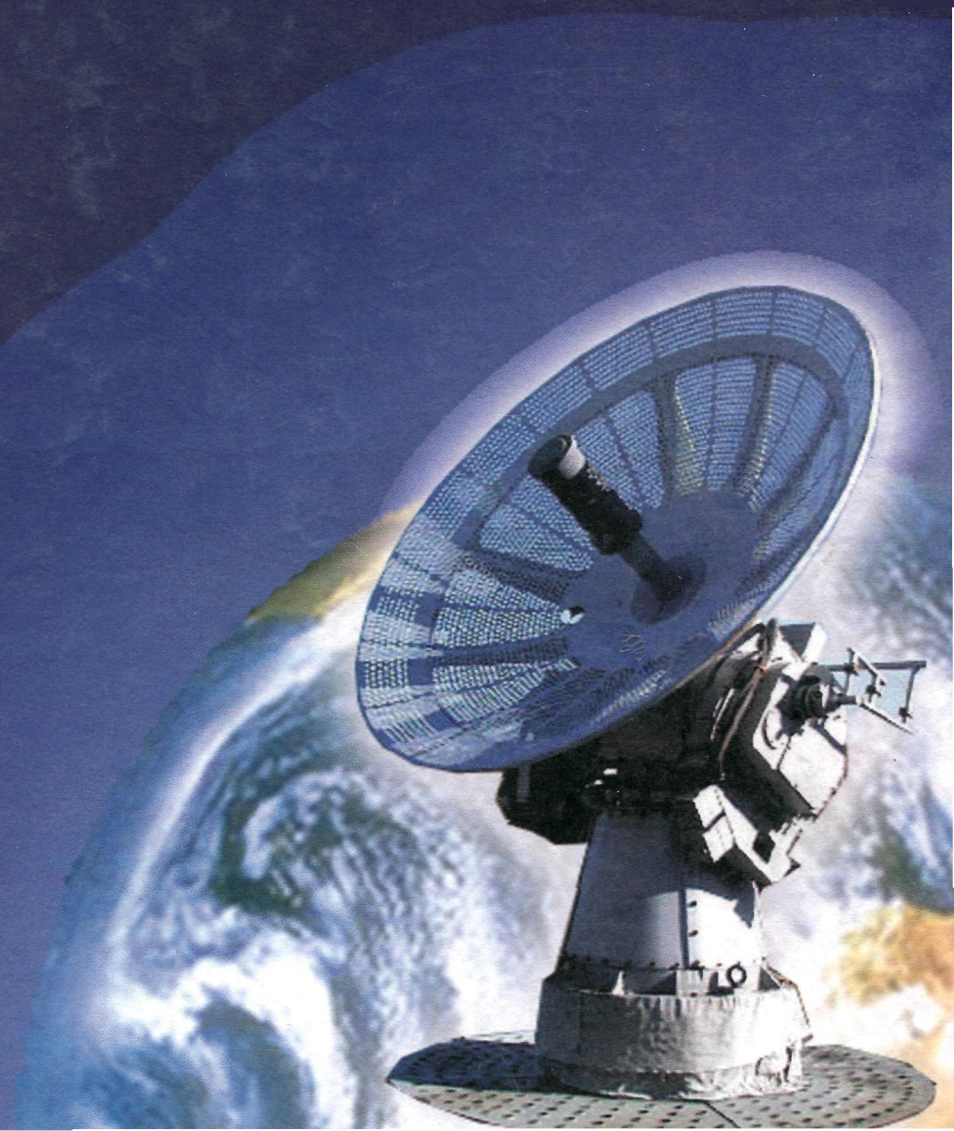
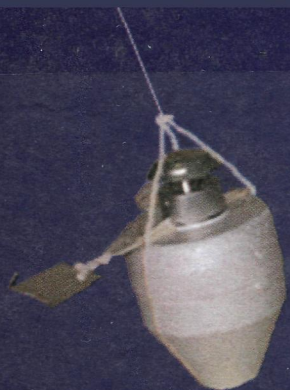


В.Э.ИВАНОВ, М. Б. ФРИДЗОН, С. П. ЕССЯК

РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

*Технические и метрологические аспекты
разработки и использования радиозондовых
измерительных средств*

2004



УДК 551.508.8; 551.501; 621.396.9; 621.396.6.

ББК 26.23

И20

Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / Под ред. В.Э.Иванова. Екатеринбург, 2004. 596 с. ISBN 5-7691-1513-0.

