

ОТЗЫВ

**официального оппонента Монакова Андрея Алексеевича
на диссертацию Степанова Максима Андреевича «Матричные имитаторы угловых шумов радиолокационных объектов», представленную на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»**

В связи со значительным повышением качества и расширением элементной базы современной радиоэлектроники, успехами в создании многоканальных по пространству, частоте и поляризации антенных систем, а также широким распространением цифровых методов обработки сигналов современные радиолокаторы близки по своим возможностям к потенциально достижимым при решении задач обнаружения, измерения координат, разрешения и распознавания наблюдаемых объектов. Это положение в первую очередь касается ситуаций, когда цели, по которым работают радиолокаторы, могут рассматриваться как точечные объекты. Приближение реальных целей точечными источниками возможно в ситуациях, когда расстояние до цели велико, а отношение сигнал/шум настолько мало, что не позволяет определить тонкую структуру сигнала цели, которая содержит информацию о пространственном расположении и взаимном перемещении рассеивающих электромагнитную волну светящихся точек цели. При уменьшении дальности до цели и росте отношения сигнал/шум в радиолокаторах наблюдается возникновение особых ошибок измерения координат наблюдаемого объекта, которые получили название шумов цели. В частности, интерференция сигналов, рассеянных светящимися точками, приводит к искривлению фазового фронта суммарной волны в точке приема и, как следствие, ошибкам оценивания угловых координат. Возникает так называемый угловой шум цели. Реализация обработки сигналов с учетом этого явления позволяет не только получить приемлемую точность оценок угловых координат наблюдаемой цели и реализовать ее качественное сопровождение, но и решить такие важные для радиолокационного наблюдения задачи как классификация и распознавание.

Без решения проблемы адекватного моделирования угловых шумов наблюдаемых протяженных целей нельзя получить нужный уровень качества современных радиолокационных комплексов. Поэтому следует признать, что представленная диссертационная работа М. А. Степанова посвящена актуальной для современной радиолокации проблеме моделирования угловых шумов протяженных целей. Особенностью диссертации, выделяющей ее среди работ в данной области, является ориентация на создание имитаторов полунатурного типа. Исследования, проводимые автором в диссертационной работе, охватывают широкий спектр теоретических и практических задач, возникающих при создании подобных имитаторов. Автор осуществил синтез структуры матричных имитаторов углового шума протяженных целей, дал анализ их эффективности, а также предложил способы технической реализации соответствующих устройств. Помимо теоретических исследований автор провел значительное количество математических и полунатурных экспериментов, доказавших правильность сделанных в работе теоретических выводов. Прикладное значение работы четко отражено в диссертации и подтверждено соответствующими актами внедрения. Теоретические результаты и рекомендации по практическому применению, полученные в работе, легли в основу ряда матричных имитаторов сигналов от протяженных радиолокационных целей при их создании в рамках хозяйственных работ.

Таким образом, диссертация посвящена актуальной и достаточно широкой проблеме, а ее автор внес значительный вклад в ее решение и практическую реализацию полученных результатов.

Переходя к подробному анализу работы, необходимо отметить следующее.

Во введении автор формулирует цель и задачи, решаемые в работе. Здесь же определены основные положения, выносимые на защиту, и указаны направления

исследований в разделах диссертации. Надо отметить, что в приведенной во введении формулировке цели работы присутствует незамеченная автором тавтология, к тому же эта формулировка отличается от данной в первой главе. В целом введение написано в соответствии с принятым в настоящее время планом диссертационных работ.

В первом разделе дан обзор исследований по решаемым вопросам, сформулирована цель работы: «обосновать методы имитации электромагнитных волн, рассеянных радиолокационными объектами, распределенными по двум угловым координатам, на основе матричных имитаторов, излучающих взаимно коррелированные сигналы», а также ее задачи. Приведенный обзор исследований соответствует состоянию вопроса в открытых источниках. Цель и задачи сформулированы четко и соответствуют общей направленности работы. Материал раздела базируется в основном на монографии Р. В. Островитянова и Ф. А. Басалова и посвящен вопросам описания и моделирования углового шума протяженной цели, в составе которой нет доминирующих светящихся точек, которые являются источниками стабильных отражений. По материалам раздела можно сделать следующие критические замечания:

