

На правах рукописи



**Ермаков Павел Игоревич**

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Монаков Андрей Алексеевич**
- Официальные оппоненты:** **Мысливцев Тимофей Олегович**  
доктор технических наук, доцент, начальник кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ Федерального государственного казённого военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военно-космическая Краснознамённая академия имени А. Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации  
**Калишин Алексей Сергеевич**  
кандидат технических наук, заведующий отделом геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»
- Ведущая организация:** **Акционерное Общество «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры», г. Санкт-Петербург.**

Защита состоится «19» июня 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д212.233.05 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», а также на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «15» мая 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.233.05  
кандидат технических наук, доцент



Овчинников А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время широкое применение находят многопозиционные радиотехнические системы. Не являются исключением и системы, применяемые в метеорологической радиолокации. Будем далее называть такие системы многопозиционными метеорологическими радиолокационными комплексами (ММРЛК). Практическая значимость таких систем неоспорима, т.к. получаемые с помощью них данные полезны во многих сферах человеческой деятельности. Это могут быть и непосредственно метеорологические наблюдения, и авиация, и сельское хозяйство, и логистика, и т.д. – сфера применения ММРЛК постоянно расширяется.

В качестве примеров наиболее крупных многопозиционных систем можно привести такие, как «*NEXRAD*» (США), «*Canadian Doppler Network*» (Канада), «*OPERA*» (Европа), «*MAPC*» (Россия и СНГ). Тем не менее, большинству существующих систем присущ существенный недостаток: плохое покрытие на низких высотах в условиях сложного рельефа. Это связано прежде всего с тем, что типичные ММРЛК основаны на метеорологических радиолокаторах (МРЛ) дальнего действия S- или C-диапазонов. В связи с этой проблемой в активной разработке находятся ММРЛК, основанные на малогабаритных МРЛ X-диапазона.

Обработка сигналов в ММРЛК включает в себя широкий спектр задач: измерение радиолокационной отражаемости, характеристик ветра, обнаружение гроз, торнадо и других опасных метеорологических явлений, измерение интенсивности осадков и определение их типа, и др. Во всей полноте невозможно охватить эти задачи в рамках одной работы, поэтому в диссертационной работе основное внимание будет уделено классическим задачам метеорологической радиолокации: измерению радиолокационной отражаемости, скорости ветра и параметров турбулентного движения воздуха.

**Степень разработанности.** Вопросам обработки сигналов в ММРЛК в целом посвящено достаточно большое число публикаций, однако подобного нельзя утверждать в отношении специфических ММРЛК на основе малогабаритных МРЛ X-диапазона. Большая часть работы в этом направлении в настоящее время делается в рамках проекта «*CASA*» («*Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere*»). Сюда можно отнести публикации таких авторов, как В. Чандрасекар (V. Chandrasekar), Д. Маклафлин (D. McLaughlin), К. Дроуджмайер (K. Droegemeier), С. Шимамура (S. Shimamura), С. Фрэйзер (S. Frasier), С. Лим (S. Lim), Ф. Хуньент (F. Junyent), П. Ли (P. Lee) и многих других. Также существенный вклад в исследование ММРЛК внесло большое количество авторов, напрямую неассоциированных с «*CASA*», например, Р. Лермитт (R. Lhermitte), Дж. Чжан (J. Zhang), П. Рэй (P. Ray), Р. Сривастава (R. Srivastava), Л. Тянь (L. Tian), Дж. Джао (J. Jao), М. Сюэ (M. Xue), Р. Минчиарди (R. Minciardi), А. Шапиро (A. Shapiro), А. С. Солонин, Т. А. Базлова, Н. В. Бочарников.

Вопрос оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК с учетом специфики МРЛ X-диапазона требует в первую очередь подробного рассмотрения случая однопозиционного МРЛК. Существующие в этом направлении ре-

шения на данный момент обладают рядом недостатков, и самый существенный среди них это – аномальные ошибки оценки отражаемости. В качестве обобщения этих результатов на случай произвольного количества МРЛ предложено два алгоритма в рамках проекта «CASA». Однако этим алгоритмам также присущ важный недостаток – возникновение пространственных областей с неопределенной отражаемостью.

На тему оценки средней скорости ветра наиболее актуальными являются статьи, опубликованные коллективом авторов во главе с Дж. Джао (J. Jao). Несмотря на хорошую проработанность вопроса в этих работах акцентируется внимание на вычислительных аспектах задачи, а вопрос эффективности предлагаемых оценок проработан недостаточно.

Задача оценки параметров турбулентности в ММРЛК проработана достаточно слабо, при этом практически все существующие работы носят эмпирический характер. В них авторы не ставят задачу анализа структуры и свойств турбулентных областей, ограничиваясь представлением экспериментальных результатов измерения интенсивности турбулентности в конкретных регионах.

**Цель и задачи.** Целью диссертационной работы является синтез алгоритмов обработки сигналов в ММРЛК на базе малогабаритных МРЛ X-диапазона для эффективного решения классических задач метеорологической радиолокации: оценки радиолокационной отражаемости, оценки скорости ветра и оценки параметров турбулентности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модель сигнала МРЛ, учитывая анизотропию турбулентного движения воздуха и эффект затухания электромагнитных волн в метеообразованиях (МО).
2. Синтезировать алгоритмы оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК, учитывающие явление затухания сигналов малогабаритных МРЛ X-диапазона в МО.
3. Синтезировать алгоритмы оценки средней скорости ветра в ММРЛК, учитывающие анизотропию турбулентного движения воздуха.
4. Синтезировать алгоритмы оценки параметров турбулентного движения воздуха в ММРЛК.

**Научная новизна.** Среди результатов исследования новыми являются следующие:

1. В ходе определения модели сигнала МРЛ получено общее выражение для пространственно-временной взаимокорреляционной функции сигналов в ММРЛК, позволяющее учесть влияние параметров турбулентного движения воздуха на статистические характеристики сигналов.
2. Определена потенциальная точность оценки в ММРЛК следующих параметров: радиолокационной отражаемости, компонент вектора средней скорости ветра и среднеквадратических отклонений (СКО) компонент скорости турбулентного движения воздуха.

3. Разработано три новых алгоритма оценки радиолокационной отражаемости в случае однопозиционного МРЛ, которые позволяют компенсировать затухание радиоволн при распространении в МО: нелинейный БИХ фильтр, фильтр частиц и интерактивный многомодельный фильтр частиц.

