



Справки о сдаче кандидатских экзаменов №599 и №600 выданы в 2021 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель – Степанов Максим Андреевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Радиоприемных и радиопередающих устройств, должность: заведующий кафедрой.

По итогам обсуждения принято следующее заключение (выписка из протокола расширенного заседания кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств):

#### **Актуальность темы диссертационного исследования**

В настоящее время широкое распространение получило полунатурное моделирование, которое позволяет сочетать точность, соответствующую работе с реальным устройством, и низкие затраты экономических и временных ресурсов, характерные для методов математического имитационного моделирования. На этапе полунатурного моделирования реальные условия работы РЛС формируются в лаборатории. Радиоэлектронная обстановка, максимально приближенная к реальной, создается при помощи имитаторов радиосигналов.

В точке приема эхо-сигналов оценивается совокупность электромагнитных волн, отраженных от распределенного в пространстве объекта, с разными фазами и амплитудами. В результате наблюдаются флуктуации фазового фронта принимаемой совокупности волн и, следовательно, флуктуации оценки углового положения объекта радиолокации. Это явление называется угловыми шумами. Угловые шумы могут приводить к существенным ошибкам в определении угловых координат и размеров как самих распределенных объектов радиолокации, так и точечных целей, наблюдаемых на их фоне.

Традиционным способом замещения распределенных в пространстве объектов радиолокации является синтез многоточечной геометрической модели. При этом весь объект разбивается на большое количество фрагментов, формирующих независимые отражения. Каждый из таких фрагментов в модели рассматривается как точечный отражатель. Такие модели позволяют с большой точностью замещать распределенные объекты радиолокации, но, как правило, содержат большое количество точек: сотни и даже тысячи точек в пределах одного элемента разрешения РЛС. Поэтому в настоящее время большое распространение получили малоточечные геометрические модели и матричные имитаторы на их основе.

Малоточечные модели содержат небольшое количество точек (до девяти для двумерного исполнения), синтезируются на основе многоточечных и замещают только ту область распределенного объекта, которая попала в рассматриваемый элемент разрешения РЛС.

Моделирование электромагнитных волн, отраженных от радиолокационных объектов в этом случае, осуществляется с помощью матричных имитаторов (МИ). Они представляют собой жестко связанную систему небольшого количества излучателей, к которым подводятся сигналы с заданными характеристиками. Совокупное излучение нескольких неразрешаемых приемной антенной источников формирует кажущийся центр излучения (КЦИ), положение которого определяется соотношением мгновенных значений сигналов, излученных МИ и наблюдаемых в точке приема. Если сигналами, подводимыми к излучателям МИ, являются случайные процессы, то и положение КЦИ во времени также будет случайным. Закон плотности распределения вероятностей (ПРВ) положения КЦИ совпадает с законом плотности распределения вероятностей угловых шумов. Таким образом, флуктуации КЦИ позволяют моделировать угловые шумы распределенного объекта радиолокации.

Среди малоточечных геометрических моделей можно выделить несколько разновидностей, различающихся величиной статистической связи

между излучаемыми сигналами: когерентные, некогерентные и частично когерентные.

Когерентные модели излучают сигналы с коэффициентом взаимной корреляции, равным 1, что предъявляет большие требования к фазировке сигналов в точке приема. Из-за указанного недостатка когерентных моделей следующим этапом в развитии матричных имитаторов стали некогерентные модели. К излучателям некогерентных моделей подводятся сигналы – некоррелированные случайные процессы. Флуктуации формируемого таким способом КЦИ позволяют моделировать угловые шумы распределенных объектов. Однако некогерентные модели способны обеспечить значения параметров ПРВ угловых шумов только в ограниченном диапазоне, что приводит к необходимости увеличения используемого количества точек модели и, как следствие, излучающих антенн МИ. Важно отметить, что в настоящее время существует большое количество синтезированных малоточечных некогерентных моделей распределенных объектов радиолокации.

Известны малоточечные геометрические модели, к излучателям которых подводятся коррелированные сигналы. Модуль коэффициента взаимной корреляции принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Такие модели называются частично когерентными. Частично когерентные модели обладают по сравнению с двумя другими видами определенными преимуществами. В сравнении с когерентными, частично когерентные модели имеют пониженные требования к фазировке излучаемых сигналов. В сравнении с некогерентными – способны обеспечивать значения параметров ПРВ угловых шумов в более широком диапазоне. Это означает меньшее требуемое количество излучающих антенн в составе матричного имитатора. Однако на данный момент практически не существует синтезированных частично когерентных моделей распределенных объектов радиолокации и матричных имитаторов, созданных на их основе.

