

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор технических наук, профессор
А.Г. Вострецов

25 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Новосибирский государственный технический университет»

Диссертация «Матричные имитаторы угловых шумов радиолокационных объектов» выполнена на кафедре Радиоприемных и радиопередающих устройств (РПиРПУ) факультета Радиотехники и электроники (РЭФ).

Степанов Максим Андреевич в 2005 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Новосибирский государственный технический университет по направлению «Радиотехника». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

В период подготовки диссертации и в настоящее время Степанов Максим Андреевич является доцентом кафедры РПиРПУ в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». С февраля 2016 по февраль 2019 обучался в докторантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Киселев Алексей Васильевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Радиоприемных и радиопередающих устройств, заведующий кафедрой.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Актуальность работы

Для имитации отражений от распределенных радиолокационных объектов широкое распространение получили геометрические модели. Они базируются на замещении моделируемого объекта совокупностью некоторого количества отражающих точек, распределенных в области пространства, ограниченной размерами моделируемого объекта. Достоинствами геометрических моделей являются четкая физическая интерпретация и высокая точность моделирования пространственной структуры распределенного радиолокационного объекта.

Однако для обеспечения высокой точности моделирования отраженных волн необходимо использовать большое количество точек модели.

При проведении полунатурного моделирования каждая точка модели замещается излучателем, к которому подводится сигнал, соответствующий эхосигналу от точки объекта. Очевидная проблема, с которой приходится сталкиваться при этом, огромное количество близко расположенных излучателей.

Таким образом актуальным является синтез моделей с малым числом излучателей, обеспечивающих достоверное моделирование. В настоящее время известны когерентные (излучающие сигналы с заданной разностью фаз) и некогерентные (излучающие полностью некоррелированные сигналы) модели. Они являются основой для матричных имитаторов. Однако известные в настоящее время когерентные и некогерентные модели и матричные имитаторы на их основе имеют ряд недостатков, ограничивающих возможности по замещению электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов.

Вместе с тем, используемые в настоящее время как основа для построения матричных имитаторов, когерентные и некогерентные геометрические модели являются лишь частными случаями. Для них коэффициент взаимной корреляции излучаемых сигналов равен единице либо нулю соответственно. Из литературы известна двухточечная модель, к излучателям которой подводятся коррелированные сигналы – частично

когерентная модель. Однако анализа ее возможностей по имитации угловых шумов и тем более способа синтеза не приводится.

Использование геометрических моделей, точки которых излучают взаимно коррелированные сигналы, в качестве основы для построения матричных имитаторов требует проработки таких вопросов как: выбор и обоснование структуры матричного имитатора, конфигурации излучателей, выбор способа формирования сигналов с заданными параметрами, обеспечение точности задания их параметров в точке наблюдения.

Тема диссертационной работы Степанова М.А. актуальна, имеет научное и практическое значение.

Личный вклад соискателя

Все выносимые на защиту результаты получены автором лично. Автором выполнены: постановка целей и задач исследования, выбор методов исследования, вывод аналитических соотношений, построение математических моделей радиолокационных объектов, разработка алгоритмического и программного обеспечения матричного имитатора, анализ и обобщение результатов.

Достоверность результатов исследований

Обеспечивается корректностью применения математического аппарата, согласованностью с результатами исследований других авторов, подтверждением теоретических выводов результатами моделирования на ЭВМ, использованием сертифицированной контрольно-измерительной аппаратуры и положительными результатами внедрения разработанных матричных имитаторов.

Научная новизна

1. Разработан метод синтеза геометрической модели произвольной конфигурации, излучающей частично коррелированные сигналы и формирующей угловые шумы распределенных радиолокационных объектов с заданной корреляционной функцией.

2. Предложены конфигурации некогерентных и частично когерентных геометрических моделей, обеспечивающих заданные характеристики угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям угловых координат.