4. Разработано два новых алгоритма совместной оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК с произвольным числом МРЛ: оценка по методу максимального правдоподобия (МП) и оценка по методу минимума среднеквадратической ошибки (МСКО).

5. Синтезирован новый алгоритм совместной оценки компонент вектора средней скорости ветра и параметров турбулентности в ММРЛК на основе известных оценок средней частоты и среднеквадратической ширины спектральной плотности мощности (СПМ) метеосигнала, а также получен ряд упрощенных алгоритмов.

**Теоретическая значимость полученных результатов.** Теоретический интерес представляют полученные выражения для потенциальной точности оценки исследуемых в работе параметров МО, а также синтезированные алгоритмы оценки этих параметров.

**Практическая значимость полученных результатов.** Разработанные алгоритмы оценки параметров МО адаптированы для ММРЛК на базе МРЛ X-диапазона, что на практике способствует эффективному решению классических задач метеорологической радиолокации: оценки радиолокационной отражаемости, оценки средней скорости ветра и оценки параметров турбулентности.

Кроме того, предложенные алгоритмы обобщают уже существующие алгоритмы, разработанные для классических ММРЛК на базе МРЛ S- и C-диапазонов, и поэтому могут быть применены и в таких системах.

Некоторые из предложенных алгоритмов (например, алгоритмы оценки отражаемости для однопозиционного МРЛК), могут быть адаптированы для применения в системах, не имеющих отношения к радиолокации, например, в акустике, медицине и т.д.

**Методология и методы исследования.** В основу исследований положены методы теории вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования, методы теории метеорологической радиолокации.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие положения:

1. Установлено, что статистические характеристики сигналов в ММРЛК определяются статистикой продольной, поперечной и вертикальной составляющих анизотропного турбулентного движения воздуха, что подтверждается полученной в работе пространственно-временной взаимокорреляционной функцией сигналов в ММРЛК.

2. Разработанные для однопозиционной МРЛК X-диапазона алгоритмы оценки радиолокационной отражаемости (нелинейный БИХ фильтр, фильтр частиц (ФЧ) и многомодельный ФЧ (ММФЧ)) устойчивы по отношению к аномальным ошибкам и позволяют компенсировать затухание радиоволн при распространении в метеообразованиях. Точность оценки отражаемости синтезиро-

ванных алгоритмов не хуже 1.5 дБZ. Лучшие результаты получаются при использовании ФЧ и ММФЧ: оценки имеют смещение порядка 0.2 дБZ и СКО 1 дБZ.

3. Синтезированные для ММРЛК на базе МРЛ X-диапазона МП и МСКО оценки позволяют оценить радиолокационную отражаемость с высокой точностью: для МП-оценки смещение составляет 0.1 дБZ, СКО ошибок – 0.7 дБZ; для МСКО-оценки смещение составляет 0.2 дБZ, СКО ошибок – 0.9 дБZ. МП-оценка имеет лучшие показатели качества по сравнению с алгоритмом, разработанным в рамках американского проекта «CASA». При использовании предложенных алгоритмов в зоне ответственности ММРЛК не возникает областей с неопределенной радиолокационной отражаемостью.

4. Разработанный метод совместной оценки компонент поля скоростей ветра в ММРЛК на базе МРЛ X-диапазона позволяет получить несмещенные оценки, СКО которых менее 1.5 м/с для компонент вектора средней скорости ветра и менее 1.7 м/с для СКО компонент скорости турбулентного движения воздуха. Предложенный метод позволяет оценить СКО компонент скорости анизотропного турбулентного движения воздуха и не имеет аналогов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается корректным применением методов математической статистики, математического моделирования, соответствием используемых моделей радиолокационной обстановки реальным физическим процессам. Характеристики точности всех предложенных в работе алгоритмов сравниваются с потенциально достижимыми, а также с соответствующими характеристиками уже существующих алгоритмов. Кроме того, основные результаты диссертационной работы обсуждались на конференциях в период с 2014 по 2016 гг.: на научных сессиях СПбГУАП (г. Санкт-Петербург), на 20-й и 21-й международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» RLNC (г. Воронеж); на 17-й международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (г. Санкт-Петербург).

**Личный вклад.** Все результаты, представленные в тексте диссертационной работы, получены автором лично.

**Публикации.** Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в восьми научных публикациях, среди которых три статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК.

**Внедрение результатов исследования.** Практическая полезность результатов диссертации подтверждается актами о внедрении, полученными автором от ООО «Контур-НИИРС» и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и шести приложений. Работа содержит 148 страниц машинописного текста, 24 рисунка, список использованных источников из 140 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обсуждается актуальность работы и степень разработанности исследуемой темы, поставлены цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты исследования, дано краткое описание работы по главам.

**В первой главе** проанализированы существующие ММРЛК и подходы к обработке сигналов в этих комплексах. Современные ММРЛК строятся на базе МРЛ S- и С-диапазонов, в связи с чем им присущ ряд недостатков:

- Неспособность системы обнаруживать такие опасные метеорологические явления, как воронки торнадо, расположенные у поверхности земли;
- Ограниченная точность оценки интенсивности осадков на низких высотах;
- Для обеспечения удовлетворительной угловой разрешающей способности требуются громоздкие антенные системы;
- МРЛ на высокой дальности предоставляет смазанную картину метеорологической обстановки, будучи неспособным разрешить ее мелкомасштабную структуру.

По этой причине в настоящее время актуальна тема разработки нового типа ММРЛК на базе малогабаритных МРЛ X-диапазона, следовательно, актуальны задачи разработки алгоритмов обработки сигналов в таких комплексах. В настоящее время большая часть работы в данном направлении производится в рамках американского проекта «CASA».

Для решения задачи оценки радиолокационной отражаемости в однопозиционных МРЛК в настоящее время используются алгоритмы компенсации ослабления электромагнитных волн в метеообразованиях. В большинстве своем эти алгоритмы основаны на результатах Хитчфельда (Hitschfeld) и Бордана (Bordan). Существенный недостаток таких алгоритмов заключается в том, что они крайне вычислительно неустойчивы в случае неидеальной калибровки МРЛ. Такая неустойчивость приводит к аномальным ошибкам, которые выражаются в нетипичном расхождении кривых истинной отражаемости и ее оценки.

