

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГАОУ ВО «Сибирский
Федеральный Университет»

Гуц Денис Сергеевич



«19» сентября 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Диссертация «Плоские антенные системы с широкоугольным
механоэлектрическим сканированием» выполнена на кафедре «Радиотехника».

В период подготовки диссертации соискатель Станковский Андрей
Вадимович обучался в очной аспирантуре Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский
федеральный университет», кафедра «Радиотехника», работал в должности
старшего преподавателя кафедры «Радиотехника» ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет».

В 2014 г. окончил ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» с
присвоением квалификации «Инженер» по специальности «Радиофизика и
электроника». В 2018 г. окончил очную аспирантуру при ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет» с присвоением квалификации
«Исследователь. Преподаватель-исследователь» по направлению подготовки
«Электроника, радиотехника и системы связи».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель — Саломатов Юрий Петрович, профессор, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Радиотехника», заведующий кафедрой.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Станковского Андрея Вадимовича является научно-квалификационной работой, в которой решаются задачи по исследованию различных типов плоских структур для квазиоптического управления диаграммой направленности (ДН) антенны и создания на их основе антенных систем (АС) с широкоугольным механоэлектрическим сканированием; по уменьшению уровня боковых лепестков в перфорированных структурах; по исследованию дополнительных диэлектрических слоёв для улучшения коэффициента направленного действия (КНД); по получению эллиптической поляризации в сканирующих АС с линейной поляризацией с помощью плоских пространственных поляризаторов при отклонении ДН до $\pm 50^\circ$.

В результате проведенных автором исследований получены результаты, заключающиеся в следующем: предложены три варианта отклоняющих структур на основе диэлектрических материалов и сканирующих АС на их основе; предложено использование согласующего (просветляющего) слоя в структурах с изменяемым коэффициентом заполнения с целью увеличения КНД и уменьшения уровня боковых лепестков (УБЛ) в АС с квазиоптическим типом управления ДН; предложено использование пространственного поляризатора в составе сканирующих АС; разработаны программы для ЭВМ.

Актуальность темы

Активное развитие спутниковой связи, особенно с использованием средне- и низкоорбитальных космических аппаратов (КА), приводит к тому, что возникает потребность в сканирующих антенных системах (АС) для наземных терминалов (мобильных: автомобиль, поезд, судно; и стационарных), которые могут обеспечить непрерывную работу систем спутниковой связи для предоставления широкополосного доступа в Интернет, дистанционного зондирования Земли, связи и др. Стоит отметить, что в труднодоступных и удаленных местностях, к которым относятся большие территории РФ, зачастую нет возможности организовать наземную связь. В этом случае для обеспечения информационной связанности остаётся единственный вариант – использование спутниковой связи. Широко используемые в настоящее время сканирующие системы обладают рядом недостатков: АС с механическим сканированием характеризуются наибольшей инерционностью, большой ветровой нагрузкой и низкой скоростью наведения; АС с электрическим сканированием имеют ограниченный сектор сканирования и высокую стоимость. Применение комбинированного типа сканирования позволяет расширить сектор углов при сохранении небольших габаритов АС.

Таким образом, исследование структур для квазиоптического управления ДН и создания на их основе АС с широкоугольным механоэлектрическим сканированием является актуальным в настоящее время.

Личное участие автора в получении результатов

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе и сформулированные в виде научных положений, получены автором лично или при его непосредственном участии. Результаты работы и направления дальнейших научных исследований обсуждались с научным руководителем и

другими членами научного коллектива. Личный вклад автора включает исследование электродинамических характеристик сканирующих АС, в том числе разработку электродинамических моделей отклоняющих структур, поляризаторов, а также разработку алгоритмов и написание ПО для расчётов параметров различных структур и макросов для упрощения процессов моделирования. Проведены моделирование и экспериментальные исследования с последующей обработкой полученных данных и представлением их в виде графиков и таблиц.

Степень достоверности результатов

Результаты диссертационной работы Станковского А. В. подтверждаются:

- использованием современных САПР для электродинамического моделирования с применением различных методов и точностей расчёта;
- корректным применением численных методов;
- использованием высокоточного оборудования и апробированных экспериментальных методик для проведения экспериментальных исследований;
- соответствием результатов электродинамического моделирования с экспериментальными исследованиями.