Обобщены результаты исследования, разработки и применения аэрологических радиозондов отечественных систем радиозондирования атмосферы. Обсуждены вопросы потенциальной точности радиотехнических методов измерения параметров траектории движения радиозондов. Рассмотрены и систематизированы вопросы метрологического обеспечения и аттестации радиозондовых средств и системы радиозондирования в целом. Проведено исследование и обоснование оптимальной структуры построения телеметрического канала радиосистемы и измерительной аппаратуры различных конструкций радиозондов. Представлены результаты исследований и разработки конструкций сверхрегенеративных приемопередающих устройств радиозондов.

Книга адресована специалистам, занимающимся разработкой и применением технических средств для аэрологических исследований атмосферы, может быть полезна студентам и аспирантам радиотехнических, гидрометеорологических и приборостроительных специальностей вузов.

Ответственный редактор

кандидат технических наук **М.П. Трухин**

*Рецензенты: д.ф.-м.н. А.А.Черников,
д.т.н. Б.А.Панченко, к.т.н. В.А.Матвиенко*

ISBN 5-7691-1513-0

И $\frac{41(04)}{8Л76(03)1998}$ БО

© В.Э.Иванов, М.Б.Фридзон, С.П.Ессяк, 2004г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
В.1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	5
В.2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК МЕТОДОВ И ТЕХНИКИ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	8
В.2.1. Становление и развитие отечественных технических средств аэрологических наблюдений	8
В.2.2. Отечественная наука и производство в деле создания и развития технических средств радиозондирования атмосферы	13
В.2.3. Повышение точности аэрологических наблюдений - результат развития и совершенствования методов и техники измерений в свободной атмосфере	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	23
Ч А С Т Ь 1	
ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ	
1.1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	25
1.1.1. Задачи, решаемые при радиозондировании атмосферы, и используемые для этого измерительные средства	25
1.1.2. Параметры атмосферы, измеряемые при стандартном радиозондировании атмосферы, особенности обработки и представления результатов зондирования	31
1.2. АНАЛИЗ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ РАДИОЗОНДА В СИСТЕМАХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	38
1.2.1. Радиотехнические методы определения пространственных координат радиозондов	38
1.2.2. Точность радиотехнических методов измерения координат радиозонда	45
1.2.3. Ошибки измерения высоты подъема радиозонда угломерно-дальномерным методом	53
1.3. АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ	60

1.3.1. Система радиозондирования «Метеорит - МАРЗ».....	60
1.3.2. Аэрологический информационно-вычислительный комплекс АВК - МРЗ	61
1.3.3. Основные принципы построения и алгоритмы работы аэрологического радиолокатора «МАРЛ-А».....	62
1.3.4. Радиолокационные станции «Бриз», «Вектор».....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89

Ч А С Т Ь 2

МЕТРОЛОГИЯ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

2.1. СИСТЕМА РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ КАК ОБЪЕКТ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	93
2.1.1. Общие вопросы организации метрологического обеспечения средств радиозондирования атмосферы (метрология, метрологическое обеспечение, требования к точности измерений).....	93
2.1.2. Постановка задачи метрологического исследования системы радиозондирования атмосферы.....	103
2.2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПРИ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ.....	113
2.2.1. Общие положения.....	113
2.2.2. Теория тепло - массообмена датчиков со средой.....	114
2.2.3. Решение системы уравнений пограничного слоя для датчиков радиозондов, движущихся в атмосфере.....	116
2.2.4. Уравнение тепло- массобаланса датчиков радиозондов	118
2.3. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДАТЧИКАМИ РАДИОЗОНДОВ.....	126
2.3.1. Общие положения.....	126
2.3.2. Метрологические характеристики датчиков температуры.....	132
2.3.3. Метрологические характеристики датчиков влажности	142

