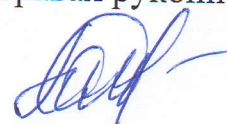


На правах рукописи



ЕРМОШЕНКО ЮЛИЯ МАРКОВНА

**АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЛЁТОВ ВОЗДУШНЫХ
СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта».

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта»
ФГБОУ ВО МГТУ ГА
Болелов Эдуард Анатольевич

Официальные оппоненты:

Марюхненко Виктор Сергеевич
Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Телекоммуникационные системы»
Филиала Военной академии РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)

Даренских Сергей Николаевич

Кандидат военных наук, старший преподаватель кафедры управления ракетными ударами и огнём артиллерии в бою и операции Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования "Михайловская военная артиллерийская академия" МО РФ

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации» (ФГУП ГосНИИ ГА)

Защита состоится «4» октября 2023 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан « » июля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор

 В. М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Несмотря на мировую пандемию COVID-19 и экономические санкции, которые лишь на время затруднили деятельность отечественной гражданской авиации (ГА), современный этап ее развития в целом характеризуется нарастающими тенденциями роста внутренних и международных авиаперевозок.

Наивысшим приоритетом в деятельности ГА является обеспечение безопасности полетов. Безопасность полетов в свою очередь зависит от множества факторов, важнейшими из которых являются метеоусловия полета (МУ).

По причине неблагоприятных МУ происходят до 20% авиационных происшествий (АП). Кроме этого, еще в 30% АП неблагоприятные МУ явились сопутствующей причиной их возникновения. Очевидно, что безопасность полетов воздушных судов (ВС) может быть обеспечена при условии наличия у экипажей достоверной метеорологической информации о фактической и прогнозируемой погоде на аэродроме вылета, аэродроме назначения, на маршруте полета и на запасных аэродромах. Недостоверная, несвоевременно полученная экипажем ВС или диспетчером управления воздушным движением (УВД) метеорологическая информация может привести к серьезному АП, задержке рейса или посадке на запасной аэродром.

Необходимо отметить, что достоверная метеоинформация требуется уже на этапе подготовки ВС к полету. Эта метеоинформация необходима прежде всего для проведения корректных расчетов потребного запаса топлива (ПЗТ), для информирования экипажа ВС и диспетчеров УВД при разработке необходимых мер для облета опасных метеоявлений (ОМЯ), принятия решений на взлет или посадку, уход на запасной аэродром.

Технические средства проведения метеорологических измерений, в свою очередь, должны обеспечивать своевременное получение и точные данные о реальном состоянии атмосферы и ОМЯ на маршруте и в районах полетов ВС. Неверная оценка метеообстановки уже на этапе подготовки ВС к полету может привести к непредвиденному изменению маршрута, вынужденному прекращению полета, что неминуемо вызовет задержку прибытия рейса в аэропорт назначения или задержку рейса в аэропорту вылета, а некоторых случаях и к АП.

Одним из приоритетов Транспортной стратегии России является решение вопросов, связанных с ликвидацией «узких мест» в развитии пропускных и провозных возможностей воздушного транспорта. Среди этих «узких мест» имеет место не только отставание, причем подчас существенное, в развитии и совершенствовании средств метеонаблюдений, но, одновременно, и недостаточно полное использование уже имеющихся возможностей, технологий и информации, предоставляемых органами метеонаблюдений на сетях Росгидромета, аэродромах и по трассам полётов ВС.

Существенное влияние на качество текущей и прогностической метеоинформации на всех этапах полета оказывают данные радиозондирования атмосферы. Именно на их основе формируются метеопрогнозы и метеосводки о состоянии атмосферы и ОМЯ на маршруте полета (SIGMET, AIRMET, GAMET), которые могут повлиять на регулярность и безопасность полетов ВС. Данные радиозондирования учитываются при разработке метеопрогнозов и метеосводок по аэродромам (METAR, TAF и TREND).

Имеющиеся в настоящее время технические средства радиозондирования атмосферы не позволяют авиационным потребителям с полным доверием относиться к данным, поступающим от аэрологической сети Росгидромета. Вместе с тем, использование достоверных данных о текущем и прогнозируемом состоянии атмосферы на всех высотах по маршруту полета ВС, позволило бы оптимизировать планирование полётов, существенно повысить экономичность, регулярность и, в не малой мере, безопасность полетов.

Таким образом, в настоящее время объективно существует **противоречие практического характера** между требованиями к качеству аэронавигационного и метеорологического обеспечения, проявляющееся в необходимости обеспечения экипажей ВС, диспетчеров УВД и авиационного персонала, проводящего подготовку ВС к полету, необходимой метеоинформацией на всех этапах полета ВС и достоверностью метеорологической информации, предоставляемой авиационными метеослужбами.

Определяющая роль в прогнозировании погоды для авиационных потребителей принадлежит радиозондированию атмосферы. Именно на основе данных радиозондирования атмосферы составляются метеосводки и метеопрогнозы на маршрутах и районах полетов ВС ГА, а при разработке метеопрогнозов по аэродрому используются данные радиозондирования атмосферы, в том числе и результаты конкретных выпусков радиозондов.

Вместе с тем, не смотря на важность данных радиозондирования атмосферы для разработки метеопрогнозов и метеосводок по маршрутам полетов и аэродромам в настоящее время на сети Росгидромета применяются в достаточно большом количестве устаревшие технические средства радиозондирования (АВК-1М), которые обладают не только низкой точностью измерения метеопараметров атмосферы, но и, главным образом, невозможностью применения их в любых условиях эксплуатации, в условиях различной помеховой обстановки. Недостатки связанные с невозможностью применения систем радиозондирования в любых условиях эксплуатации, в условиях различной помеховой обстановки свойственны и современным системам радиозондирования атмосферы радиолокационного типа (СРЗ РЛ), таким как МАРЛ-А, «Вектор-М», РАМ-2, а также современным системам радиозондирования атмосферы спутникового типа (СРЗ СТ) ПОЛЮС и ПОЛЕТ.

С другой стороны, можно утверждать, что применение отдельно как СРЗ РЛ, так и СРЗ СТ вряд ли позволит использовать весь заложенный в каждой из них потенциал. Существенно повысить достоверность данных радиозондирования можно путем комплексирования этих систем в единую систему радиозондирования комплексного типа (СРЗ КТ). Такие комплексные системы позволят в большей степени использовать возможности систем радиозондирования, устранить практически полностью возникающие «пробелы» в данных радиозондирования, радикально повысить помехоустойчивость и точность измерений метеопараметров атмосферы, что в конечном итоге повысит достоверность предоставляемой авиационным пользователям метеоинформации. Однако в настоящее время практически отсутствуют алгоритмы комплексной обработки информации, а имеющиеся алгоритмы обеспечивают комплексирование лишь на вторичном уровне, т.е. на уровне обработки выходных данных. Существенного же выигрыша в достоверности данных радиозондирования можно достичь лишь на уровне первичной комплексной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования атмосферы.

В связи с этим, возникает **противоречие научного характера** между необходимостью повышения достоверности данных радиозондирования путем комплексной обработки метеоинформации на уровне обработки радиосигналов и отсутствием алгоритмов комплексной первичной обработки метеоинформации.