1. Статистика сигнала цели описывается фактически тремя параметрами: средней мощностью отраженного сигнала, угловой координатой энергетического центра отражений и параметром формы (по Р. В. Островитянову и Ф. А. Басалову), который в действительности является величиной обратной эффективной протяженности цели. Эти величины непосредственно определяются через моменты пространственного спектра цели: средняя мощность сигнала соответствует нулевому моменту, угловая координата энергетического центра - первому моменту, эффективная протяженность – второму моменту. К сожалению, автор ни разу не использовал эту связь в работе несмотря на то, что, например, эффективная протяженность является физически более ясным параметром, чем параметр формы.
2. Положение о том, что для моделирования поверхности земли требуется бесконечное количество светящихся точек (разд. 1.1, с. 20) нельзя признать правильным, т.к. это количество зависит от шероховатости поверхности. В этом легко убедиться, наблюдая отражение солнечного света от водной поверхности. В равной степени это положение относится и к другим радиолокационным объектам, например, к самолетам: количество светящихся точек при разных ракурсах для этих объектов обычно не велико (8 – 12) и соответствует тем элементам конструкции, которые могут рассматриваться как facets – элементы корпуса, нормаль к поверхности которых смотрит в направлении фазового центра антенны радиолокатора.
3. Нельзя признать хорошим выбором термин «скорость перемещения КЦИ» (разд. 1.2, с. 31) по отношению к производным положения кажущегося центра излучения (КЦИ) по параметрам z (отношение амплитуд) и ϕ (разность фаз). Эти производные определяют чувствительность положения КЦИ к изменению указанных параметров.
4. В уравнении на с. 33 допущена ошибка: производная L по z должна быть в степени «-1». Это очевидно, т.к. под логарифмом должна стоять безразмерная величина.

Вторая глава посвящена выводу условий, выполнение которых гарантирует адекватность геометрической модели для имитации сигнала протяженной цели произвольной конфигурации. Адекватность модели понимается в работе как равенство одномерных распределений и корреляционных функций угловых шумов модели и имитируемой цели. Естественно, такая трактовка не является строгой, поскольку существует бесконечно много совершенно различных случайных процессов, имеющих одинаковые одномерные распределения вероятности и корреляционные функции. Однако применительно к протяженным целям, состоящим из большого числа светящихся точек,

сигналы которых флюктуируют по амплитуде и фазе, такое понимание эквивалентности модели и самой цели допустимо. В работе получено замкнутое условие (см. уравнение (2.4), разд. 2.1, с. 49), которое гарантирует указанную эквивалентность. Однако, это условие, которое фактически касается вторых моментов пространственно-временного спектра и гарантирует равенство эффективных протяженностей цели и модели, нельзя признать полным. Дело в том, что его выполнение не обеспечивает равенства средних мощностей сигналов (нулевых моментов пространственно-временного спектра) и положений эффективного центра рассеяния (первых моментов пространственно-временного спектра) имитируемой цели и модели. Более того, ситуация здесь значительно более сложная, чем представляется. Фактически она связана с т.н. проблемой моментов: при каких условиях распределение вероятности случайной величины или спектральная плотность мощности случайного процесса может быть полностью восстановлена по своим алгебраическим или тригонометрическим моментам. О проблеме моментов писано большое количество работ (см., например, монографию М. Г. Крейна и А. А. Нудельмана и ссылки в ней). В этих трудах доказано, что в общем случае нельзя восстановить плотность распределения вероятности или мощности по моментам распределений, даже обладая полной информацией об их величинах, а также указаны необходимые и достаточные условия для существования решения проблемы. В защиту предложенного автором условия можно сказать, что названные первые два момента пространственного спектра, которые соответствуют средней мощности отраженного сигнала и положению эффективного центра отражений, в ходе эксперимента могут быть независимо «подстроены» регулировкой мощности СВЧ генератора в составе имитатора и взаимной ориентацией антенн имитатора и антенны пеленгатора при условии, что он чувствителен только к наклону фазового фронта принимаемой волны. Например, пеленгатор - моноимпульсный. При использовании многоканальной по пространству антенной системы возможно измерение моментов пространственного спектра цели третьего и более высокого порядков, что открывает значительно большие возможности. Поэтому сформулированное условие при многоканальности приемной антенны было бы недостаточным.

Третий раздел посвящен обоснованию метода синтеза геометрических моделей произвольной конфигурации, излучающих взаимно коррелированные сигналы. В главе рассмотрены вопросы синтеза некогерентных и частично когерентных геометрических моделей произвольной конфигурации. В главе доказано, что использование некогерентных моделей, сигналы светящихся точек которых имеют одинаковые спектральные характеристики, возможно только для имитации углового шума протяженных целей, для которых выполняется условие факторизуемости пространственного спектра. Предложенные методы синтеза некогерентной модели продолжены на случай частично когерентной модели.