Единственные на текущий момент предпринятые попытки к обобщению этих результатов на произвольное число МРЛ – это работа В. Чандрасекара (V. Chandrasekar) и С. Лима (S. Lim) «*Retrieval of Reflectivity in a Networked Radar Environment*», а также работа С. Шимамуры (S. Shimamura) в соавторстве с В. Чандрасекаром (V. Chandrasekar) «*Probabilistic Attenuation Correction in a Networked Radar Environment*». Оба предложенных алгоритма базируются на классическом алгоритме для однопозиционных МРЛК. По этой причине им также свойственна проблема вычислительной устойчивости и аномальных ошибок, приводящая к возникновению пространственных областей с неопределенной отражаемостью.

Наиболее эффективный подход к решению задачи оценки вектора средней скорости ветра в ММРЛК предложен Дж. Джао (J. Gao) и соавторами. Стоит отметить, что при повышенном внимании к вычислительным сложностям авторы недостаточно внимания уделяют решению задачи на уровне радиолокационных измерений. Во всех встречающихся работах этот этап сводится к минимизации невязки измеренных и ожидаемых радиальных скоростей, однако такой подход вытекает из простейшей модели отраженного сигнала и изотропной модели турбулентности.

Большинство работ на тему оценки параметров турбулентного движения воздуха носят эмпирический характер. При этом в них не ставится задачи выяснить структуру и свойства наблюдаемых турбулентных областей. Это связано с тем, что турбулентность довольно сложно формально описать, чтобы синтезировать на основе этого описания эффективные алгоритмы оценки ее параметров.

Ввиду описанных выше недостатков существующих решений были сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** синтезирована математическая модель сигналов в ММРЛК. Модель основана на основном уравнении метеорологической радиолокации (УМРЛ), а также включает в себя пространственно-временную взаимно корреляционную функцию (ПВКФ).

В качестве УМРЛ можно использовать известный результат для однопозиционных МРЛК:

$$\bar{P} = \frac{\pi^3 P_t G^2 L^2 \theta_1^2 c \tau_u |K_w|^2 Z}{2^{10} \ln 2 \lambda^2 R^2}.$$

Здесь  $\bar{P}$  – средневыборочная мощность отраженного сигнала [Вт];  $\theta_1$  – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) в [рад];  $K_w = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \approx 0,93$  для капель дождя,  $m$  – комплексный показатель преломления воды;  $Z$  – радиолокационная отражаемость, [м<sup>3</sup>];  $G$  – коэффициент направленного действия антенны МРЛ;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $P_t$  – импульсная мощность передатчика, [Вт];  $R$  – дальность, [м];  $L$  – односторонний коэффициент ослабления мощности при распространении сигнала на дальность  $R$ ;  $\tau_u$  – длительность сигнала, [с];  $c$  – скорость света в [м/с].

Для вывода ПВКФ необходимо определить модель турбулентного движения воздуха. В работе была выбрана статистическая модель непрерывных порывов фон Кармана в связи с удобством применения и хорошей сходимостью предсказываемых и наблюдаемых характеристик турбулентности.

В ходе работы было показано, что при определенных физически обоснованных допущениях ПВКФ в бистатистическом ММРЛК можно факторизовать на пространственную и временную составляющие:

$$R(\tau) = \exp(i2kV_r \tau) \exp\{-2(k\sigma_v \tau)^2\},$$

$$R(\mathbf{d}) = \int_S p(x, y) \exp(i2k \mathbf{n}(x, y) \cdot \mathbf{d}) ds = \int_S p(\mathbf{r}) \exp(i2k \mathbf{n}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{d}) d\mathbf{r},$$

где  $\tau$  – временной интервал между измерениями напряжений на входах приемников МРЛ;  $\mathbf{d}$  – вектор, определяющий относительное расположение двух МРЛ;  $V_r$  – средняя радиальная скорость ветра по отношению к первому МРЛ системы;  $\sigma_v^2$  – дисперсия проекции поля скорости ветра на линию визирования первого МРЛ системы;  $k$  – волновое число;  $p(x, y) = p(\mathbf{r})$  – пространственное распределение радиолокационной отражаемости в наблюдаемом объеме  $S$ ;  $\mathbf{n}(x, y) = \mathbf{n}(\mathbf{r})$  – орт-вектор, проведенный из точки расположения первого МРЛ в точку  $(x, y)$  наблюдаемого объема.

В ходе математического моделирования было выявлено, что интервал пространственной корреляции достаточно мал (менее 40 [см]), чтобы на практике считать сигналы отдельных МРЛ в составе МРЛК некоррелированными.

При дальнейшем анализе выражения ПВКФ были выявлены факторы, оказывающие влияние на ширину спектра сигналов в ММРЛК: перемещение под действием ветра метеочастиц в элементе разрешения, разброс доплеровских частот сигналов, принимаемых с разных направлений, разброс скоростей метеочастиц вследствие турбулентности. Расчеты по полученным формулам при типичном сценарии использования МРЛ показали, что наибольшее влияние на ширину спектра сигнала оказывает фактор, связанный с турбулентностью. На заданном сценарии этот фактор вызвал уширение спектра на 125 [Гц], в то время как разброс доплеровских частот сигналов по направлениям и перемещение метеочастиц в элементе разрешения вызвали уширения 20 и 0.1 [Гц] соответственно.

**Третья глава** посвящена задаче оценки радиолокационной отражаемости в однопозиционных МРЛК. Показано, что основная трудность при решении данной задачи заключается в сильном ослаблении электромагнитных волн Х-диапазона при распространении в МО. Таким образом, эффективный алгоритм оценки радиолокационной отражаемости подразумевает компенсацию ослабления электромагнитных волн. Для удобства введем термины: *измеряемая* отражаемость – отражаемость, вычисленная напрямую без компенсации ослабления мощности; *истинная* отражаемость – отражаемость, вычисленная после компенсации ослабления мощности.

В главе рассмотрен наиболее часто применяемый в настоящее время алгоритм – НКИХ фильтр (нелинейный фильтр с конечной импульсной характеристикой), позволяющий оценить радиолокационную отражаемость метеорологической цели вдоль луча МРЛ в соответствии со следующим выражением:

$$\hat{Z}_{\text{ист}}[n] = \frac{\hat{Z}_{\text{изм}}[n]}{\left[1 - \gamma\beta \sum_{j=0}^n \hat{Z}_{\text{изм}}^\beta[j]\right]^{\frac{1}{\beta}}},$$

где  $\gamma = 0,46\alpha\delta r$ ;  $\delta r$  – элемент разрешения по дальности;  $\alpha, \beta$  – параметры модели ослабления сигнала в метеорологической цели;  $\hat{Z}_{\text{ист}}$  – вектор оценок истинной отражаемости вдоль луча МРЛ;  $\hat{Z}_{\text{изм}}$  – вектор оценок измеренной отражаемости вдоль луча МРЛ.