На основе имеющихся противоречий можно сформулировать актуальную **научно-техническую задачу** повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы, предоставляемых авиационным пользователям в системе метеорологического обеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации. Особая актуальность решения данной задачи связана прежде всего с отсутствием в настоящее время на сети радиозондирования Росгидромета комплексных технических систем, позволяющих обеспечить достоверность данных о состоянии атмосферы в любых условиях эксплуатации и в любой помеховой обстановке.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в решение теоретических и прикладных задач повышения уровня безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации внесли Е.Ю. Барзилович, В.С. Шапкин, М.Ю. Чинючин, В.В. Воробьев, В.Г. Воробьев, Б.В. Зубков, Н.И. Плотников, С.Е. Прозоров, Р.В. Сакач, Н.Н. Смирнов и др.

Теоретические и прикладные вопросы метеорологического обеспечения полетов, разработки методов измерения параметров атмосферы излагаются в трудах О.Г. Богаткина, Э.А. Болелова, А.М. Баранова, В.Ф. Говердовского, А.И. Ермаковой, Ю.П. Переведенцева, В.Г. Глазунова, А.С. Зверева, В.Д. Рубцова, А.И. Логвина, Рудельсона Л.Е.

В области развития систем радиозондирования атмосферы имеются теоретические и практические исследования П.А. Молчанова, П.Ф. Зайчикова, О.В. Марфенко, В.Д. Решетова, Г.П. Трифонова, А.Ф. Кузенкова, А.Б. Калиновского, Н.З. Пинуса, М.В. Кречмера, М.Б. Фридзона, В.Э. Иванова, С.П. Ессяк и др.

Важно отметить перспективные разработки ООО «Аэроприбор», АО «Радий», теоретические работы ГосНИИ ГА, МГТУ ГА, РГГМУ в области повышения достоверности метеорологической информации.

Однако, задача обеспечения достоверности метеорологической информации еще далека от успешного решения. Несмотря на весьма перспективные теоретические исследования и технические разработки по-прежнему остаются до конца не решенными такие задачи как:

- определение пространственных координат радиозонда без пропусков и потери информации, особенно в условиях воздействия радиопомех как естественного, так и искусственного происхождения. Следует отметить важность и актуальность решения данной задачи, т.к. измерения, производимые радиозондом, должны быть привязаны к действительной точке их проведения;

- использование комплексных подходов к синтезу алгоритмов обработки информации о состоянии атмосферы.

Недостаточное внимание уделяется обеспечению достоверности данных радиозондирования с точки зрения использования ее при планировании и производстве полетов ВС, разработке метеопрогнозов по аэродромам и маршрутам полетов ВС ГА.

Целью диссертационной работы является повышение достоверности данных радиозондирования атмосферы за счет повышения точности и помехоустойчивости алгоритмов комплексной обработки информации о положении радиозонда в сложных условиях эксплуатации и в любой помеховой обстановке.

Поставленная цель достигается путем решения следующих основных задач:

1. Анализ влияния текущей и прогностической метеоинформации на регулярность и безопасность полетов ВС ГА.

2. Обоснование структуры комплексной системы радиозондирования атмосферы. Выбор метода комплексирования метеоинформации.

4. Синтез алгоритмов комплексной первичной обработки информации радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования атмосферы.

5. Разработка методики и оценка достоверности (точности и помехоустойчивости) данных радиозондирования при использовании разработанных алгоритмов комплексной первичной обработки метеоинформации.

Объектом исследования являются комплексные системы радиозондирования атмосферы.

Предметом исследования являются алгоритмы комплексной первичной обработки метеоинформации в комплексных системах радиозондирования атмосферы.

Лично автором:

- обоснована необходимость повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы для обеспечения авиационных потребителей качественной метеоинформацией, с учетом сложных природно-географических условий и ухудшенной помеховой обстановки;

- обоснована структура комплексной системы радиозондирования атмосферы, основанная на первичной обработке радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования;

- разработаны оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования, обеспечивающие высокую достоверность информации о пространственном положении радиозонда;

- разработана структура модуля комплексной обработки информации, реализующего квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования;

– разработана методика оценки точности и помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования, проведена оценка точности и помехоустойчивости текущего положения радиозонда.

Научная новизна работы состоит в развитии теоретических методов марковской теории оценивания случайных процессов применительно к метеорологическому обеспечению полетов. В настоящей работе впервые разработаны:

1. Структура комплексной системы радиозондирования атмосферы, основанная на первичной обработке радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования.

2. Оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки информации для комплексной системы радиозондирования атмосферы, обеспечивающие высокую достоверность данных радиозондирования атмосферы.

3. Структура модуля комплексной обработки информации, реализующего квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

4. Методика оценки точности и помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования. На основе разработанной методики получены результаты оценки точности и помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма о текущем положении радиозонда и результаты оценки критичности квазиоптимального алгоритма к значению параметров математических моделей погрешностей измерений текущего положения радиозонда.

Практическая значимость работы состоит в том, что внедрение ее результатов в разработку существующих и перспективных систем радиозондирования атмосферы позволят:

- повысить качество предоставляемой авиационным пользователям метеоинформации на этапах планирования и подготовки к вылету, повысить степень осведомленности экипажей воздушных судов и диспетчеров управления воздушным движением о метеобстановке по маршруту полета;

- использовать предложенную структуру комплексной системы радиозондирования атмосферы для модернизации отечественной аэрологической сети;

- использовать результаты радиозондирования атмосферы для валидации метеоинформации, получаемой от аэродромных источников метеоинформации.

Самостоятельную практическую значимость имеют квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

Достоверность научных результатов основана на:

- детальном анализе влияния на безопасность и регулярность полетов текущей и прогностической метеоинформации, анализе методик расчета риска предстоящего полета и методик расчета потребного запаса топлива, с учетом метеорологических условий по маршруту полета;

- корректном использовании известных теоретических методов марковской теории оценивания случайных процессов, теории вероятностей и математической статистики, теории статистических решений, теории инвариантности, методов математического моделирования;

- на результатах натурных сравнительных исследований радиолокационной и спутниковой систем радиозондирования атмосферы.

На защиту выносятся:

1. Структура комплексной системы радиозондирования атмосферы, основанная на первичной обработке радиосигналов радиолокационных и спутниковых систем радиозондирования.

2. Оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки информации для комплексной системы радиозондирования атмосферы, обеспечивающие высокую достоверность данных радиозондирования.

3. Структура модуля комплексной обработки информации, реализующего алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

4. Методика и результаты оценки уровня достоверности текущих данных радиозондирования атмосферы на выходе комплексной системы радиозондирования атмосферы.

Реализация результатов. Основные результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Аэроприбор», что подтверждено соответствующим актом. Полученные теоретические результаты работы приняты к использованию в учебном процессе в МГТУ ГА.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных и всероссийских конференциях в период 2015-2019 гг., XX заседании ККА МАК в 2019 г., на научно-технических семинарах кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» МГТУ ГА в 2016-2022 гг.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 18 (117с.) печатных работ, в том числе: 7 (59 с.) научных статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ; 8 научных статей и тезисов, опубликованных в других изданиях; получены - 1 патент (рег. №92204, 2010 г.); 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (рег. №2020618441, 2020 г.). Материалы диссертационного исследования отражены в отчете НИР («Исследование возможности использования алгоритмов комплексной обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем GPS, ГЛОНАСС и GALILEO в системах радиозондирования атмосферы». Отчет по НИР №АААА-Б18-2180123910041-3, 2017 г.).