**Цель диссертационной работы:** обосновать метод синтеза частично когерентных геометрических моделей распределенных объектов радиолокации на основе их известных некогерентных малоточечных моделей.

### **Задачи диссертационной работы**

1. Доказать эквивалентность двумерных некогерентных и частично когерентных моделей и определить ее границы, в пределах которых модели обеспечивают заданные параметры ПРВ угловых шумов.

2. Разработать математический аппарат синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей замещаемого радиолокационного объекта.

3. Разработать математический аппарат синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих требуемые спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей замещаемого радиолокационного объекта.

4. Полученные теоретические результаты развить до уровня рекомендаций к их практическому применению на примере синтеза частично когерентной модели метеообразования

### **Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации**

Все представленные в диссертации результаты исследований получены автором лично. Из 15 опубликованных работ 12 написаны в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, относящиеся к тематике работы результаты получены автором лично

### **Достоверность результатов исследований**

Обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата, подтверждением теоретических выводов и результатов методами математического и имитационного программного моделирования на ЭВМ, а также положительными результатами апробации и внедрения.

## **Научная новизна диссертационной работы**

1. Показана эквивалентность двумерных четырехточечных частично когерентных и пяти- или девятиточечных некогерентных моделей с точки зрения тождественности обеспечиваемых ими параметров ПРВ угловых шумов. На основе неравенств, определяющих возможности некогерентных моделей по управлению параметрами ПРВ угловых шумов, определены границы этой эквивалентности.

2. Показано преимущество частично когерентных моделей по сравнению с некогерентными, заключающееся в более широком диапазоне изменения параметров ПРВ угловых шумов при равных угловых размерах моделей.

3. Обоснован метод синтеза частично когерентных моделей, обеспечивающих требуемые параметры ПРВ и спектрально-корреляционные характеристики угловых шумов, на основе известных некогерентных моделей. При этом один или несколько излучателей некогерентной модели замещаются виртуальными, формируемыми частично когерентной моделью.

### **Практическая значимость результатов исследований:**

Полученные результаты могут быть применены в имитаторах радиосигналов с целью полунатурного моделирования пространственно распределенных объектов радиолокации.

1. Получены математические соотношения, позволяющие перейти от некогерентной модели к частично когерентной, обеспечивающей требуемые параметры угловых шумов. Это позволит сократить количество излучающих точек матричного имитатора до двух для радиолокационных объектов, распределенных по одной угловой координате, и до четырех – для радиолокационных объектов, распределенных по двум угловым координатам. Математические соотношения определяют связь мощностей сигналов, подводимых к точкам некогерентной и частично когерентной моделей, а также коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых

точками частично когерентной модели, и их собственные спектрально-корреляционные свойства.

2. Разработан алгоритм замещения метеообразования частично когерентной моделью. Он позволяет синтезировать четырехточечную частично когерентную модель, формирующую отражения от замещаемого метеообразования с учетом их временной структуры, доплеровских флуктуаций, угловых шумов.

### **Ценность научных работ соискателя**

Результаты исследования внедрены при выполнении договора РТУ-10-19 с АО «ЗАСЛОН» (г. Санкт-Петербург). На их основе был разработан программный модуль, вошедший в состав программного обеспечения имитатора радиосигналов, используемого для проведения полунатурных испытаний РЛС.

Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждается соответствующим актом.

### **Соответствие научной специальности**

Диссертационная работа Подкопаева Артемия Олеговича «Синтез малоточечных частично когерентных моделей радиолокационных объектов на основе эквивалентных им некогерентных моделей» соответствует паспорту научной специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация (по новой номенклатуре 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация):

- формуле паспорта специальности (многоточиями скрыты части, 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»;

• областям исследования паспорта специальности, в частности (многоточиями скрыты части, не относящиеся к диссертационной работе):

1) пункту «1. Исследование новых ... процессов в радиоэлектронике, позволяющих повысить эффективность систем и устройств радиолокации и радионавигации»;

2) пункту «11. Разработка научных и технических основ ... испытания ... радиолокационных и радионавигационных устройств и систем».