Показано, что НКИХ фильтру свойственны аномальные ошибки оценивания отражаемости – при определенных условиях может возникать нетипичное расхождение кривых истинной и измеренной отражаемости. Данный недостаток является основной мотивацией к разработке новых алгоритмов.

Разработан новый алгоритм оценки радиолокационной отражаемости – НБИХ фильтр (нелинейный фильтр с бесконечной импульсной характеристикой). Данный алгоритм основан на искусственной задержке в оценке радиолокационной отражаемости на один элемент разрешения по дальности. Оценка радиолокационной отражаемости при этом вычисляется по формуле:

$$\hat{Z}_{\text{ист}}[n] = \hat{Z}_{\text{изм}}[n-1] \exp\left(\gamma \sum_{j=0}^{n-1} \hat{Z}_{\text{ист}}^{\beta}[j]\right).$$

Оценка истинной отражаемости по измеренной является типичной задачей нелинейной фильтрации. Одним из наиболее мощных средств решения задач нелинейной фильтрации является фильтр частиц (ФЧ). В диссертационной работе использовалась простейшая разновидность ФЧ - BSF (*Bootstrap Filter*). ФЧ применяется для оценки вектора состояния дискретных нелинейных динамических систем. При этом предполагается, что изменение вектора состояния системы  $\mathbf{x}[n], n=0,1,\dots$  и процесс формирования вектора наблюдения  $\mathbf{z}[n], n=0,1,\dots$  описываются следующими двумя нелинейными разностными уравнениями:

$$\begin{cases} \mathbf{x}[n] = \mathbf{F}_n(\mathbf{x}[n-1], \mathbf{u}[n]) \\ \mathbf{z}[n] = \mathbf{G}_n(\mathbf{x}[n], \mathbf{v}[n]) \end{cases},$$

где  $\mathbf{F}_n(\cdot)$  и  $\mathbf{G}_n(\cdot)$  – известные нелинейные функции,  $\mathbf{u}[n]$  – формирующий дискретный белый шум,  $\mathbf{v}[n]$  – белый шум наблюдения.

Для оценки истинной отражаемости с помощью ФЧ удобно ввести вектор состояния в виде:

$$\mathbf{x}[n] = \begin{pmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{\text{ист}}[n] \\ \sum_{j=0}^{n-1} Z_{\text{ист}}^{\beta}[j] \end{pmatrix}.$$

Тогда уравнение наблюдения примет вид:

$$z[n] = K^{-1} x_1[n] \exp\left\{-\gamma(x_1^{\beta}[n] + x_2[n])\right\} v[n],$$

где  $z[n] = \hat{Z}_{\text{изм}}[n]$ ;  $K$  – количество отсчетов сигнала при накоплении;  $v[n]$  – дискретный белый шум с гамма-распределением, параметром формы  $K$  и единичным коэффициентом масштаба.

Для получения уравнения изменения вектора состояния будем полагать, что в среднем истинная отражаемость распределена равномерно, а существующие изменения при переходе от одного элемента разрешения по дальности к следующему происходят за счет мультипликативного формирующего шума  $u[n]$ , имеющего гамма-распределение:

$$\begin{cases} x_1[n] = x_1[n-1]u[n-1] \\ x_2[n] = (x_1[n-1])^\beta + x_2[n-1] \end{cases}.$$

Априорное незнание распределения отражаемости в объеме, занимаемом метеорологической целью, может быть также компенсировано, если предположить, что отражаемость от элемента к элементу разрешения может меняться согласно некоторой модели. Таких моделей может быть несколько, причем каждая из них действует только в пределах некоторой области, а переход от модели к модели при перемещении по элементам разрешения по дальности происходит случайным образом и управляется некоторой конечной марковской цепью с априорно известными вероятностными характеристиками. Такое предположение дает возможность использовать для решения поставленной задачи многомодельный фильтр частиц (ММФЧ) (*Interacting Multiple Model Particle Filter*). В работе синтезирован ММФЧ на основе BSF (IMM BSF). Ключевое отличие от ФЧ BSF заключается в уравнении изменения вектора состояния:

$$\begin{cases} x_1[n] = (x_1[n-1] + M[n]\Delta Z)u[n-1] \\ x_2[n] = x_1^\beta[n-1] + x_2[n-1] \end{cases},$$

где  $M[n]$  – однородная марковская случайная цепь, заданная на множестве целых чисел;  $\Delta Z$  – известное приращение отражаемости. Таким образом, отражаемость при переходе от элемента к элементу может изменяться не только случайным образом, но и скачком, кратным  $\Delta Z$ .

Для оценки качества работы предложенных в главе алгоритмов было проведено математическое моделирование. На рисунке 1 изображен пример компенсации ослабления электромагнитных волн. Здесь FIR – НКИХ фильтр, ПР – НБИХ фильтр, BSF – ФЧ, IMM – ММФЧ. Как видно из рисунка, все четыре фильтра удовлетворительно справились со своей задачей, восстановив профиль истинной отражаемости.

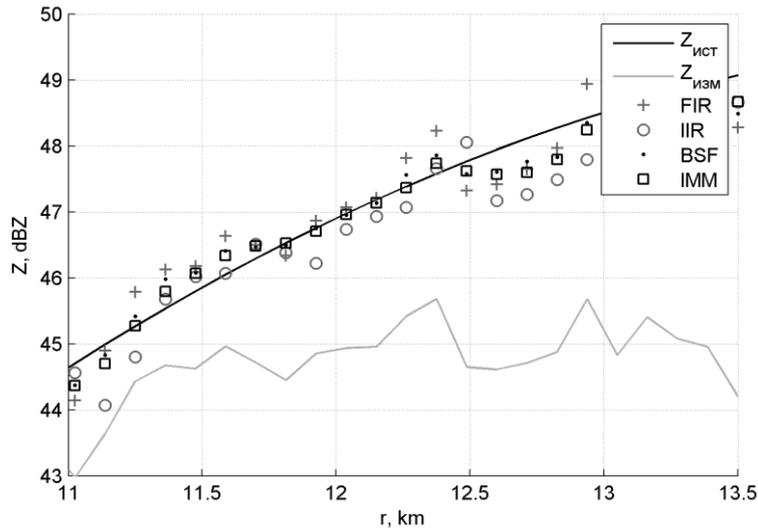


Рисунок 1 – Оценка истинной отражаемости

Все оценки являются смещенными. Максимальное смещение не превосходит 0.7 [дБЗ] для НБИХ и НКИХ фильтров и 0.2 [дБЗ] для ФЧ и ММФЧ. Лучшим по смещению является ММФЧ, для которого этот параметр не превосходит 0.1 [дБЗ]. Из пары НБИХ и НКИХ фильтров меньшее смещение, не превосходящее 0.6 [дБЗ], дает последний. Таким образом, по смещению фильтры частиц имеют заметное преимущество перед нелинейными фильтрами.