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложений и списка литературы, насчитывающего 173 наименования. Общий объем диссертации составляет 176 стр., включает 55 рисунков, 14 таблиц, 5 приложений на 37 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия практического и научного характера в области метеорологического обеспечения полетов гражданской авиации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе на основании статистических данных ФГУП «Авиаметтелеком Росгидромета» проведен анализ безопасности и регулярности полетов ВС ГА с учетом текущей и прогностической метеоинформации, проанализированы методики расчета потребного запаса топлива с учетом реальных метеорологических условий на маршруте полета, показана роль данных радиозондирования атмосферы в системе метеорологического обеспечения полетов ВС ГА. В первой главе обоснована необходимость комплексирования систем радиозондирования различных типов, принцип работы которых основан на различных способах сопровождения радиозондов в атмосфере.

ФАП «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» (ФАП-60) определяет, что метеорологическая информация предоставляется в виде сводок, прогнозов и других сообщений. Авиационные метеосводки выпускаются в виде: метеосводок по аэродрому (METAR) для распространения за пределами аэродрома; специальных метеосводок (SPECI). Авиационные метеопрогнозы включают в себя: метеопрогнозы по аэродрому (TAF) и метеопрогнозы погоды для посадки (TREND); метеопрогнозы для взлета; зональные метеопрогнозы для полетов на малых высотах (GAMET). Кроме этого, авиационные метеопрогнозы включают: прогнозы возникновения опасных метеоявлений (ОМЯ) на малых высотах (AIRMET); прогнозы возникновения ОМЯ по маршруту полета (SIGMET). Все перечисленные метеосводки и метеопрогнозы используются для передачи метеоинформации во всех государствах-членах ИКАО.

Проведенный во второй главе факторный анализ безопасности полетов показал, что по причинам недостатков в метеобеспечении полетов (МО) происходят до 9% АП (см. рис.1).

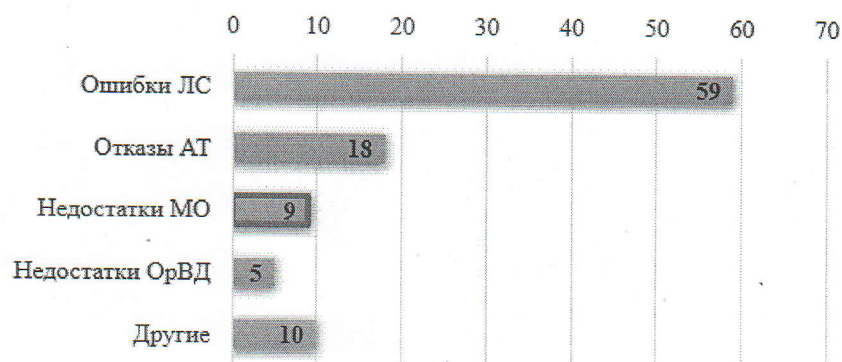


Рисунок 1 – Факторный анализ АП

Недостатки в метеобеспечении (МО) проявляются в низкой оправдываемости метеопрогнозов, недостоверных метеосводках о фактической погоде и опасных метеоявлениях (ОМЯ). Анализ показывает, что более половины АП связаны с неоправдавшимся метеопрогнозом (55%), а более чем в трети АП (33%) экипаж за метеоинформацией не обращался, что может свидетельствовать, в том числе и о низком доверии экипажей ВС к достоверности метеоинформации.

Отсутствие достоверной метеоинформации подчас является причиной серьезных авиационных катастроф. Приведем в качестве примера две авиационные катастрофы, произошедшие по причине низкой достоверности метеоинформации.

Самолет Ту-154М выполнял заход на посадку на аэродром Иркутск (2001 г.). При заходе на посадку Ту-154М потерял управление и упал на землю. Члены экипажа ВС и пассажиры погибли. Проведенный детальный анализ этой катастрофы показал, что на высоте 900 м Ту-154М при развороте на глиссаду пересек фронтальную поверхность мощного холодного фронта, который прошел Иркутск. Пересекая холодный фронт Ту-154М попал в мощное струйное течение низкого уровня со скоростью на оси 20...25 м/с. Экипаж в таких условиях был практически не в состоянии справиться с управлением самолетом. Очевидно, что ни экипаж ВС, ни диспетчер УВД были не осведомлены о фактических МУ, что и привело к катастрофе.

Другим примером может служить авиакатастрофа в районе г. Донецка в 2006 г. Полет самолета Ту-154 проходил в верхней части мощных кучево-дождевых облаков (Cb) на высоте 11860 м. Как установило расследование катастрофы произошел резкий «подброс» самолета на 900 м вверх, и затем последующее сваливание в штопор и падение на землю. Члены экипажа и пассажиры погибли. Экипаж принимал решение с учетом данных метеопрогноза в котором содержалось предупреждение о облачности Cb на маршруте, высоте верхней границы облаков (ВГО) – 8000 м, с прогнозом ее развития до 12000 м. Однако, фактически на момент катастрофы в данном районе наблюдалась суперячейковая конвекция в верхней части сверхмощного Cb, «пробившего» тропопаузу, а высота верхней границы облаков превысила 14000 м.

Рассмотренные выше катастрофы можно было бы предотвратить, в случае наличия у экипажа ВС и диспетчера УВД достоверной метеоинформации о метеобстановке по маршруту полета ВС.

Как показывают статистические данные причиной 8,9% задержанных авиарейсов (см. рис.2) является неопределенность погоды на маршруте (т.е., по сути, отсутствие достоверных данных метеонаблюдений). Задержки авиарейсов приводят к нарушению регулярности полетов. Кроме этого, по официальным данным ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», по причине неоправдавшихся метеопрогнозов совершают вынужденные посадки десятки ВС.

Последствия нарушений регулярности полетов могут быть существенными. В частности: для авиакомпаний задержки авиарейсов, посадки на запасные аэродромы грозят немалыми финансовыми потерями и репутационным рисками; для аэропортов нарушается

или усложняется процесс подготовки ВС к вылету и прием прибывающих ВС; для пассажиров очевидны моральные и материальные издержки.

