	106
4.5. Methods for accounting for ohmic losses in thin-wire antennas .....	110

Conclusions.....	115
5. SIMULATION OF THE ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF DUAL-BAND ANTENNAS WITH EFDREs AS AN EXCITER .....	117
5.1. Design and technological implementation of radiating arms of the exciter.....	117
5.2. Selection and justification of the design of balancing units .....	119
5.2.1. A loop power divider .....	120
5.2.2. A asl power divider with a common "ground" .....	121
5.2.3. A slotted power divider .....	122
5.3. The exciter of the printed dual-band modified director-type anternna with a slotted power divider .....	123
5.4. A printed director-type modified antenna with end excitation with a slotted power divider .....	126
5.5. A printed director-type antenna with a slotted power divider and linear EFDREs .....	129
5.6. A dual-band EFDRE with additional directors.....	132
5.7. A dual-band antenna exciter on a loop power divider .....	135
5.8. A dual-band director-type antenna on a loop power divider .....	137
5.9. An integrated three-layer exciter of a dual band antenna .....	144
5.10. An integrated three-layer printed dual-band director-type antenna .....	147
5.11. A reduced in size version of the dual-band director-type antenna.....	150
Conclusions.....	157
6. VERIFICATION OF ELECTROMAGNETIC MODELS OF EFDREs DEVELOPED BASED ON EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS .....	159
6.1. A dual-band director-type antenna with an anti-phase slot power divider .....	159
6.2. A three-layer dual-band director-type antenna with an anti-phase power divider .....	163
6.3. A dual-band director-type antenna with an anti-phase loop powqer divider .....	165
6.4. Methods for assessing the influence of the spread of values of the dielectric constant for matching and directivity of serially manufactured antennas .....	168
Conclusion .....	171
References.....	173
Appendix A. The program code for calculating EFDRE intrinsic and mutual impedances .....	181
Appendix B. A dual-band dipoletype radiating element with central power supply.....	189
AppendixC. Calculation of a power divider for an 8-element antenna array .....	196
Appendix D. Calculation of gain histograms and matching of a dual-band dipole type antenna with a central power supply .....	205