Сравнение оценок по СКО показывает, что у ФЧ и ММФЧ этот параметр на 2-3 дБ меньше на переднем фронте метеорологической цели, чем у НБИХ и НКИХ фильтров. На заднем фронте метеорологической цели нелинейные фильтры имеют меньшее СКО, чем фильтры частиц. В целом все полученные оценки близки к эффективной.

По результатам моделирования можно заключить, что все рассмотренные фильтры имеют примерно одинаковые точностные свойства и близки к статистически эффективному оценителю. Однако стоит иметь в виду, что НКИХ фильтру свойственны аномальные ошибки оценивания. Вследствие этого для решения практических задач предпочтение следует отдать простому в реализации НБИХ фильтру.

**В четвертой главе** решена задача оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК. Для решения задачи рассмотрены принципы оптимального размещения МРЛ в ММРЛК, в соответствии с которыми рекомендуется формировать ММРЛК из единообразных ячеек в виде правильных многоугольников, в вершинах которых размещены МРЛ. Сделан краткий обзор существующих способов пространственно-временной интерполяции данных в ММРЛК.

На основе результатов для однопозиционных комплексов вычислены функция правдоподобия (ФП) и потенциальная точность оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК. С помощью полученного выражения для ФП синтезирована МП-оценка, алгоритм которой сводится к минимизации целевой функции:

$$f(\mathbf{Z}_{\text{ист}}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D \left( \ln S^{(m)}[n, d] + \frac{\hat{Z}_{\text{изм}}^{(m)}[n, d]}{S^{(m)}[n, d]} \right),$$

где  $S^{(m)}[n, d] = Z_{\text{ист}}^{(m)}[n, d] \exp\left(-\gamma \sum_{j=0}^n (Z_{\text{ист}}^{(m)}[j, d])^\beta\right)$ ;  $\hat{Z}_{\text{изм}}^{(m)}[n, d] = \hat{Z}_{\text{изм}}^{(m)}(r_n, \varphi_d)$  – измеренная  $m$ -м МРЛ отражаемость в  $n$ -й ячейке дальности и  $d$ -й ячейке угла;  $\mathbf{Z}_{\text{ист}}$  – вектор истинной отражаемости в узлах некоторой наперед заданной глобальной сетки;  $D$  – число элементов разрешения по углу;  $N$  – число элементов разрешения по дальности;  $M$  – число МРЛ в составе ММРЛК.

Получены вспомогательные выражения для элементов градиента и матрицы Гессе целевой функции, позволяющие решить задачу оценки отражаемости методами многомерной нелинейной оптимизации, например, методом градиентного спуска.

Используя формулу связи истинной и измеренной отражаемостей, можно записать целевую функцию по методу минимума среднеквадратической ошибки (СКО) в следующем виде:

$$R = \sum_{k=1}^Q \sum_{m=1}^M W_k^{(m)} \left[ Z_{\text{изм}}^{(m)}[k] - Z_{\text{ист}}[k] \exp\left\{-0.46\alpha |\bar{r}_m - \bar{r}_k| \int_0^1 Z_{\text{ист}}^\beta (q\bar{r}_m + (1-q)\bar{r}_k) dq\right\} \right]^2,$$

где  $Z_{\text{изм}}^{(m)}[k]$  – измеренная  $m$ -м МРЛ отражаемость, интерполированная в  $k$ -м узле глобальной сетки;  $\bar{r}_m$  – радиус-вектор, проведенный в позицию  $m$ -го МРЛ;  $\bar{r}_k$  – радиус-вектор, проведенный в  $k$ -й узел глобальной сетки;  $Z_{\text{ист}}(p)$  – истинная отражаемость, интерполированная в точке  $p$ ;  $W_k^{(m)}$  – вес, обратно пропорциональный расстоянию от  $k$ -го узла глобальной сетки до  $m$ -го МРЛ.

Показано, что возможна итерационная минимизация целевой функции  $R$ . Для этого на каждом шаге в интеграл, стоящий в показателе экспоненты, заносится решение, полученное на предыдущем шаге. При этом задача минимизации на текущем шаге становится стандартной задачей квадратического программирования. Для начала процесса нахождения решения необходимо задать начальное приближение – для этого можно использовать значения измеренной отражаемости, интерполированные в узлах глобальной сетки.

Рассмотрен наиболее актуальный алгоритм оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК, предложенный в рамках проекта «CASA». В соответствии с этим алгоритмом оценка вычисляется по следующей формуле:

$$10 \lg \hat{Z}_{\text{ист}}[k] = \sum_{m=1}^M W_k^{(m)} 10 \lg \hat{Z}_{\text{ист}}^{(m)}[n(k), d(k)],$$

где  $n(k)$  и  $d(k)$  – индексы по дальности и по углу элемента разрешения, ближайшего к  $k$ -му узлу глобальной сетки;  $\hat{Z}_{\text{ист}}^{(m)}[n(k), d(k)]$  – оценка истинной отражаемости  $m$ -м МРЛ, полученная с помощью НКИХ фильтра;  $W_k^{(m)}$  – вес,

обратно пропорциональный дисперсии соответствующей оценки НКИХ фильтром.

Поскольку алгоритм основан на применении НКИХ фильтра, ему присущ тот же существенный недостаток: если в некоторой точке для всех МРЛ комплекса произойдет аномальная ошибка, то оценить отражаемость в этой точке будет невозможно.

Для оценки качества работы предложенных алгоритмов было проведено математическое моделирование на примере одной треугольной ячейки ММРЛК. На рисунке 2 представлены распределение истинной отражаемости и ее оценки по методу максимального правдоподобия.