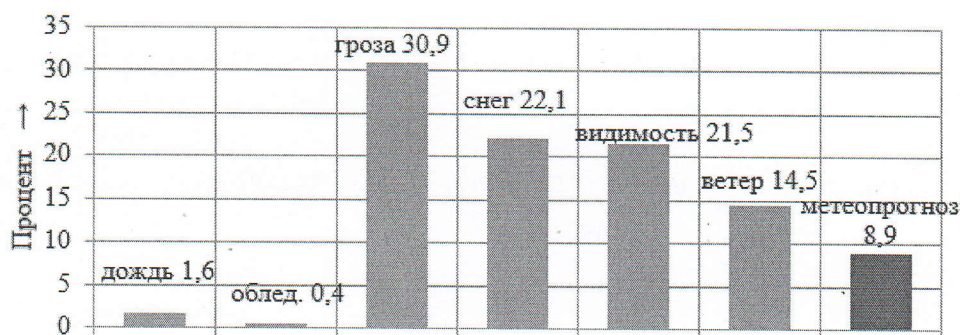


Рисунок 2 – Результаты анализа нарушений регулярности полетов ВС по метеоусловиям

Для разработки авиационных прогнозов погоды требуется достаточно обширный объем исходной информации. Кроме данных от аэродромных метеосистем метеоролог-синоптик использует в своей работе следующие исходные данные, поступающие по каналам системы передачи информации Росгидромета: карты абсолютной барической топографии АТ-850 для зоны влета и посадки ВС и АТ-200 для маршрутов полетов ВС; карты относительной барической топографии ОТ-500/1000; карты тропопаузы; карты максимального ветра; приземные синоптические и кольцевые карты погоды; прогностические карты уровней 400, 300, 200 гПа.

Метеоролог-синоптик может использовать данные метеорологических спутников и метеорологических радиолокаторов (МРЛ) сети Росгидромета, а также «сырые» данные радиозондирования от СРЗ, находящихся вблизи аэродрома и по маршруту полета ВС.

Проведенные в диссертации расчеты показали, что ошибка прогноза параметров ветра оказывает существенное влияние на расчет ПЗАТ, в частности, на дополнительную заправку, компенсирующую влияние ветра на маршруте полета. В пределах допустимой по ФАП-60 точности прогноза:

для скорости ветра

- значение ошибки в заправке топливом изменяется в пределах примерно ± 230 кг (для скорости ветра 72 км/ч) и ± 380 кг (для скорости ветра 137 км/ч);

для направления ветра

- значение ошибки в заправке топливом изменяется в пределах примерно ± 1600 кг (для скорости ветра 72 км/ч) и ± 3200 (для скорости ветра 137 км/ч).

Ошибка прогноза температуры на эшелоне полета ВС не оказывает существенного влияния на расчет дополнительной заправки топливом. В пределах допустимой по ФАП-60 точности прогноза температуры значение ошибки в заправке топливом изменяется в пределах примерно $\pm (50-60)$ кг. Однако, не следует исключать тот факт, что данные радиозондирования могут содержать ошибки в несколько градусов, а также грубые ошибки аэрологов при составлении аэрологических телеграмм. В ряде случаев эти ошибки могут составлять до десятка градусов.

Ошибки в расчете ПЗАТ могут иметь следующие последствия: увеличение дополнительного компенсационного количества топлива, которое приводит к снижению массы коммерческой нагрузки ВС; уменьшение дополнительного компенсационного количества топлива, которое может привести к необходимости аварийной посадки на запасной аэродром или любой другой аэродром. Это приводит к снижению уровня безопасности и регулярности полетов.

Проведенный анализ риска предстоящего полета по усовершенствованной методике FRAT, для авиарейсов закончившихся АП, подтвердил высокие значения риска по причине недостатков в метеобеспечении полетов. Все это подтверждает актуальность научно-технической задачи повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы,

предоставляемых авиационным пользователям в системе метеорологического обеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации.

Одной из узловых причин достаточно низкой достоверности метеоинформации является отсутствие в настоящее время на сети радиозондирования Ростгидромета комплексных технических систем, позволяющих обеспечить достоверность данных о состоянии атмосферы в любых условиях эксплуатации и в любой помеховой обстановке.

Во второй главе разработан технический облик комплексной системы радиозондирования атмосферы. Технический облик МРЛК БАЗ включает в себя основные характеристики, уровни и режимы обработки информации, а также структуру системы комплексной обработки данных радиозондирования атмосферы.

Основными принципами построения СРЗ КТ являются: комплексность и модульность системы.

Принцип комплексности заключается в совместной обработке данных радиозондирования от СРЗ РЛ и СРЗ СТ и имеет теоретическую базу, основанную на марковской теории оценивания случайных процессов (МТОСП). Методы МТОСП при разработке алгоритмов комплексной обработки информации (АКОИ) во многом обусловлены тем, что марковские методы позволяют реализовать оптимальное комплексирование измерителей на уровне первичной обработки информации (обработка радиосигналов), что в итоге обеспечивает высокую помехоустойчивость систем, их точность и надежность.

С технической точки зрения принцип комплексности должен обеспечивать высокую точность, помехоустойчивость и надежность передачи информации от радиозонда (РЗ) на комплексную базовую станцию слежения (КБСС). Практическая реализация СРЗ КТ связана с установкой на РЗ ретранслятора радиосигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, в целях их последующей обработки в вычислителе КБСС. Таким образом, установка на борт РЗ ретранслятора радиосигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS позволит проводить решение навигационной задачи, т.е. задачи определения координат РЗ, в вычислителе КБСС.

На рис. 3 представлена структурная схема СРЗ КТ. В состав СРЗ КТ входит комплексная базовая станция слежения (КБСС) и РЗ. В состав КБСС входят: ВЧ-тракты радиоканалов РК1 (403 МГц) и РК2 (1680 МГц); модули выделения сигналов телеметрии МВТИ РК1 и МВТИ РК2; модуль первичной комплексной обработки информации о пространственных координатах РЗ (МПКОИ ПК), обеспечивающий решения задачи помехоустойчивого определения пространственных координат РЗ; блок формирования метеоинформации (БФМИ), обеспечивающий решение задачи определения параметров ветра и формирование выходной метеоинформации (аэрологической телеграммы).

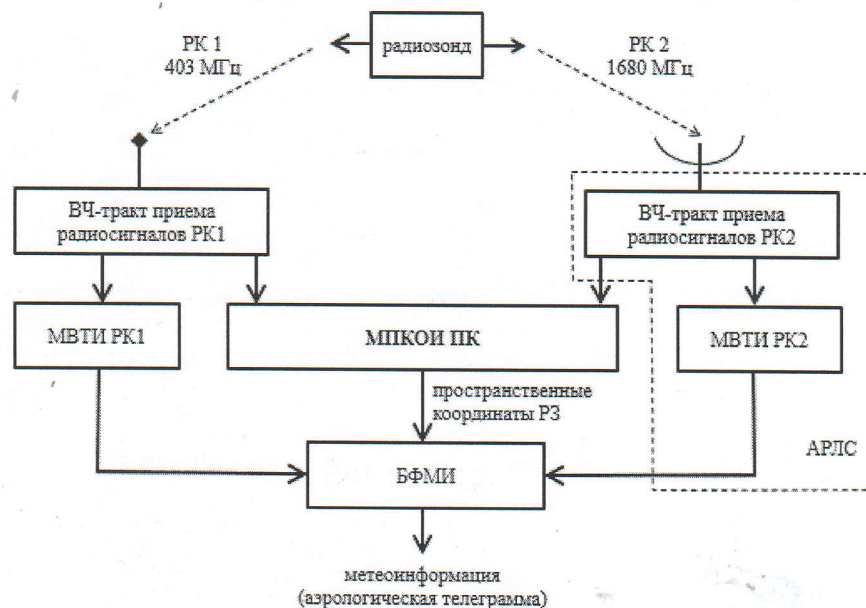


Рисунок 3 – Структурная схема СРЗ КТ

Особенностью схемы является то, что: канал РК1 обеспечивает передачу ретранслированных сигналов СРНС от РЗ. В КБСС осуществляется первичная обработка ретранслируемых сигналов СРНС и выдача их в МПКОИ ПК. Кроме этого, в МВТИ1 производится выделение информации о температуре и относительной влажности воздуха и выдача ее в БФМИ; канал РК2 обеспечивает передачу на РЗ запросных сигналов от АРЛС и ответных сигналов РЗ. КБСС производит первичную обработку ответных сигналов РЗ и выдачу их в МПКОИ ПК. МВТИ2 осуществляет выделение информации о температуре и относительной влажности из ответного сигнала РЗ и выдачу ее в БФМИ.