По материалам раздела можно сделать следующие критические замечания:

1. Вызывает возражение утверждение о том, что в случае наличия мощного отражателя с нулевой угловой координатой, спектральные свойства сигнала которого отличаются от спектральных свойств других светящихся точек в составе цели, доплеровская компонента, соответствующая этому сигналу, не будет «участвовать в формировании излучения модели, замещающей объект». Такой вывод, хотя и является прямым следствием уравнений (3.1) на с. 67, не учитывает, что помимо сигнала в разностном канале пеленгатора, который действительно не содержит указанной компоненты, в пеленгаторе существует еще суммарный канал, сигнал в котором эту компоненту будет обязательно содержать. Сказанное лишний раз свидетельствует об опасности пренебрежения спектральными моментами пространственно-временного спектра нулевого и первого порядка при синтезе модели.
2. В некоторых математических выводах допущены неточности. Например, если посмотреть на выражение для A_i (разд. 3.1, с. 71), то оказывается, что $A_i =$

$0,5\text{sign}\xi_i$. В знаменателе дроби перед интегралом в преобразовании Фурье (разд. 3.1.2, ур-ние (3.6), с. 75) должно стоять «2», а не «4». Причем далее эта ошибка многократно повторяется в разделе.

3. Третье слагаемое в последней формуле на с. 100 (разд. 3.3) никакой «статистической взаимосвязи» не соответствует. Дело в том, что функция $F(\xi_1, \xi_2, t_1, t_2)dV_1dV_2 = \langle e(\xi_1, t_1)e^*(\xi_2, t_2) \rangle$, где $e(\xi_j, t_j), j = 1, 2$ – сигнал, излучаемый объемом цели dV_j с координатой ξ_j в момент времени t_j , равна взаимной корреляции сигналов, отраженных двумя элементарными объемами в составе протяженной цели. Это никак не следует из упомянутой формулы.

В четвертом разделе предложены и обоснованы геометрические конфигурации некогерентных моделей, обеспечивающих заданные параметры ПРВ угловых шумов по двум взаимно ортогональным направлениям. Последовательно рассмотрены двух, трех, четырех, пяти и девяти точечные геометрические модели. Показано, что модели, содержащие пять и девять излучателей, расположенных на плоскости, допускают независимую установку положения эффективного центра рассеяния и эффективной протяженности цели по обеим угловым координатам. Все доказательства, приведенные в разделе, убедительны. К критическим замечаниям по разделу может быть отнесено следующее: системы уравнений (4.9) и (4.10) (разд. 4.2, с. 128) названы эквивалентными, несмотря на то что последнее, пятое уравнение системы (4.9), никак не учитывается в системе (4.10).

Пятый раздел посвящен исследованию геометрических моделей, источники которой излучают коррелированные сигналы. В разделе убедительно доказано положение, о том, что с помощью двухточечной модели можно моделировать угловой шум протяженных целей с произвольной пространственной конфигурацией, в составе которых нет стабильных светящихся точек. Отметим, что это положение неявно сформулировано в монографии Р. В. Островитянова и Ф. А. Басалова, где изучению углового шума двухточечной модели придается очень большое значение. Следует сказать, что поставленная в разделе задача вычисления коэффициента корреляции ρ и отношения средних мощностей γ решается прямым алгебраическим способом, без применения использованных в работе тригонометрических замен переменных (5.1) (разд. 5.1, с. 147). Эти замены не только затрудняют решение, но и могут привести к ошибкам, поскольку требуют специальной проверки на выделение истинных корней получающихся уравнений.

В шестом разделе рассматриваются вопросы, связанные с влиянием различных аппаратных ошибок на качество матричных имитаторов углового шума протяженных целей. Анализ влияния аппаратных погрешностей проведен на основе предложенной автором укрупненной структурной схемы матричного имитатора. Материал главы носит важный прикладной характер, поскольку позволяет сформулировать требования к точности задания параметров излучаемых сигналов и идентичности каналов матричного имитатора, которые обеспечивают заданную ошибку моделирования угловых шумов. В главе предложено два алгоритма калибровки каналов имитатора: по минимуму суммарного сигнала и по удвоению амплитуды суммарного сигнала. Определены достоинства и недостатки предложенных алгоритмов, даны рекомендации по их применению. Однако в разделе нет анализа влияния такого параметра как отношения сигнал/шум на качество калибровки. В целом материал раздела представляет несомненную ценность для разработчиков имитаторов сигналов протяженных целей.