Для метода МП среднее СКО ошибки оценки отражаемости в  $[\text{дБЗ}]$  составило  $0,75$   $[\text{дБЗ}]$ , а среднее смещение составило  $0,1$   $[\text{дБЗ}]$ ; для метода минимума среднеквадратической ошибки среднее СКО ошибки  $0,92$   $[\text{дБЗ}]$ , а среднее смещение  $0,2$   $[\text{дБЗ}]$ ; для метода «CASA» среднее СКО ошибки  $0,90$   $[\text{дБЗ}]$ , а среднее смещение  $-0,1$   $[\text{дБЗ}]$ .

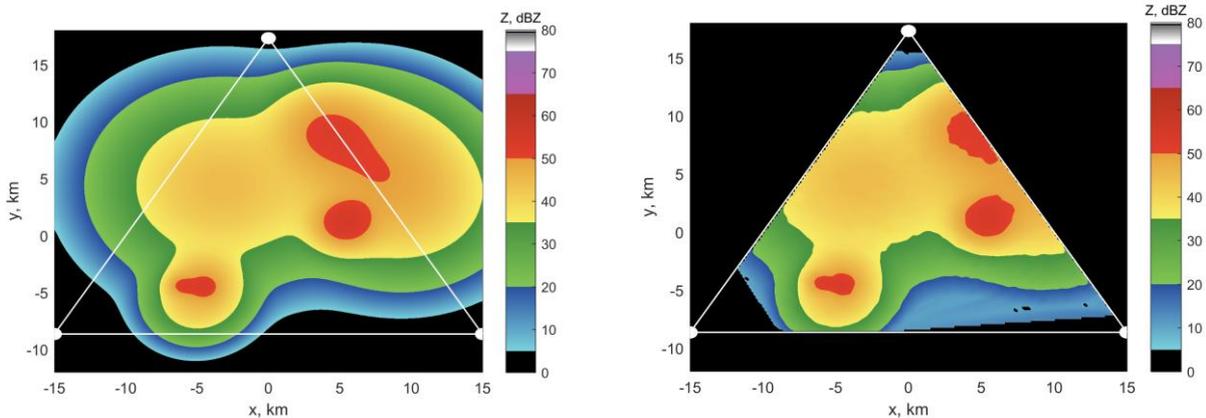


Рисунок 2 – Истинная отражаемость (слева) и ее оценка по методу МП (справа)

По результатам моделирования можно заключить, что наиболее точным из предложенных оказался алгоритм по методу максимального правдоподобия. Однако этот алгоритм является и наиболее затратным с точки зрения расхода вычислительных ресурсов. Алгоритмы МСКО и «CASA» показали сходные характеристики качества оценок в смысле СКО, при этом первый из них склонен недооценивать отражаемость, а второй – переоценивать. Также стоит иметь в виду, что алгоритму «CASA» присущи аномальные ошибки оценки отражаемости в силу того, что он использует в своей работе НКИХ фильтр. По этой причине в процессе работы алгоритма могут возникать области неопределенной отражаемости.

**В пятой главе** рассмотрены вопросы оценки вектора средней скорости ветра и параметров турбулентного движения воздуха в ММРЛК. Показано, что как средняя скорость ветра, так и СКО компонент турбулентного движения воздуха являются параметрами случайного векторного поля скорости ветра, и могут быть оценены совместно.

Вычислены функция правдоподобия и потенциальная точность оценки всех исследуемых параметров.

Показано, что при известных оценках средней частоты и среднеквадратической ширины спектра сигнала поставленную задачу совместной оценки параметров поля скорости ветра можно переформулировать как задачу решения системы уравнений:

$$\begin{cases} f_{cp}^{(1)}(\boldsymbol{\theta}) = \hat{f}_{cp}^{(1)} \\ \vdots \\ f_{cp}^{(M)}(\boldsymbol{\theta}) = \hat{f}_{cp}^{(M)} \\ \Delta F^{(1)}(\boldsymbol{\theta}) = \Delta \hat{F}^{(1)} \\ \vdots \\ \Delta F^{(M)}(\boldsymbol{\theta}) = \Delta \hat{F}^{(M)} \end{cases},$$

где  $\boldsymbol{\theta} = (V_x, V_y, V_z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$  – вектор неизвестных параметров;  $V_i$  – компонента средней скорости ветра;  $\sigma_i$  – СКО компоненты турбулентного движения воздуха;  $\hat{f}_{cp}^{(m)}$ ,  $\Delta \hat{F}^{(m)}$  – оценки средней частоты и среднеквадратической ширины СПМ метеосигнала  $m$ -м МРЛ.

Решить представленную систему уравнений можно методом наименьших квадратов (МНК):

$$\boldsymbol{\theta}_{MSE} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\left( f_{cp}^{(m)}(\boldsymbol{\theta}) - \hat{f}_{cp}^{(m)} \right)^2}{\sigma_f^{2(m)}} + \frac{\left( \Delta F^{(m)}(\boldsymbol{\theta}) - \Delta \hat{F}^{(m)} \right)^2}{\sigma_{\Delta F}^{2(m)}} \right],$$

где  $\sigma_f^{2(m)}$  и  $\sigma_{\Delta F}^{2(m)}$  – дисперсии оценок средней частоты и среднеквадратической ширины СПМ  $m$ -м МРЛ.

Совместную оценку можно разбить на два этапа: на первом производится оценка вектора средней скорости ветра, а на втором полученный вектор средней скорости ветра используется для оценки СКО компонент турбулентного движения воздуха. Описанные этапы эквивалентны последовательному решению двух систем уравнений:

$$\begin{cases} f_{cp}^{(1)}(V_x, V_y, V_z) = \hat{f}_{cp}^{(1)} \\ \vdots \\ f_{cp}^{(M)}(V_x, V_y, V_z) = \hat{f}_{cp}^{(M)} \end{cases}, \quad \begin{cases} \Delta F^{(1)}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = \Delta \hat{F}^{(1)} \\ \vdots \\ \Delta F^{(M)}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = \Delta \hat{F}^{(M)} \end{cases}.$$

Обе системы, как и в случае совместной оценки, решаются с помощью МНК. На основе двухэтапной оценки получен ряд упрощенных оценок, например, оценки без взвешивания:

$$\mathbf{V}_{0MSE} = \arg \min_{\mathbf{V}_0} \sum_{m=1}^M \left( f_{cp}^{(m)}(\mathbf{V}_0) - \hat{f}_{cp}^{(m)} \right)^2,$$

$$\boldsymbol{\theta}_{\sigma MSE} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_\sigma} \sum_{m=1}^M \left( \Delta F^{(m)}(\boldsymbol{\theta}_\sigma) - \Delta \hat{F}^{(m)} \right)^2.$$

Для демонстрации работы синтезированных алгоритмов было проведено математическое моделирование на примере треугольной ячейки ММРЛК. Модуль вектора средней скорости ветра в модели равен 10 [м/с]. Характеристики турбулентного движения были выбраны следующими:  $\sigma_x = 3$  [м/с],  $\sigma_y = 2$  [м/с],  $\sigma_z = 1.5$  [м/с], масштаб всех компонент составил 1 [км]. На рисунке 3 продемонстрированы нормированные СКО оценки  $x$ -компоненты средней скорости ветра и СКО продольной составляющей турбулентного движения воздуха для двухэтапного алгоритма.