Объединение СРЗ РЛ и СРЗ СТ в единую СРЗ КТ, по сути, осуществляется в МПКОИ ПК и БФМИ. Задачей МПКОИ ПК является первичная комплексная обработка радиосигналов по каналам РК1 и РК2 в целях определения координат РЗ. В БФМИ по данным о пространственных координат РЗ вычисляются направление и скорость ветра, происходит объединение полученных данных с измерениями температуры и влажности от МВТИ и формирование выходной аэрологической телеграммы.

Сложность и многообразие взаимосвязей между элементами СРЗ КТ, во многом определяют архитектуру КБСС. Уровни обработки информации в КБСС должны учитывать это и быть разделены на первичный, вторичный и третичный уровни. Уровни обработки информации представлена на рис. 4.

Первичный уровень обработки, реализуется в РЗ. Основными функциями этого уровня является формирование ответных радиосигналов по запросам АРЛС и ретранслированных радиосигналов СРНС и измерение температуры и влажности.

Основными функциями вторичного уровня обработки информации являются: первичная комплексная обработка радиосигналов СРНС и АРЛС с целью определения пространственных координат РЗ; выделение данных измерений температуры и влажности, передаваемых по РК1 и РК2.

Функциями третичного уровня обработки информации являются: вычисление параметров ветра; формирование выходной аэрологической телеграммы; индикация и архивирование данных зондирования.

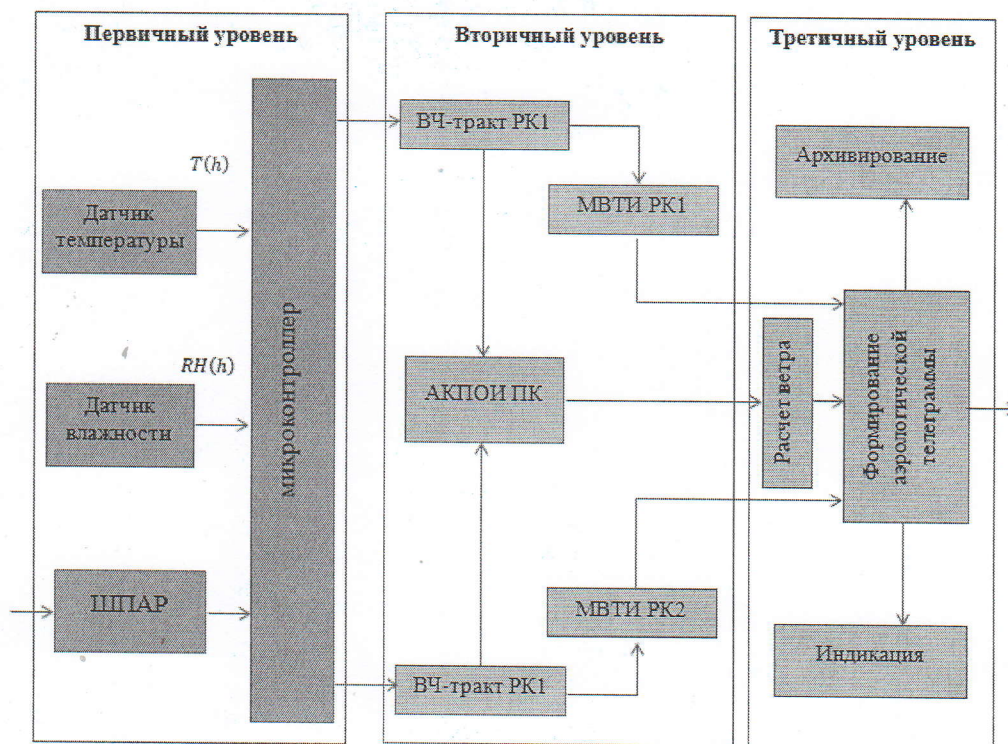


Рисунок 4 - Уровни обработки информации в СРЗ КТ

Основным режимом работы СРЗ КТ является режим комплексной обработки данных радиозондирования. При возникновении отказов или сильных помеховых воздействиях на СРЗ КТ КБСС должна обеспечивать переход на резервные режимы работы, а именно: режим

работы по информации от РК1; режим работы по информации от РК2.

Во второй главе сформулированы основные технические требования к СРЗ КТ.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда.

В рамках МТОСП выполнена постановка задачи синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда. Сформированы математические модели полезных сигналов и помех, информационных и сопутствующих процессов. С учетом сформированных математических моделей вектор состояния, подлежащий оцениванию, имеет вид:

$$\mathbf{X}^T = [x, y, z, V_x, V_y, V_z, a_x, a_y, a_z, \varphi_p, \varphi_{pl}, \Delta\omega_p, \Delta\omega_{pl}, \delta d], \quad (1)$$

где: x, y, z - пространственные координаты РЗ; $V_x, V_y, V_z, a_x, a_y, a_z$ - составляющие скорости и ускорения РЗ; φ_p, φ_{pl} - случайный набег фазы ретранслированного сигнала СРНС и сигнала АРЛС; $\Delta\omega_p, \Delta\omega_{pl}$ - уход частоты ретранслированного сигнала СРНС и сигнала АРЛС; δd - приращение дальности.

Уравнение, описывающее динамику вектора состояния в векторно-матричной форме, имеет вид:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{C}\mathbf{U}(t) + \mathbf{G}\mathbf{N}(t), \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (2)$$

где: $\mathbf{N}(t)$ - вектор формирующих белых гауссовских шумов; $\mathbf{U}(t)$ - вектор управления; $\mathbf{F}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{G}$ - постоянные матрицы полностью определяемые выражениями математическими моделями.

Субвектор наблюдения ретранслированных сигналов СРНС от всех видимых НКА $\mathbf{\Xi}_p(t)$ и наблюдение от АРЛС составляют вектор наблюдения:

$$\mathbf{\Xi}(t) = [\mathbf{\Xi}_p(t), \xi_{pl}(t)]^T. \quad (3)$$

Вектор (3) связан с вектором состояния (1) выражением:

$$\mathbf{\Xi}(t) = \mathbf{H}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}_\xi(t), \quad (4)$$

где: $\mathbf{H}$ - известная постоянная матрица наблюдения; $\mathbf{N}_\xi(t)$ - вектор шумов наблюдения.