3. Обосновано минимальное количество неподвижных излучающих точек некогерентных и частично когерентных геометрических моделей, обеспечивающих возможность управления параметрами плотности распределения вероятности угловых шумов как по двум взаимно ортогональным направлениям, так и в пределах каждого из этих направлений.

4. Показано, что модель, составленная из виртуальных излучающих точек – кажущихся центров излучения – может адекватно замещать угловые шумы распределенных радиолокационных объектов.

5. Определена взаимосвязь требуемой точности задания параметров взаимно коррелированных сигналов, формируемых матричным имитатором в точке наблюдения, и точности моделирования угловых шумов.

Практическая значимость

1. Предложенный алгоритм синтеза малоточечной геометрической модели произвольного радиолокационного объекта, адекватной по критерию равенства корреляционной функции угловых шумов модели и объекта, позволяет определить положения излучателей матричного имитатора и параметры подводимых к ним сигналов (мощность, коэффициенты взаимной корреляции, собственные спектрально-корреляционные свойства).

2. Определены требования к точности задания параметров сигналов, формируемых матричным имитатором в точке наблюдения. Их выполнение гарантирует заданную величину ошибки моделирования угловых шумов распределенных радиолокационных объектов.

3. Предложена структура и алгоритмы работы системы калибровки матричного имитатора, реализующие оценку и компенсацию не идентичности его каналов, что позволяет повысить достоверность моделирования.

4. Разработан и внедрен ряд матричных имитаторов, обеспечивающих формирование электромагнитных волн, отраженных от распределенных радиолокационных объектов.

Ценность научных работ соискателя заключается в следующем.

Использование результатов диссертационной работы проходило в рамках: хоздоговора РТУ-3-11 между АО «ЗАСЛОН» и НГТУ; хоздоговора РТУ-2-17 между АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» и НГТУ.

Результаты диссертационной работы внедрены на указанных предприятиях, что подтверждается соответствующими актами.

Соответствие научной специальности

Содержание работы соответствует специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация. Формула специальности (многоточиями скрыты части формулы, не относящиеся к диссертационной работе):

Радиолокация и радионавигация – область науки и техники, использующая радиоволны для ... исследования, разработки, проектирования, испытания, ... радиолокационных и радионавигационных систем и устройств.

Специальность включает вопросы ... использования радиотехнических явлений для ... испытаний этих систем.

Области исследований:

1. Исследование новых ... процессов в радиоэлектронике, позволяющих повысить эффективность систем и устройств радиолокации и радионавигации.

11. Разработка научных и технических основ ... испытания ... радиолокационных и радионавигационных устройств и систем.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты работы опубликованы в 44 печатных работах:

Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. Степанов М.А., Калмыков И.Ю., Дуркин В.В. Возможности позиционирования кажущегося центра излучения в трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 69–77.

2. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Алгоритмы расчета амплитуд сигналов трехточечного матричного имитатора для установки заданного положения кажущегося центра излучения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 57–69.
3. Степанов М.А., Никулин А.В. Замещение распределенного объекта трехточечной геометрической моделью // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 77–85.
4. Степанов М.А., Савиных И.С. Преобразование систем координат в задачах имитации радиолокационной обстановки // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. 2014. № 2. С. 86–93.
5. Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Задание отражающих свойств распределенных объектов в терминах шумов координат // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. -. 2015. Т. 3. С. 17–28.
6. Степанов М.А. Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2015. № 5. С. 57–67.
7. Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат распределенных объектов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 4. С. 19–27.
8. Степанов М.А., Киселев А.В., Белявская Н.В., Тырыкин С.В. Обобщенная модель матричного имитатора электромагнитных полей, отраженных от точечных и распределенных радиолокационных объектов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2016. № 4. С. 11–17.
9. Степанов М.А., Белявская Н.В., Киселев А.В. Синтез численного алгоритма калибровки линейного матричного имитатора // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2016. № 4. С. 17–24.
10. Степанов М.А., Киселев А.В., Сабитов Т.И. Границы области достижимых значений параметров функции распределения шумов координат распределенного радиолокационного объекта, замещаемого геометрической

моделью, составленной из излучателей коррелированных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2017. № 4. С. 36–39.