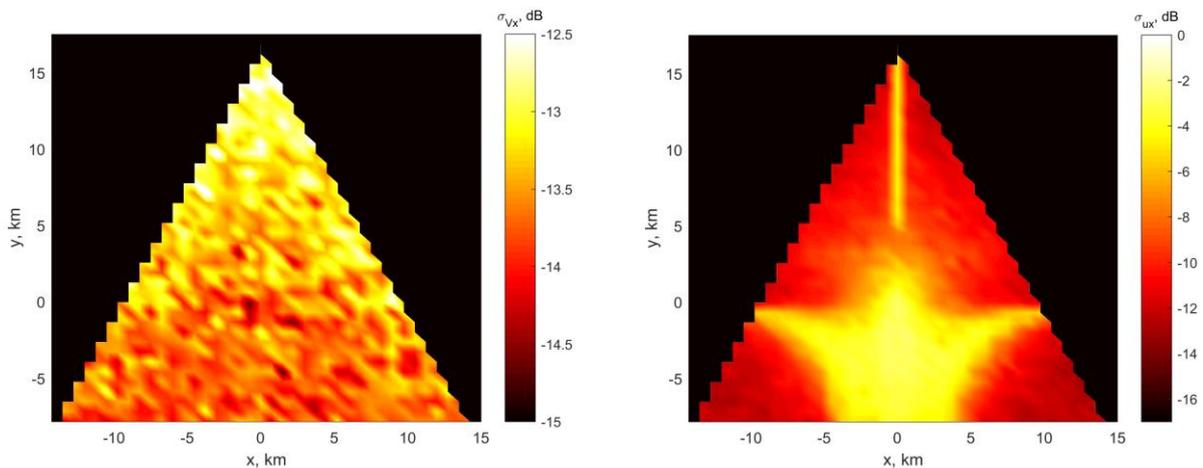


Рисунок 3 – Нормированное СКО оценки  $x$ -компоненты вектора средней скорости ветра по двухэтапному алгоритму (слева) и нормированное СКО оценки  $\sigma_x$  по двухэтапному алгоритму (справа)

По результатам математического моделирования предложенных алгоритмов можно отметить следующее:

- Точности различных алгоритмов оценки компонент вектора средней скорости ветра незначительно отличаются друг от друга и близки к потенциальной, отличаясь от нее не более чем на 3 [дБ].
- Алгоритмы оценки компонент вектора средней скорости ветра малочувствительны к способу взвешивания, поэтому на практике оправдано использование упрощенного алгоритма без взвешивания.
- Точность алгоритмов оценки СКО компонент турбулентности близка к потенциальной, отклоняясь от нее не более чем на 2 [дБ].
- Потенциальная точность оценки СКО компонент турбулентности достигает -3 [дБ]. При необходимости получения более точных оценок следует пересмотреть подходы к конфигурации ММРЛК. Например, к улучшению качества оценок приведет применение алгоритма обзора пространства,

позволяющего увеличить время наблюдения конкретного разрешаемого объема.

- Алгоритмы оценки СКО компонент турбулентности чувствительны к способу взвешивания – при наличии взвешивания точность оценок увеличивается до 3 [дБ] на краях зоны ответственности ММРЛК по сравнению с отсутствием взвешивания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе синтезированы алгоритмы обработки сигналов в ММРЛК на базе малогабаритных МРЛ X-диапазона, предназначенные для эффективного решения классических задач метеорологической радиолокации: оценки радиолокационной отражаемости, оценки скорости ветра и оценки параметров турбулентности. В процессе выполнения работы были получены следующие основные результаты, имеющие научное и практическое значение:

1. Определена математическая модель сигналов в ММРЛК на базе МРЛ X-диапазона. Для описания такой модели был принят во внимание ряд факторов, значимых для упомянутых систем: затухание электромагнитных волн в МО, перемещение МО под действием ветра, взаимное расположение отдельных МРЛ комплекса. Выведено общее выражение для пространственно-временной взаимнокорреляционной функции сигналов, из которого следует, что при типичной конфигурации ММРЛК сигналы отдельных МРЛ можно считать независимыми. Подробно проанализированы и факторизованы явления, оказывающие влияние на СПМ метеосигнала. В ходе математического моделирования выявлено, что при типичной конфигурации ММРЛК наибольшее влияние на среднеквадратическую ширину СПМ оказывает турбулентное движение воздуха. Соответствующее уширение спектра в моделированном сценарии составило 125 [Гц], в то время как уширение, ассоциированное с разбросом доплеровских скоростей метеочастиц в разрешаемом объеме, составило 20 [Гц], а уширение вследствие перемещения разрешаемого объема под действием ветра – всего 0.1 [Гц].

2. Предложено три новых алгоритма оценки радиолокационной отражаемости с помощью МРЛ: НБИХ фильтр, ФЧ и ММФЧ. Кроме того, рассмотрен существующий и наиболее часто применяющийся алгоритм – НКИХ фильтр. Проведено математическое моделирование, дополненное вычислением потенциальной точности оценки отражаемости. В ходе моделирования выяснилось, что все рассмотренные алгоритмы близки к эффективной оценке. Наилучшим по смещению оказался ММФЧ со смещением не более 0.1 [дБZ], а наихудшим – НБИХ фильтр со смещением, достигающим 0.7 [дБZ]. Что касается СКО ошибок оценки, то по этому критерию трудно выявить лучший и худший варианты, т.к. на переднем фронте МО ФЧ и ММФЧ демонстрируют более высокую точность оценок, превышающую таковую для нелинейных фильтров на 2-3 [дБ]. В то же время на заднем фронте МО нелинейные фильтры наоборот демонстрируют более высокую точность по сравнению с ФЧ и ММФЧ. Показано, что при интенсивных МО НКИХ фильтру свойственны аномальные ошибки. Все пред-

ставленные алгоритмы имеют линейную асимптотическую сложность вычислений относительно размера вектора истинной отражаемости, однако на практике НКИХ и НБИХ фильтры работают быстрее в силу того, что применение ФЧ и ММФЧ предполагает использование относительно большого числа статистических испытаний.