В качестве критерия оптимизации целесообразно использовать критерий минимума апостериорного среднего риска при квадратичной функции потерь:

$$\mathbf{X}^*(t) = \tilde{\mathbf{X}}(t) : \min_{\tilde{\mathbf{X}}} \left\{ \int c(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) \varpi(t, \mathbf{X}) d\mathbf{X} \right\}, \quad (5)$$

где: $c(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) = (\mathbf{X} - \tilde{\mathbf{X}})^T \mathbf{B} (\mathbf{X} - \tilde{\mathbf{X}})$ - квадратичная функция потерь; $\mathbf{B}$ - заданная неотрицательно определенная матрица; $\varpi(t, \mathbf{X}) \propto p(t, \mathbf{X} | \mathbf{\Xi}_{t_0}^t)$ - апостериорная плотность вероятности $\mathbf{X}(t)$; $\mathbf{\Xi}_{t_0}^t = \{\mathbf{\Xi}(\tau) : \tau \in (t_0, t)\}$ - реализация вектора наблюдения $\mathbf{\Xi}(t)$ на интервале $\tau \in [t_0, t]$; $\tilde{\mathbf{X}}(t)$ - оценка вектора состояния.

Оптимальная оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$ может быть найдена на основании апостериорной плотности вероятности $\varpi(t, \mathbf{X}_k) = p(t, \mathbf{X}_k | \xi_{p1}^t, \xi_{p2}^t, \dots, \xi_{pl}^t, \xi_{pl}^t)$, удовлетворяющей уравнению Стратоновича.

Анализируя модели радиосигналов АРЛС и ретранслированные сигналы СРНС на малых интервалах времени можно прийти к выводу, что возможно представление модели вектора состояния в виде квазислучайного процесса. Использование модели вектора состояния в виде квазислучайного процесса позволяет обоснованно перейти от нелинейной системы дифференциальных уравнений к системе линейных уравнений с постоянными коэффициентами.

Это открывает возможности аналитического решения уравнения Стратоновича. С учетом сказанного апостериорная плотность вероятности удовлетворяет уравнению Стратоновича:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varpi(t, \mathbf{X}_k) = \varpi(t, \mathbf{X}_k) \left\{ F(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) - F_X(t) \right\}, \quad (6)$$

где:

$$\begin{aligned} F(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) &= N_p^{-1} \left\{ 2\xi_p(t) s_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) - \right. \\ &\quad \left. - s_p^2(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) \right\} + N_{pl}^{-1} \left\{ 2\xi_{pl}(t) s_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) - s_{pl}^2(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) \right\} = \\ &= F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) + F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}); \\ F_X(t) &= \int \left(F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) + F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) \right) \varpi(t, \mathbf{X}_k) d\mathbf{X}_k. \end{aligned}$$

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$\begin{aligned} \varpi(t+T, \mathbf{X}_k) &= C_1 \varpi(t_k, \mathbf{X}_k) \times \\ &\times \exp \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\}) d\tau \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где: C_1 – нормировочная постоянная; t_k – момент начала накопления сигнала; T – время накопления сигнала.

При использовании гауссовского приближения апостериорное распределение $\varpi(t+T, \mathbf{X}_k)$ имеет вид:

$$\varpi(t+T, \mathbf{X}_k) = N \left\{ \mathbf{X} - \mathbf{X}^*, \mathbf{R}(t_k) \right\}, \quad (8)$$

где $\mathbf{R}(t_k)$ – ковариационная матрица апостериорных ошибок оценивания компонент вектора состояния.

Матрица $\mathbf{R}(t_k)$ может быть получена из уравнения:

$$\begin{aligned} &\int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\})}{\partial \mathbf{X}_k} \right] d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k)\})}{\partial \mathbf{X}_k} \right] d\tau - \\ &- \mathbf{R}^{-1}(t_k) [\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_k^*] = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Раскладывая (9) в ряд Тейлора в окрестности точки $\mathbf{X}_k^*$ и учитывая первые два члена разложения, получим квазиоптимальный алгоритм первичной комплексной обработки ретранслированных сигналов СРНС и сигналов АРЛС:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1}) &= \mathbf{X}_k^* + \mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) \times \\ &\times \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right] d\tau + \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{pl}(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right] d\tau \right\}, \\ \mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) &= \left\{ \mathbf{R}^{-1}(t_k) - \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right) \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_p(t, L\{f(t, \mathbf{X}_k^*)\})}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right] d\tau + \right. \right. \end{aligned} \quad (10)$$

$$+ \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_{пл} \left(t, L \left\{ f(t, \mathbf{X}_k^*) \right\} \right)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right]^T d\tau \Bigg\}^{-1}. \quad (11)$$

Оценка $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ определяется выражением:

$$\mathbf{X}^*(t_{k+1}) = \Phi_{XX} \mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1}) + \Psi \mathbf{U}(t_k), \quad (12)$$

Входящая в (11) матрица апостериорных вторых центральных моментов второго порядка $\mathbf{R}(t_{k+1})$ определяется выражением:

$$\mathbf{R}(t_{k+1}) = \Phi_{XX} \mathbf{R}(t_k | t_{k+1}) \Phi_{XX}^T + \mathbf{B}_{XX}, \quad (13)$$

где: $\mathbf{B}_{XX} = \Gamma_X \Gamma_X^T$, Γ_X – известная матрица возмущений, определяемая на основе матрицы $\mathbf{G}$; Ψ – известная матрица управления, определяемая на основе матрицы $\mathbf{C}$; Φ_{XX} – известная фундаментальная матрица.

В качестве начальных значений в выражениях (12) и (13) используется оценка вектора состояния, $\mathbf{X}^*(t_k | t_{k+1})$ и матрица апостериорных вторых центральных моментов второго порядка $\mathbf{R}(t_k | t_{k+1})$, которые получены на основании наблюдений в соответствии с (10) и (11).

Выражения (10)-(13) представляют собой квазиоптимальный алгоритм комплексной первичной обработки информации о пространственном положении РЗ. На основе полученного алгоритма разработана структурная схема модуля комплексной первичной обработки информации о пространственных координатах радиозонда (МПКОИ ПК). Особенностью МПКОИ ПК является наличие обратных перекрестных связей, которые в условиях сложной помеховой обстановки, когда высока вероятность срыва слежения за параметрами, временного пропадания сигналов и т.п., позволяют заметно повысить достоверность данных радиозондирования.

В четвертой главе изложены разработанные методики и результаты оценки помехоустойчивости и точности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда. На рис.5 и рис.6 приведены Фактические характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки в районе зондирования.