11. Степанов М.А., Киселев А.В. Модель распределенного объекта, излучающая статистически независимые сигналы с одинаковыми коэффициентами авто- и взаимной корреляции квадратур // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2017. № 4. С. 28–32.

12. Степанов М.А., Киселев А.В. Пятиточечная модель радиолокационных объектов, распределенных по угловым координатам // Радиопромышленность. 2017. № 4. С. 75–80.

13. Степанов М.А., Сабитов Т.И., Киселев А.В. Модель распределенного радиолокационного объекта, составленная из излучателей коррелированных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. 2017. № 4. С. 40–43.

14. Степанов М.А., Подкопаев А.О., Тырыкин С.В. Четырехточечная модель двумерного распределенного объекта на основе излучателей коррелированных сигналов // Радиопромышленность. 2018. Т. 28, № 4. С. 28–34.

15. Степанов М.А., Подкопаев А.О., Киселев А. В. Об эквивалентности двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 62–67.

16. Подкопаев А.О., Степанов М.А., Киселев А. В. Оценка и компенсация систематических ошибок калибровки матричного имитатора // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 4. С. 24–28.

17. Киселев А. В., Артюшенко В.В., Никулин А.В., Степанов М.А. Спектральный подход к синтезу геометрических моделей распределенных объектов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. Т. 4. С. 34–39.

18. Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Синтез инвариантной четырехточечной модели поверхностно-распределенного объекта // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. -. 2018. Т. 4. С. 52–64.

19. Степанов М.А. Моделирование отражений от поверхностно-распределенных объектов на примере фрагмента подстилающей поверхности // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 22 – 26.

20. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А. В. Требования к точности задания параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4.

21. Подкопаев А.О., Степанов М.А. Синтез двухточечной частично когерентной модели, обеспечивающей заданные корреляционные характеристики угловых шумов, на основе ее эквивалентности трехточечной некогерентной модели с разделимостью пространственной и временной координаты // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 16 – 21.

Публикации в изданиях, включенных в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus

1. Stepanov M.A. Calculation of Modification of Width of Doppler Spectra // Proceedings The 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology - KORUS-2005. Novosibirsk: NSTU, 2005. С. 234–235.

2. Stepanov M.A., Kiselev A.V. The impact of turbulent atmosphere on detection characteristics of a radar system with MTI // Radioelectronics and communications systems. 2005. Т. 48, № 12. С. 33–37.

3. Stepanov M.A., Kiselev A.V. Signal reception characteristics estimation of radar with moving-target indication in case of turbulent atmosphere // Radioelectronics and communications systems. 2007. Т. 50, № 50. С. 35–40.

4. Stepanov M.A. Geometrical method of signal parameters definition for a three-point matrix simulator // 16 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM): [Proc]. Altai, Erlagol: IEEE, 2015. С. 172–174.

5. Belyavskaya N.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Digital model and calibration algorithm of linear matrix simulator // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): [Proc]. IEEE, 2016. С. 298–301.

6. Kiselev A.V., Stepanov M.A., Sabitov T.I. Two-point model composed of radiators of correlated signals // The 18 international conference of young specialists

on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: [Proc]. Altai, Erlagol: NSTU, 2017. С. 131–134.

7. Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A. Possibilities of a two-point model, radiating correlated signals // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: [Proc]. Altai, Erlagol: NSTU, 2017. С. 91–93.

8. Kiselev A.V., Artyushenko V.V., Nikulin A.V., Stepanov M.A. Spectral method of synthesis of geometric models of surface-distributed objects // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: proc. Erlagol, Altai: IEEE Computer Society, 2018. С. 98–103.

9. Stepanov M.A., Kiselev A.V. A distributed object model with division into space and time variables // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: [Proc]. Altai, Erlagol: IEEE Computer Society, 2018. С. 163–166.