Седьмой раздел посвящен вопросам практического использования полученных в работе теоретических результатов. В разделе предложен алгоритм синтеза малоточечной геометрической модели протяженной цели. В качестве примеров использования синтезированного алгоритма рассмотрены имитаторы сигналов двух типовых радиолокационных объектов: подстилающей поверхности для отработки режима

маловысотного полета и самолета В-52. Рассмотрены вопросы, связанные с практической реализацией аппаратных и программных средств матричных имитаторов. К критическим замечаниям по разделу можно отнести следующее:

1. Данная в работе модель отражений от поверхности очень примитивна. Основная проблема при решении задачи оценки рельефа с использованием бортовой РЛС состоит в учете сигналов, приходящих по боковым лепесткам ДН. Эти переотражения являются серьезной помехой при оценивании рельефа. Если нет адекватной модели отражений от поверхности со сложным профилем и нет учета реальной формы диаграммы направленности радиолокатора, то цена полученному решению невелика.
2. Не ясно, почему в модели самолета В-52 сигналы светящихся точек имеют случайные фазы. Самолет представляет собой жесткую конструкцию, расположение отражающих элементов его корпуса практически не изменяется во времени, если не рассматривать упругие деформации корпуса, которые могут проявляться, но на больших интервалах времени. Именно жесткая связь фаз сигналов светящихся точек объекта является исходной предпосылкой для успешного применения инверсного синтеза апертуры, в результате которого получается радиолокационный портрет наблюдаемой цели.
3. Станным выглядит переход из одной прямоугольной системы координат к другой, также прямоугольной, приведенный в разд. 7.2 на с. 217, поскольку при таком переходе не сохраняется длина вектора.

В заключении приведены основные выводы по работе.

Помимо отмеченных выше при чтении работы возникли следующие замечания общего характера:

1. В работе постоянно говорится об имитации сигнала протяженной цели с заданными эффективной протяженностью по углу и корреляционной функцией углового шума. Вместе с тем не ясно, откуда и как получается эта информация.
2. В работе используется термин «распределенная цель» в отличие от введенного в монографии Р. В. Островитянова и Ф. А. Басалова термина «протяженная цель». Последний термин чаще встречается в литературе, посвященной шумам цели и больше соответствует аналогичному английскому термину “extended target”, который был введен в употребление англоязычными авторами первых публикаций по этой теме. Под распределенной радиолокационной целью чаще подразумеваются объекты, занимающие несколько элементов разрешения по дальности и/или углу.
3. Предлагаемые в работе способы имитации сигналов протяженной цели применимы только к антенным датчикам чувствительным к углу наклона фазового фронта волны в точке приема. Такими датчиками являются, например, моноимпульсные пеленгаторы. В действительности флюктуации наклона фазового фронта и его кривизна позволяют решить не только задачи измерения координат наблюдаемого объекта, но и такие задачи, как разрешение групповых целей, классификация и распознавание наблюдаемых протяженных целей. Однако решение подобных задач предполагает использование многоканальных по пространству антенных систем – антенных решеток.
4. В предлагаемых имитаторах нет различия по времени задержки излучаемых отдельными источниками сигналов. Вместе с тем анализ показывает, что разброс времен задержки сигналов светящихся точек цели может существенным образом повлиять на распределение вероятности углового шума. Плотность вероятности углового шума может меняться от равномерной, когда между сигналами полностью отсутствует перекрытие по времени, до плотности распределения Стюдента, когда это перекрытие полное.

5. Выбор отечественных источников по теме диссертации надо признать неполным. Из работ Р. В. Островитянова – пионера исследований в области радиолокации протяженных целей, цитируется и используется монография 1982 года. Однако работа Р. В. Островитянова над теорией радиолокации протяженных целей продолжалась вплоть до его ухода в 1993 году. За годы, прошедшие после выхода в свет монографии, многое из того, что было в ней опубликованным, подверглось ревизии. То же самое можно сказать и о цитируемых работах оппонента: они относятся к дальномерному шуму и критерию протяженности цели по дальности.
6. Некоторые результаты, выведенные в работе довольно сложным способом, можно получить более просто. Это не только сократило бы запись математических уравнений, но и дало более осмысленные результаты. Почему-то автор пренебрег комплексной записью многих уравнений, которые не только допускали комплексную нотацию, но и требовали ее введения.

Подводя итог критическому рассмотрению работы, можно сказать, что диссертация является солидным исследованием, посвященным кругу взаимосвязанных вопросов, представляющих несомненный теоретический и практический интерес. Работа изложена четко, доказательства основных положений, выводов и рекомендаций являются убедительными. Все это свидетельствует о достоверности и новизне результатов работы, которые могут быть использованы при разработке высококачественных имитаторов сигналов протяженных радиолокационных целей.

Автореферат полно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что представленная работа соответствует требованиям, установленным в Положении о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, а ее автор, Степанов Максим Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация».

Доктор технических наук,
профессор кафедры «Радиотехнические системы»,
Институт радиотехники, электроники и связи,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»

«23» сентября 2019 года



/А. А. Монаков/

Адрес ФГАОУ ВО ГУАП: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67
Монаков Андрей Алексеевич – доктор технических наук, профессор,
Ученое звание – профессор по кафедре радиотехнических систем,
Рабочий телефон: +7 812 494 70 22,
Мобильный телефон: +7 904 331 87 52,
E-mail: a_monakov@mail.ru,
Научная специальность: 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»