2.4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ РАДИОЗОНДОВ.....	148
2.4.1. Исследование метрологических характеристик датчиков температуры.....	148
2.4.1.1. Статическая характеристика преобразования и пределы её нахождения.....	148
2.4.1.2. Основная погрешность.....	151
2.4.1.3. Функция влияния радиационных факторов.....	154
2.4.1.4. Наибольшее изменение погрешности датчика за счёт смачивания.....	168
2.4.1.5. Наибольшее допустимое изменение погрешности датчика за счёт нагрева его в электромагнитном поле излучения передатчика радиозонда.....	172
2.4.1.6. Динамические характеристики и составляющие динамической погрешности датчика температуры.....	173
2.4.1.7. Коэффициент рассеяния мощности и наибольшие изменения выходного сигнала за счёт перегрева датчика рабочим током	177
2.4.2. Исследование метрологических характеристик датчиков влажности.....	179
2.4.2.1. Статическая характеристика преобразования и пределы её нахождения.....	179
2.4.2.2. Основная погрешность.....	180
2.4.2.3. Вариация выходного сигнала датчика влажности.....	183
2.4.2.4. Функция влияния температуры.....	186
2.4.2.5. Погрешности за счёт неравенства температуры датчика и среды	196
2.4.2.6. Погрешность датчика влажности при смачивании.....	198
2.4.2.7. Динамические характеристики и составляющие динамической погрешности датчика влажности.....	199
2.4.2.8. Погрешности за счёт влияния оболочки и выделения водяного пара батареей питания.....	214
2.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ.....	216
2.5.1. Погрешности за счёт квантования сигнала по параметру.....	216
2.5.2. Погрешности телеметрического канала	216
2.5.3. Погрешности определения высоты радиозонда.....	224
2.5.4. Исследование погрешности обработки телеметрической информации.....	230
2.6. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПРИ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ.....	235
2.6.1. Точность измерений температуры.....	235
2.6.2. Точность измерений влажности.....	244

2.6.3. Экспериментальное исследование суммарных погрешностей измерений температуры и влажности.....	248
2.6.3.1. Подготовка и проведение экспериментов.....	250
2.6.3.2. Результаты экспериментов.....	254
2.7. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЁТА ДАВЛЕНИЯ НА СТАНДАРТНЫХ УРОВНЯХ И УРОВНЯХ ОСОБЫХ ТОЧЕК, ВЫСОТЫ ГЕОПОТЕНЦИАЛА ИЗОБАРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	262
2.8. РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ РАДИОЗОНДОВ.....	268
2.8.1. Измерительные средства для исследования и проверки статических характеристик датчиков температуры.....	269
2.8.2. Измерительные средства для исследования и поверки статических характеристик датчиков влажности.....	276
2.8.2.1. Генераторы влажности по методу гигротермического равновесия.....	277
2.8.2.2. Генераторы влажности по методу двух температур.....	385
2.8.2.3. Генераторы влажности по методу двух давлений.....	288
2.8.2.4. Комбинированный метод.....	291
2.8.2.5. Генератор влажности «Облако».....	295
2.8.3. Измерительные средства для исследования динамических характеристик аэрологических датчиков.....	305
2.8.3.1. Камера «Солнце» для исследования динамических характеристик датчиков температуры.....	305
2.8.3.2. Универсальный генератор влажного воздуха «Диполь» для исследования динамических характеристик датчиков влажности	310
2.8.3.3. Установка «Каскад» для определения динамических характеристик датчиков в нормальных условиях.....	318
2.8.4. Образцовые средства для проверки суммарных погрешностей измерений температуры и влажности в натуральных условиях.....	322
2.8.4.1. Конденсационный гигрометр «Торос»	323
2.8.4.2. Тонкопроволочный платиновый термометр сопротивления (ПТС).....	340
2.9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	342
П1. ПРИЛОЖЕНИЕ.....	345
П1.1. Рабочие условия радиозондирования атмосферы.....	345
П1.2. Радиационные поправки к температуре воздуха, измеренной датчиком температуры радиозондов МРЗ и МАРЗ.....	347
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СИМВОЛЫ.....	350
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	353

Ч А С Т Ь 3

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МЕТЕОВЕЛИЧИН В АЭРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	363
3.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТЕОВЕЛИЧИН ПРИ АЭРОЛОГИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ.....	363
3.2. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТЕЛЕМЕТРИИ МЕТЕОВЕЛИЧИН В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ.....	370
3.3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	377
3.3.1. Общие положения. Классификация методов повышения точности.....	377
3.3.2. Структурные методы повышения точности измерительных систем.....	379
3.3.3. Теоретические основы построения инвариантных измерительных устройств. Принцип многоканальности.....	382
3.3.4. Структурные схемы инвариантных измерительных устройств.....	388
3.4. МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН - ВЫХОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАДИОЗОНДОВ.....	393
3.4.1. Общие вопросы преобразования электрических величин в частотные сигналы.....	393
3.4.2. Развёртывающий метод преобразования информационных величин и его использование для создания вторичных радиозондовых преобразователей с частотным выходом.....	394
3.4.3. Структурные схемы развёртывающих преобразователей напряжения, сопротивления, ёмкости.....	396
3.4.3.1. Способы развёртывающего преобразования напряжения.....	396
3.4.3.2. Способы развёртывающего преобразования сопротивления и ёмкости.....	400