Патенты

1. Степанов М.А., Киселев А.В., Тырыкин С. В., Никулин А.В. Способ имитации радиолокационных отражений: пат. 2610837 РФ.

2. Артюшенко В.В, Никулин А.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Программа для расчета с использованием графических процессоров комплексной огибающей эхосигнала от распределенных радиолокационных объектов: пат. 2018666476 РФ. 2018.

Публикации в других научных изданиях

1. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Установка положения эквивалентного центра излучения в трехточечном матричном имитаторе // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2012): тр. 11 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Т. 4. С. 48–52.

2. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Определение параметров трехточечного матричного имитатора как суперпозиции двухточечных моделей // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–

2012): тр. 11 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Т. 4. С. 34–36.

3. Степанов М.А., Калмыков И.Ю. Геометрический метод определения параметров сигналов трехточечного матричного имитатора // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Т. 4. С. 34–36.

4. Степанов М.А., Белявская Н.В. Форма фазового фронта электромагнитной волны, формируемой синфазным двухточечным матричным имитатором // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 12. С. 47–49.

5. Степанов М.А., Киселев А.В., Тырыкин С.В., Белявская Н.В. Точность оценки амплитудной неидентичности каналов матричного имитатора // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 12. С. 28–31.

6. Степанов М.А., Киселев А.В., Тырыкин С.В., Белявская Н.В. Стенд разработчика алгоритмического и программного обеспечения матричных имитаторов радиоэлектронной обстановки // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 12. С. 56–59.

7. Степанов М.А., Сабитов Т.И. Модель распределенного радиолокационного объекта на основе системы излучателей коррелированных случайных сигналов // сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов посвящ. 122-й годовщине Дня радио. Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. С. 92–95.

8. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А. В. Двухточечная геометрическая модель распределенного радиолокационного объекта, составленная из излучателей случайных сигналов с заданным коэффициентом взаимной корреляции // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2017. Т. 2. С. 274–279.

9. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А. В. Модель распределенного радиолокационного объекта на основе коррелированных излучателей // Электронные средства и системы управления: материалы докл. 13 Междунар. науч.-практ. конф. Томск: В-Спектр, 2017. Т. 1. С. 43–46.

10. Подкопаев А.О., Степанов М.А. Моделирование параметров плотности распределения вероятностей шумов координат // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: НГТУ, 2017. Т. 2. С. 269–274.

11. Степанов М.А., Артюшенко В.В. Геометрическая модель, составленная из девяти точек, излучающих статистически не связанные случайные сигналы // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф. 2018. Т. 4. С. 179–182.

12. Подкопаев А.О., Степанов М.А. Границы области эквивалентности двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной моделей // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск: НГТУ, 2018. Т. 4. С. 222–226.

13. Сабитов Т.И., Степанов М.А., Киселев А.В. Оценка стабильности параметров функции распределения шумов координат, моделируемых двухточечной моделью распределенного объекта на коррелированных излучателях // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Т. 2. С. 225–229.

14. Киселев А. В., Степанов М.А. Замещение сложного радиолокационного объекта двухточечной моделью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 4. С. 76–81.

Общее заключение

Диссертация Степанова М.А. «Матричные имитаторы угловых шумов радиолокационных объектов» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения в области имитационного моделирования радиолокационных отражений, совокупность которых можно квалифицировать как научное

достижение, а так же изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация «Матричные имитаторы угловых шумов радиолокационных объектов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств факультета Радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета.

Присутствовало на заседании 20 человек. Результаты голосования: «За» - «20» человек, «Против» - «0» человек, «Воздержалось» - «0» человек, протокол № «4» от «30» мая 2019 года.

д.т.н., профессор,
декан РЭФ

Владимир Александрович
Хрусталева

к.т.н., доцент кафедры РПиРПУ

Иван Сергеевич Савиных

Подписи Хрусталева В.А., Савиных И.С. заверяю.

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»



О. К. Пустовалова