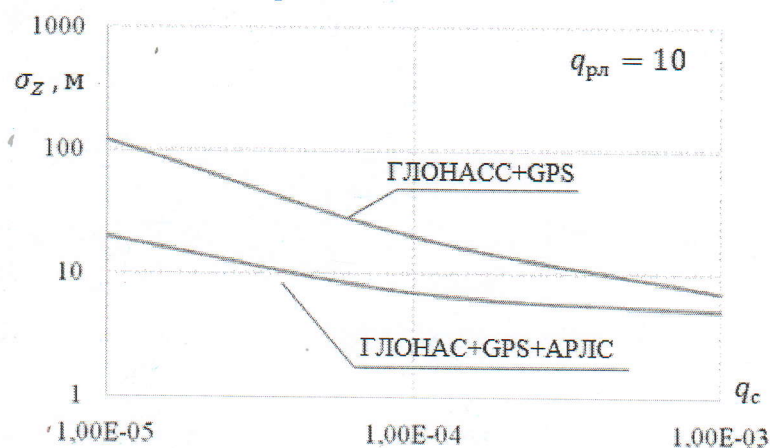


Рисунок 5 – Фактические характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для СРНС

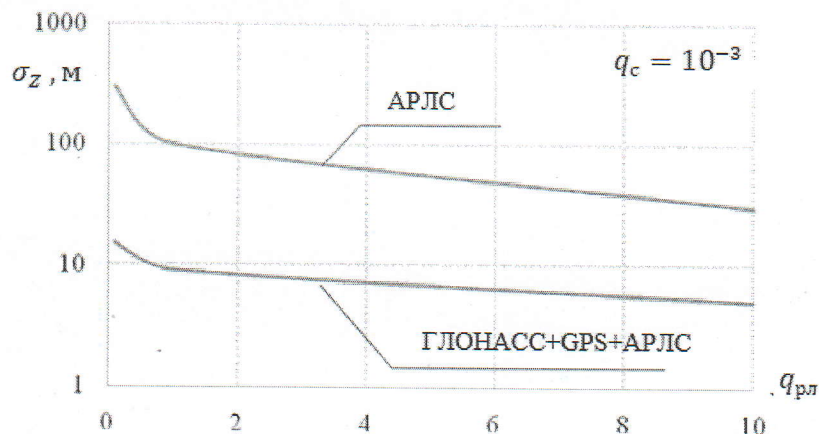


Рисунок 6 – Фактические характеристики помехоустойчивости и точности при изменении помеховой обстановки для АРЛС

Результаты моделирования в целом показывают, что выигрыш от комплексирования наблюдается при малых отношениях сигнал/шум, т.е. в условиях действия помех. Для штатной помеховой обстановки значения СКО для комплексного и не комплексного варианта использования СРЗ КТ практически совпадают. Расчеты показали, что для значений отношения сигнал/шум менее $q_c = 10^{-5}$ в не комплексном варианте использования МКОИ фактически наступает срыв слежения за радиозондом, чего не происходит при комплексной обработке радиосигналов АРЛС (РК-2) и СРНС (РК-1). При использовании комплексных алгоритмов наблюдается лишь ухудшение качества функционирования МПКОИ ПК (СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается примерно до 20 м).

Для АРЛС (РК-2) в штатной помеховой обстановке значения СКО для комплексного и не комплексного варианта использования отличаются на величину около 20 м. По сравнению со сложной для АРЛС помеховой обстановки эта величина не большая. Существенный выигрыш от применения комплексных алгоритмов наблюдается, как и следовало ожидать, при уменьшении значений отношения сигнал/шум $q_{рл}$. В не комплексном варианте уменьшение отношения $q_{рл}$ приводит к значительному росту СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда вплоть до срыва слежения за радиозондом. При использовании комплексных алгоритмов, при штатной помеховой обстановке для СРНС, наблюдается лишь ухудшение качества функционирования МПКОИ ПК, при этом СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается до 20 м.

Таким образом, использование алгоритмов комплексной первичной обработки радиосигналов АРЛС и СРНС позволяет обеспечить в условиях сложной помеховой обстановки решение задачи надежного сопровождения радиозонда. Это обстоятельство является существенным фактором повышения помехоустойчивости всей системы радиозондирования атмосферы и возможности ее применения в условиях сложной помеховой обстановки, как при воздействии естественных, так и, возможно, искусственных радиопомех.

В четвертой главе проведена оценка степени критичности квазиоптимального алгоритма комплексной первичной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений. Проведенный анализ степени критичности МПКОИ ПК к изменению параметров моделей полезных сигналов и моделей информационных и сопутствующих процессов показал, что отклонения параметров этих моделей от расчетных значений не приводят к существенному ухудшению качества оценивания компонент вектора состояния. Это еще раз подтверждает достоинства комплексной первичной обработки информации и возможность практической реализации комплексной системы радиозондирования.

Кроме этого, в четвертой главе представлены рекомендации по размещению и применению СРЗ КТ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для воздушного транспорта Российской Федерации научно-технической задачи повышения достоверности данных радиозондирования атмосферы, предоставляемых авиационным пользователям в системе метеорологического обеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации.

Решение научно-технической задачи опиралось на проведенный автором и представленный в работе проблемный анализ состояния метеорологического обеспечения полетов и состояния аэрологической сети Росгидромета, позволивший выявить следующие противоречия:

- противоречие практического характера между требованиями к качеству аэронавигационного и метеорологического обеспечения, проявляющееся в необходимости обеспечения экипажей ВС, диспетчеров УВД и авиационного персонала, проводящего подготовку ВС к полету, необходимой метеоинформацией на всех этапах полета ВС и достоверностью метеорологической информации, предоставляемой авиационными метеослужбами;

- противоречие научного характера между необходимостью повышения достоверности данных радиозондирования путем комплексной обработки метеоинформации на уровне обработки радиосигналов и отсутствием алгоритмов комплексной первичной обработки метеоинформации.

В результате решения научно-технической задачи были получены следующие основные результаты и выводы:

1. Проведен анализ существующих и перспективных методов радиозондирования атмосферы, на основании которого установлена степень влияния данных радиозондирования на безопасность и регулярность полетов воздушных судов.

Радиозондирование атмосферы, обладая максимальной всепогодностью, высокой разрешающей способностью и информативностью, не всегда обладает требуемой достоверностью получаемых метеоданных о состоянии тропосферы и нижней стратосферы, а в ряде случаев отдельные данные радиозондирования могут быть не приемлемы для разработки качественных и достоверных метеопрогнозов.

Причина кроется в том, что современные системы радиозондирования (МАРЛ-А(Т) и ВЕКТОР-М и др.), эксплуатируемые на аэрологической сети Росгидромета, обладают рядом недостатков, основными из которых являются: потеря данных радиозондирования из-за срывов слежения за радиозондом и низкая помехоустойчивость. Системы радиозондирования спутникового типа пока не являются массовым и не могут коренным образом изменить в положительном направлении ситуацию в аэрологическом зондировании атмосферы. Кроме этого, спутниковые системы также обладают достаточно низкой помехоустойчивостью.

Коренным образом улучшить качество функционирования систем радиозондирования можно выполнив их интеграцию на базе современных теорий комплексирования информации.

2. Теоретически разработана и обоснована структура перспективной комплексной системы радиозондирования атмосферы. Ее отличительными особенностями являются:

- установка на борт радиозонда ретранслятора навигационных сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, в целях их последующей обработки в навигационном вычислителе комплексной базовой станции слежения. Таким образом, решение навигационной задачи переносится с борта радиозонда в вычислитель комплексной базовой станции слежения;

- построенные на основе марковской теории комплексирования информации алгоритмы комплексной первичной обработки сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS, ретранслированных радиозондом совместно с данными о пространственных координатах радиозонда, полученными аэрологической радиолокационной станцией.