Новизна результатов

В работе получены следующие новые результаты:

- 1) Показано, что перфорированная отклоняющая структура с гексагональным расположением отверстий отличается меньшей толщиной, меньшими достижимыми коэффициентом заполнения и эффективной диэлектрической проницаемостью по сравнению с прямоугольным расположением отверстий, а также обеспечивает меньший уровень боковых лепестков за счёт увеличения количества дискретных ячеек при неизменных размерах апертуры;

2) Предложены диэлектрические структуры, работающие по принципу квазиоптического управления лучом, позволяющие осуществить механоэлектрическое сканирование в угломестной плоскости в диапазоне 120° , отличающиеся плоской формой;

3) Предложено использование дополнительного диэлектрического слоя в отклоняющих структурах, имеющих резкие границы перехода материал-воздух, отличающееся увеличением коэффициента направленного действия и уменьшением уровня боковых лепестков;

4) Предложено использование плоского трёхслойного пространственного поляризатора меандрового типа в составе АС с механоэлектрическим сканированием, позволяющего получать эллиптическую поляризацию при наклоне ДН с сохранением малого профиля.

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

1) Предложены варианты диэлектрических структур квазиоптического управления ДН для создания на их основе низкопрофильных сканирующих АС;

2) Изготовлена и исследована АС с механоэлектрическим типом сканирования с максимальным углом наклона ДН $\pm 60^\circ$ (диапазон сканирования 120°);

3) Предложено использование согласующего (просветляющего) слоя в структурах с изменяемым коэффициентом заполнения с целью увеличения коэффициента направленного действия (КНД) и уменьшения уровня боковых лепестков (УБЛ) в АС с квазиоптическим типом управления ДН;

4) Исследована конструкция трехслойного меандрового поляризатора, позволяющая получить эллиптическую поляризацию с

коэффициентом эллиптичности (КЭ) не ниже 0,6 в сканирующих АС при углах наклона ДН до $\pm 50^\circ$;

5) Разработано программное обеспечение:

- для синтеза перфорированных диэлектрических структур квазиоптического управления лучом;
- для синтеза отклоняющей структуры, набранной из диэлектрических пластин треугольной формы;
- для синтеза пространственного полосового фильтра N-го порядка на основе ЧСП;
- для расчета размеров меандрового поляризатора плоской и цилиндрической форм.

Ценность научных работ соискателя

Новизна и ценность исследований Станковского А. В. подтверждается получением свидетельств о регистрации программ ЭВМ. Результаты исследований использованы в НИОКР, выполненных в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и АО «НПП «Радиосвязь», о чём свидетельствуют соответствующие акты внедрения. Результаты работы докладывались и обсуждались на одиннадцати российских и международных конференциях.

Соответствие требованиям пункта 14 Положения ВАК

Требования, установленные пунктом 14 Положения ВАК, выполнены: в диссертации автор ссылается на источники заимствования материалов, во Введении автор отметил, что часть результатов получена совместно с соавторами научных публикаций и в каждом оригинальном разделе диссертации привёл ссылки на работы.

Диссертация Станковского Андрея Вадимовича соответствует специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Полнота изложенных материалов в печатных работах, опубликованных автором

По результатам исследований получены 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и опубликовано 20 научных работ, включая 3 статьи в рекомендованных ВАК РФ изданиях, 1 статью, опубликованную в рецензируемом научном издании Scopus, 12 публикаций в сборниках конференций, индексируемых в наукометрической базе Scopus и (или) Web of Science.

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Станковский А. В. Экспериментальное исследование антенной решётки с механоэлектрическим и электронным типами сканирования / Е. А. Литинская, А. Д. Немшон, А. В. Станковский, С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – № 8/3. – Т. 58. – С. 45–49.

2. Станковский А. В. Широкополосная антенная решётка проходного типа на основе пространственных полосовых фильтров / Е. А. Литинская, А. Д. Немшон, А. В. Станковский, С. В. Поленга, Р. М. Крылов, Ю. П. Саломатов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – № 8/3. – Т. 58. – С. 71–75.

3. Станковский А.В., Поленга С.В., Литинская Е.А., Рязанцев Р.О., Александрин А.М., Гафаров Е.Р., Ерохин А.А., Саломатов Ю.П. Антенная решетка Ку-диапазона частот на основе резонатора Фабри-Перо // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49. Выпуск 13. С. 3-6.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Станковский А. В. Программа расчёта перфорированных диэлектрических структур квазиоптического управления лучом.

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 02 февраля 2017 г.

2. Станковский А. В., Немшон А. Д., Литинская Е. А., Поленга С. В. Программа синтеза пространственного полосового фильтра N-порядка на основе ЧСП. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 15 января 2020 г.

3. Станковский А. В., Поленга С. В., Литинская Е. А. Программа расчета размеров меандрового поляризатора плоской и цилиндрической форм. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 27 февраля 2023 г.

4. Станковский А. В., Поленга С. В., Литинская Е. А. Расчёт отклоняющей структуры, набранной из диэлектрических пластин треугольной формы. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 04 августа 2023 г.