3. Предложено два новых алгоритма оценки радиолокационной отражаемости в ММРЛК: оценка по методу МП и оценка по методу МСКО. Кроме того, рассмотрен наиболее актуальный алгоритм, разработанный в рамках американского проекта «CASA». Проведено математическое моделирование, дополненное вычислением потенциальной точности оценки отражаемости. В ходе моделирования выяснилось, что все рассмотренные оценки близки к эффективной, при этом среднее СКО ошибок оценок отражаемости по ЗО ММРЛК для всех алгоритмов не превышает 1 [дБЗ]. Алгоритмы МП и МСКО имеют положительные средние смещения 0.1 и 0.2 [дБЗ] соответственно, а алгоритм «CASA» имеет отрицательное смещение -0.1 [дБЗ]. Что касается СКО ошибок оценки, то по этому критерию наилучшие результаты демонстрирует алгоритм МП: среднее СКО ошибок составило 0.7 [дБЗ], алгоритмы «CASA» и МСКО показывают схожие результаты - 0.9 [дБЗ]. Алгоритм «CASA» унаследовал от НКИХ фильтра подверженность аномальным ошибкам, что является его серьезным недостатком и может приводить к появлению областей неопределенной отражаемости. Асимптотическая сложность вычислений по алгоритму МП квадратична относительно размера сетки, на которой оценивается отражаемость. В свою очередь, для оценок МСКО и «CASA» асимптотическая сложность вычислений линейна.

4. Предложен новый алгоритм совместной оценки в ММРЛК параметров поля скоростей ветра, основанный на оценке МСКО. Получен ряд упрощений предложенного алгоритма, сводящихся к уже существующим алгоритмам – таким образом, предложенный алгоритм является обобщающим. Также получены алгоритмы отдельной оценки параметров, относящихся к средней скорости ветра, и параметров, относящихся к турбулентному движению воздуха. Проведено математическое моделирование, дополненное вычислением потенциальной точности совместной оценки компонент вектора средней скорости ветра и СКО компонент турбулентного движения воздуха. В ходе моделирования выяснилось, что все предложенные оценки являются несмещенными. Оценки компонент средней скорости ветра с разными способами взвешивания незначительно отличаются по точности и в целом близки к эффективной оценке, отклоняясь от нее не более чем на 3 [дБ]. Точность различных алгоритмов оценки СКО компонент турбулентности также близка к потенциальной, отличаясь от нее не более чем на 2 [дБ]. Оценки СКО компонент турбулентности чувствительны к способу взвешивания – при отсутствии взвешивания точность ухудшается до 3-х [дБ] на краях ЗО ММРЛК по сравнению с оценками с взвешиванием. Асимптотическая сложность всех рассмотренных алгоритмов одинакова и линейна относительно размера сетки, на которой оцениваются исследуемые параметры.

Несмотря на то, что освещенный в диссертационной работе круг вопросов достаточно тщательно проработан, существует широкое поле для дальнейших исследований. Во-первых, в работе решены три классические задачи метеорологической радиолокации. Однако данная научно-техническая область не ограничивается только этими задачами, более того, с течением времени возникают новые. Например, представляет интерес исследовать вопросы обнаружения специфических метеорологических явлений с помощью ММРЛК, таких как грозы, торнадо и пр. Также перспективны задачи определения типов осадков. Во-вторых, техническая база МРЛ не стоит на месте, и в настоящее время активно вводятся в эксплуатацию МРЛ с двойной поляризацией излучения – такие МРЛ предполагают иные подходы к вопросам оценки радиолокационной отражаемости и других метеорологических величин. В-третьих, при типичных характеристиках МРЛ потенциальная точность оценки СКО компонент турбулентности достаточно мала. Это подразумевает критическую переоценку существующих подходов к конфигурации ММРЛК. В-четвертых, в настоящее время предлагаются более сложные физические модели МО, например, негауссовские модели турбулентного движения воздуха, что в свою очередь ставит задачи синтеза алгоритмов оценки параметров поля скоростей ветра, которые адаптированы для таких моделей. Наконец, перспективной является разработка алгоритмов обнаружения метеорологических явлений, основанных на применении искусственных нейронных сетей.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК**

1. Монаков А. А., Ермаков П. И. Методы компенсации затухания электромагнитных волн в метеообразованиях // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 12. – С. 19-35.
2. Монаков А. А., Ермаков П. И. Оценка радиолокационной отражаемости в многопозиционных метеорадиолокационных комплексах // Радиотехника. – 2017. – №. 5. – С. 85-90.
3. Ермаков П. И., Монаков А. А. Взаимнокорреляционная функция сигналов и оценка скорости ветра в многопозиционных метеорадиолокационных системах // Информационно-управляющие системы. – 2017. – №. 4. – С. 86-94.

### **Другие статьи и материалы конференций:**

1. Ермаков П. И. Компенсация затухания электромагнитных волн в метеообразованиях. Сборник докладов конференции RLNC-2014. Том 3, секции 8-10, 15-17 апреля 2014 г., Воронеж. – С. 1672-1682.
2. Ермаков П. И. Способы компенсации затухания электромагнитных волн в метеообразованиях. Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 9-12 апреля 2014 г., Санкт-Петербург. – С. 35-44.
3. Ермаков П. И. Алгоритмы компенсации затухания радиоволн в метеообразованиях. Сборник докладов XVII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и

применение высоких технологий в промышленности и экономике». 22-23 мая 2014 г., Санкт-Петербург. – С. 127-128.

4. Монаков А. А., Ермаков П. И. Применение многомодельного фильтра частиц в задаче компенсации затухания электромагнитных волн в метеообразованиях. Сборник докладов конференции RLNC-2015. Том 2, секции 8-10, 14-16 апреля 2015 г., Воронеж. – С. 1601-1612.

5. Ермаков П. И. Методы объединения данных в многопозиционных метеорадиолокационных системах. Научная сессия ГУАП. Часть II. Технические науки. Сборник докладов. 9-12 апреля 2016 г., Санкт-Петербург. – С. 36-46.