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

По материалам диссертации опубликовано 15 работ, среди них: 5 статей – в журналах, рекомендованных ВАК и 4 работы – в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science или Scopus.

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в работах, опубликованных в **рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК)**:

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

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

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

4. Подкопаев А. О., Степанов М. А., Тырыкин С. В. Определение параметров четырехточечной частично когерентной модели

радиолокационного объекта на основе ее эквивалентности пятиточечной некогерентной модели // Радиопромышленность. – 2019. – № 4. – С. 35–43.

5. 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 координат // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. – 2019. – № 4. – С. 16–21.

Научные результаты диссертации отражены также в следующих **научных изданиях**, включенных в международные базы цитирования Scopus или Web of Science:

1. Podkopayev A. O., Kiselev A. V., Stepanov M. A. Evaluation and compensation of systematic errors of matrix simulator calibration // The 19 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2018 : proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 156–159.

2. Podkopayev A. O. Stepanov M. A. The algorithm of the two-dimensional partially coherent model synthesis of the moisture target based on its multipoint geometrical starting model // 1 International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020. – Novosibirsk : IEEE, 2020. – P. 17–22.

3. Podkopayev A. O., Stepanov M. A. The application of the method of the square four-point partially coherent model of the volume distributed object synthesis based on its multipoint model // IEEE 22 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk : IEEE, 2021. – P. 208–213.

4. Podkopayev A. O., Stepanov M. A., Kiselev A. V. Synthesis of partially coherent geometric models of radar objects based on their incoherent models // Radio Science, 56, e2021RS007274. – 24 November 2021. <https://doi.org/10.1029/2021RS007274>.

Результаты диссертационных исследований **представлялись в других научных изданиях:**

1. Podkorayev A. Density parameters modeling of angle noise probability function // Science. Research. Practice : тез. Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 22 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 133–134.

2. Подкопаев А. О., Степанов М. А. Моделирование параметров плотности распределения вероятностей шумов координат // Наука. Промышленность. Оборона : тр. XVIII Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 269–274.

3. Подкопаев А. О., Степанов М. А. Границы области эквивалентности двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной моделей // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) : тр. XIV междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 4. – С. 222–226.

4. Подкопаев А. О. Об эквивалентности двухточечной частично когерентной и трехточечной некогерентной геометрической модели // ДНИ НАУКИ НГТУ–2018 : Материалы научной студенческой конференции (итоги научной работы студентов за 2017–2018 гг.): Под редакцией Е.А. Хайленко. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – С. 153–157.

5. Подкопаев А. О., Степанов М. А. Эквивалентность четырехточечной частично когерентной и пятиточечной некогерентной моделей распределенного объекта // Наука. Промышленность. Оборона : тр. XX Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 17–19 апр. 2019 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Т. 2. – С. 264–269.

6. Podkorayev A. O. A Two-Point Partially Coherent Model of the Echoed Signals from Distributed Object Decomposition // Science. Research. Practice: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 20 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 175–176.

В работах, опубликованных в соавторстве, относящиеся к тематике работы результаты получены автором лично. Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах составляет не менее 70% (указывается совокупный процент вклада соискателя в работах).

### **Общее заключение**

Диссертация соответствует требованиям установленным в пп. 9 - 14 Положения «О присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским (докторским) диссертациям, 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 «Синтез малоточечных частично когерентных моделей радиолокационных объектов на основе эквивалентных им некогерентных моделей» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

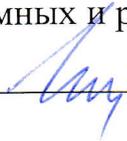
Присутствовало на заседании 10 человек, в том числе 4 докторов наук, 3 кандидата наук.

Результаты голосования: «за» - 10 человек, «против» - 0 человек, «воздержались» - 0 человек, протокол расширенного заседания кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств № 10 от «15» ноября 2021 года.

Председатель расширенного заседания кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств:

Доктор технических наук, профессор,

Профессор кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств

  
\_\_\_\_\_ Киселев Алексей Васильевич

Секретарь расширенного заседания кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств:

Кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры Радиоприемных и радиопередающих устройств

  
\_\_\_\_\_ Савиных Иван Сергеевич

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

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»



О. К. Пустовалова