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных «Scopus»

1. Litinskaya Y. A., Stankovsky A. V., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Wide-angle antenna systems with mechanoelectrical beam steering // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1515, Is. 4. 2020.

Доклады в трудах конференций, индексируемых в Scopus и(или) Web of Science

1. A. V. Stankovsky, S. V. Polenga, A. D. Nemshon, K. V. Lemberg, Y. P. Salomatov. Wide-angle mechanoelectrical beam steering antenna system // 24nd Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, P. 467-468.

2. A. D. Nemshon, A. V. Stankovsky, A. M. Alexandrin, S. V. Polenga, V. S. Panko, Y. P. Salomatov. A broadband sub-wavelength phase-correcting element for transmit antenna arrays // 24nd Int. Crimean Conference «Microwave &

Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, p. 469-470.

3. Y. A. Litinskaya, A. D. Nemshon, A. V. Stankovsky, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. Experimental research of the antenna array with electronic and com-bine electronic and mechanical beam steering // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-3.

4. E. R. Gafarov, A. V. Stankovsky, Y. P. Salomatov. A GNSS Quadrupole Antenna With a Spatial Polarizer for the Suppression of Low-Angle Multipath // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-4.

5. A. V. Stankovsky, S. V. Polenga, R. M. Nemshon, Y. A. Litinskaya, E. R. Gafarov, Yu. P. Salomatov. Meander-Line Polarizer for Omnidirectional Antenna // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-4.

6. E. R. Gafarov, A. V. Stankovsky, Y. P. Salomatov. A GNSS dipole antenna with a meander-line polarizer for the reduction of multipath interference // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), pp. 311-313.

7. A. V. Stankovsky, S. V. Polenga; A. D. Nemshon; Ye. A. Litinskaya; A. M. Alexandrin; K. V. Lemberg; Yu. P. Salomatov. A wide-angle mechanoelectrical steering antenna system based on multilayer dielectric wedge structure // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), pp. 45-48.

8. Y. A. Litinskaya, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky and Y. P. Salomatov. A Ku-Band Low-Profile Wide-Angle Scanning Antenna Array with Combined Beam Steering // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 238-242.

9. Stankovsky A. V., Litinskaya Ye. A., Alexandrin A. M., Polenga S. V., Salomatov Yu. P. Spatial polarizers for CTS structure-based antenna arrays // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, p. 885-889.

10. Y. A. Litinskaya, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, A. D. Hudonogova and Y. P. Salomatov. A Subarray for Ku-Band High-Gain Scanning Antenna Based on CTS Waveguide // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 285-288.

11. Stankovsky A. V., Litinskaya Y. A., Nemshon A. D., Polenga S. V., Salomatov Y.P. Synthesis of Spatial Band-Pass Filter Based on Frequency-Selective Surfaces // Proceedings - 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2021, pp. 234–237.

12. Y. A. Litinskaya, A. V. Stankovsky, S. V. Polenga and Y. P. Salomatov. Design and Analysis of Antenna Array with Combined Beam Steering // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021, pp. 195-198.

Доклады в трудах конференций

1. А. В. Станковский, С. В. Поленга, А. Д. Немшон, Ю. П. Саломатов. Антенная система с широкоугольным механоэлектрическим сканированием на основе перфорированного диэлектрика // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск 2014, стр. 405-409.

2. А. В. Станковский, С. В. Поленга, А. Д. Немшон, Ю. П. Саломатов. Дисконная антенна // Системы связи и радионавигации. Сборник тезисов. Красноярск 2014, стр. 34-36.

3. Литинская Е. А., Немшон А. Д., Поленга С. В., Станковский А. В., Саломатов Ю. П. Низкопрофильная антенная решётка с широкоугольным сканированием // 25-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО'2015)». – 2015. – С. 473-474.

4. А. В. Станковский, С. В. Поленга, А. Д. Немшон, Ю. П. Саломатов. Дисконвая антенна с широкоугольным механоэлектрическим сканированием // Электронные средства и системы управления. X Международная научно-практическая конференция. Материалы докладов. Часть 1. Томск 2014, стр. 149-153.

Диссертация «Плоские антенные системы с широкоугольным механоэлектрическим сканированием» Станковского Андрея Вадимовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара кафедры «Радиотехника».

Присутствовало на заседании – 23 чел. С правом решающего голоса – 12 чел. Результаты голосования «за» – 12 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 1 от 19.09.2023 г.

Минаков Андрей Викторович
Доктор. физ.-мат. наук, доцент,
директор института инженерной физики
и радиоэлектроники.