3.5. СОЗДАНИЕ РАДИОЗОНДОВЫХ УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ ДАТЧИКОВ МЕТЕОВЕЛИЧИН В ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ.....	407
3.5.1. «Базовый» вторичный телеметрический преобразователь радиозонда частотным выходом.....	407
3.5.1.1. Общие вопросы создания «базового» вторичного преобразователя	407
3.5.1.2. Преобразование сопротивления «высокоомных» датчиков метеовеличин, входящих в резистивную измерительную цепь «базового» вторичного телеметрического преобразователя	409
3.5.1.3. Преобразование выходного напряжения измерительной цепи для промежуточного преобразования выходных параметров датчиков в «базовом» вторичном телеметрическом преобразователе.....	411
3.5.2. Радиозонд с ёмкостным интегральным плёночным датчиком влажности воздуха.....	415
3.5.2.1. Конструктивные особенности интегральных плёночных чувствительных элементов влажности их основные характеристики.....	415
3.5.2.2. Аэрологический преобразователь влажности АПВ и его подключение к «базовому» ВТП радиозонда.....	417
3.5.2.3. Способы задания функции преобразования влажности радиозонда с преобразователем АПВ.....	419
3.5.3. Радиозонд с резистивным «низкоомным» датчиком температуры воздуха.....	421
3.5.3.1. Микрофольговые и микропроволочные терморезисторы как датчики температуры воздуха радиозонда.....	421
3.5.3.2. Вторичный телеметрический преобразователь сопротивления «низкоомного» датчика температуры.....	423
3.5.4. Радиозонд с интегральным кремниевым тензорезисторным датчиком атмосферного давления.....	427
3.5.4.1. Интегральный кремниевый тензопреобразователь как датчик атмосферного давления радиозонда.....	427
3.5.4.2. Вторичный телеметрический преобразователь выходных параметров тензорезисторного датчика атмосферного давления.....	437
3.6. Блок телеметрии радиозонда с микропроцессором.....	445
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	453
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	455

ЧАСТЬ 4

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕОРИЯ РАБОТЫ СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПРИЁМОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЗОНДОВ.....	460
4.1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫМ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКАМ РАДИОЗОНДОВ.....	460
4.2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА РАДИОЗОНДА.....	468
4.2.1. Описание принципа работы и основных технических характеристик сверхрегенеративного усилителя.....	468
4.2.2. Анализ работы и основные выходные параметры сверхрегенеративного приемопередатчика с вторичной ответной реакцией.....	478
4.3. РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ТРАНЗИСТОРНОГО СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА.....	489
4.3.1. Исследование влияния регенеративной характеристики СВЧ - автогенератора на выходные параметры приемопередатчика радиозонда.....	489
4.3.2. Разработка расчетной модели транзисторного СВЧ - автогенератора сверхрегенеративного приемопередатчика.....	496
4.3.3. Исследование и расчет статической и динамической регенеративных характеристик транзисторного СВЧ - автогенератора	507
4.3.4. Исследование стабильности и взаимного положения частот приема и передачи сверхрегенеративного приемопередатчика.....	518
4.3.5. Исследование амплитудно-частотной характеристики сверхрегенеративного приемопередатчика.....	523
4.3.6. Методы модуляции излучения приемопередатчика радиозонда телеметрическим сигналом.....	527
4.3.7. Основные характеристики спектра излучения СПП.....	532
4.3.8. Исследование устойчивости режимов работы СПП с вторичной ответной реакцией.....	538
4.3.9. Перспективные методы повышения выходных эксплуатационных параметров СПП.....	543

4.4. ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИИ СПП И АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЗОНДА.....	550
4.4.1. Описание структурной и электрической схемы СПП аэрологического радиозонда.....	551
4.4.2. Особенности конструктивных решений СВЧ-автогенератора, антенной системы и компоновки радиозондов типа МРЗ-3.....	555
4.4.3. Некоторые вопросы разработки конструкции СВЧ-автогенераторов СПП на основе применения диэлектрических резонаторов.....	560
4.4.4. Особенности настройки и измерений основных эксплуатационных параметров СПП.....	563
4.4.5. Применение СПП в радиолокационных высотомерах для аэрологических измерений.....	568
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	572
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СИМВОЛЫ.....	574
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	577