Задача синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS решалась в интересах:

- уменьшения вероятности срыва при слежении за радиозондом в атмосфере;
- обеспечения помехоустойчивости системы радиозондирования при ее работе в условиях сложной помеховой обстановки и при малых отношениях сигнал/шум на входах приемных устройств базовой станции слежения;
- обеспечения требуемой точности определения пространственных координат радиозонда.

Все сказанное позволяет повысить достоверность данных радиозондирования в интересах метеобеспечения полетов воздушных судов гражданской авиации.

3. Методом имитационного моделирования в соответствии с разработанной методикой проведен расчет потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости комплексной системы радиозондирования.

Результаты расчетов позволяют утверждать, что в условиях нормальной помеховой обстановки для СРНС и АРЛС выигрыша от комплексирования по точности определения высоты и скорости подъема радиозонда практически нет. В условиях сложной помеховой обстановки выигрыш от комплексирования становится явным. Установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ увеличивается примерно в 2,5 раза и составляет 2,5 м, а при $q_c = 10^{-5}$ – увеличивается примерно в 3 раза и составляет около 3 м. При этом АРЛС работает в штатном режиме ($q_{рл} = 10$). В не комплексном варианте работы системы, т.е. при отсутствии сигналов СРНС, установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда при $q_c = 10^{-4}$ составляет 20 м, а для $q_c = 10^{-5}$ – 35 м. В не комплексном режиме использования АРЛС установившееся значение СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда составляет 70 м (для $q_{рл} = 1$) и около 20 м ($q_{рл} = 10$).

4. Результаты расчета фактически достижимых характеристик точности и помехоустойчивости системы радиозондирования подтверждают вывод о преимуществе комплексной обработки информации в условиях сложной и ухудшенной помеховой обстановки в районе проведения радиозондирования.

Расчеты показали, что для значений отношения сигнал/шум менее $q_c = 10^{-5}$ в некомплексном варианте системы фактически наступает срыв слежения за радиозондом, чего не происходит при комплексной обработке радиосигналов АРЛС и СРНС. При использовании комплексных алгоритмов наблюдается лишь ухудшение качества функционирования системы радиозондирования (СКО ошибки оценивания высоты подъема радиозонда увеличивается примерно до 20 м).

5. Оценка степени критичности синтезированных алгоритмов первичной комплексной обработки информации о пространственном положении радиозонда к отклонению параметров моделей оцениваемых процессов от расчетных значений позволяет утверждать, что отклонения параметров этих моделей от расчетных значений не приводят к существенному ухудшению качества данных радиозондирования. Это еще раз подтверждает достоинства комплексной обработки информации и возможность практической реализации комплексных систем радиозондирования атмосферы.

6. Выявленные в ходе исследований достоинства комплексной системы радиозондирования позволяют обеспечить достоверность предоставляемой авиационным пользователям метеоинформации и, тем самым, повысить качество метеобеспечения полетов.

Результаты работы также позволяют:

- использовать комплексную систему радиозондирования атмосферы для модернизации аэрологической сети Росгидромета;
- использовать данные комплексной системы радиозондирования как эталонные при валидации данных других измерителей метеопараметров атмосферы, прежде всего, радиолокационных метеорологических комплексов, микроволновых профиломеров, лазерных метеорологических систем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ (по транспорту):

1. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б., Кораблев Ю.Н. Динамические погрешности датчиков температуры при радиозондировании атмосферы. // Научный вестник МГТУ ГА, том 20, №5, 2017. С.88-97. 10стр.
2. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М. Постановка задачи синтеза алгоритма комплексной обработки информации о пространственном положении аэрологического радиозонда. // Научный вестник МГТУ ГА, №226(4), 2016. С.229-239. 11 стр.
3. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М. Алгоритм комплексной обработки информации о пространственном положении аэрологического радиозонда. // Научный вестник МГТУ ГА, том 19, №5, 2016. С.124-135. 12 стр.
4. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б. Повышение надежности системы радиозондирования атмосферы за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда в полете. // Научный вестник МГТУ ГА, №222(12), 2015. С.114-119. 6 стр.
5. Ермошенко Ю.М. Модель вектора состояния в виде квазислучайного процесса для комплексного аэрологического радиозондирования атмосферы. // Известия высших учебных заведений. Электроника, том 24, №1, 2019. с.72-78. 7 стр.
6. Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б. К методике метрологической аттестации системы сетевого аэрологического радиозондирования атмосферы. Научный вестник МГТУ ГА, № 222(12), М. 2015г, с 133 – 137. 5 стр.
7. Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М. Создание специализированной автоматической метеорологической наблюдательной сети на базе вышек сотовой связи с целью повышения достоверности и надёжности прогнозов о опасных явлениях погоды. Метеорология и гидрология, №2, 2009 г, с 91-98. 8 стр.

Публикации в других изданиях

1. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б. Модель ошибок измерения параметров атмосферы в системе радиозондирования, вносимых каналом телеметрии. // Мир измерений, №2, 2020. С.24-27.
2. Болелов Э.А., Биктеева Е.Б., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б. Комплексная система аэрологического зондирования атмосферы // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. С.582-583.
3. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М. Система аэрологического радиозондирования атмосферы с использованием ретранслированных сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». – М.: ИД Академия имени Н.Е. Жуковского, 2016. С.129-130.
4. Болелов Э.А., Горбунов Р.А., Ермошенко Ю.М., Подобрый Д.А. О поверке СИ, предназначенных для работы в сложных внешних условиях, нормах точности, обязательности методики измерений и возможности её аттестации компетентными органами, аккредитованными Росстандартом. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» М. 2017, с 159-162.
5. Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М. Улучшение точностных и динамических характеристик систем синхронизации средств связи и навигации воздушного судна при управлении его движением с АЗН в условиях интенсивных помех, XIII международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» Москва 29-30 апреля 2015г, ч.4, ЕСУ ЕНЖ технические науки, № 4/13, с 15-19.
6. Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М. Модели динамики движения ВС и навигационных измерений в аппаратуре потребителей СРНС. Материалы XI международной научно-практической конференции «Naukowa przestrzen Europy – 2015» 07–15 kwietnia 2015, с 59 – 61.

7. **Евтушенко О.А., Ермошенко Ю.М.** Влияние отражений от подстилающей поверхности на отношение сигнал/помеха в АП СРНС. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития современной науки и образования». 30 апреля 2015 г, Москва (тезисы докладов), ч. 3, с 63-64.

8. **Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М.** Метрология сетевого радиозондирования атмосферы. Прикладная физика и математика. Наука о земле. Научтехлитиздат, 2015. с 50-66

9. **Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** Метрология сетевого радиозондирования атмосферы. Справочник инженера 5/2015 с 49 – 57.

10. **Ермошенко Ю.М., Евтушенко О.А.** Уменьшение влияния нестабильности опорного генератора в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем на точность навигационных определений путём расширения вектора измерений. НАУ, Ежемесячный научный журнал (ЕНЖ) № 2(7)/2015, ч.3, с 65-68.

11. **Фридзон М.Б., Терешонок Е.А., Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М.** Натурные сравнительные исследования радиолокационной и радионавигационной систем аэрологического зондирования атмосферы // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития, Российской Федерации». – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. С. 641-642.

Соискатель:

 Ермошенко Ю.М.