

Р. Довиак, Д. Зрнич

Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения

Перевод с английского под редакцией
д-ра физ.-мат. наук, проф. А. А. Черникова



Ленинград Гидрометеониздат 1988

43484

Doppler Radar and Weather Observation

RICHARD J. DOVIK
DUŠAN S. ZRNIC

National Severe Storms Laboratory
National Oceanic and Atmospheric Administration
Norman, Oklahoma
and
Departments of Electrical Engineering and Meteorology
University of Oklahoma
Norman, Oklahoma

1984



ACADEMIC PRESS, INC.

(Harcourt Brace Jovanovich, Publishers)

Orlando San Diego San Francisco New York London
Toronto Montreal Sydney Tokyo São Paulo

Перевод с английского В. М. Востренкова, В. С. Новикова,
М. Н. Хайкина

В книге американских ученых, посвященной одной из наиболее молодых наук — радиолокационной метеорологии, — рассмотрены методические вопросы применения радиолокаторов, работающих по принципу Доплера, в исследованиях структуры воздушных движений в облаках, для изучения динамики торнадо, ураганов и получения ветровых характеристик безоблачной атмосферы. Книга знакомит читателей с техническими, теоретическими и методическими разработками, развитыми сегодня в радиолокационной метеорологии.

Для инженеров и специалистов, работающих над развитием современных методов и средств исследования атмосферы, физиков и метеорологов, использующих результаты радиолокационных измерений в практике исследований, а также студентов и аспирантов радиофизических специальностей.

Д $\frac{1903040000-180}{069(02)-88}$ 9(88)

ISBN 5—286—00063—0

Copyright © 1984, by Academic Press, Inc.

© Гидрометеониздат, 1988

Оглавление

Предисловие редактора перевода	10
Предисловие	12
Благодарности	14
Список обозначений	15
1. Введение	18
Список литературы	21
2. Электромагнитные волны и их распространение	22
2.1. Волны	22
2.2. Пути распространения волн	25
2.2.1. Показатель преломления воздуха	26
2.2.2. Индекс рефракции N	28
2.2.3. Сферически стратифицированная атмосфера	30
Список литературы	39
3. Принципы радиолокации	40
3.1. Доплеровский радиолокатор (вопросы излучения)	40
3.1.1. Электромагнитный луч	43
3.1.2. Коэффициент усиления антенны	45
3.2. Характеристики цели	45
3.2.1. Эффективная площадь рассеяния	45
3.2.2. Доплеровский сдвиг частоты	47
3.3. Ослабление	48
3.3.1. Ослабление, вносимое дождем	49
3.3.2. Ослабление, вносимое облачными каплями	50
3.3.3. Ослабление, вносимое осадками в виде снега	51
3.3.4. Ослабление в газах	52
3.4. Доплеровский радиолокатор (вопросы приема)	53
3.4.1. Уравнение радиолокации	54
3.4.2. Форма принимаемого сигнала (синфазная и квадратурная компоненты)	55
3.5. Практические приложения	58
3.5.1. Шумовая температура системы	58
3.5.2. Ширина полосы пропускания	62
3.5.3. Форма фильтрованного сигнала	63
3.5.4. Отношение сигнал/шум: согласованные фильтры	65
3.6. Неопределенности	65
Список литературы	67

4. Сигналы, отраженные от метеообъектов	68
4.1. Выборочные эхосигналы	69
4.2. Статистические характеристики сигнала	71
4.3. Уравнение радиолокации метеоцели	73
4.3.1. Весовая функция по дальности	75
4.3.2. Разрешаемый объем	79
4.3.3. Радиолокационная отражаемость	81
4.4. Отношение сигнал/шум для распределенных целей	82
4.5. Корреляция выборок эхосигнала вдоль временной оси отсчетов дальности	83
Список литературы	85
5. Доплеровские спектры сигналов от метеообъектов	86
5.1. Спектральный анализ метеосигналов	86
5.1.1. Дискретное преобразование Фурье	86
5.1.2. Свертка и корреляция	92
5.1.3. Спектр мощности случайных последовательностей	95
5.1.4. Смещение, дисперсия и эффект окна данных	99
5.1.5. Выражение спектральных оценок в терминах истинного спектра	101
5.1.6. Дисперсия периодограммы	106
5.2. Доплеровский спектр метеосигналов и его связь с полями отражаемости и радиальной скорости	108
5.3. Ширина спектра скоростей, сдвиг ветра и турбулентность	115
Список литературы	118
6. Обработка сигналов метеорологического радиолокатора	120
6.1. Спектральные моменты	120
6.2. Обработка радиолокационного сигнала	121
6.3. Оценка мощности отраженного сигнала	124
6.3.1. Осреднение по временной выборке	124
6.3.2. Осреднение по дальности	131
6.4. Методы оценки средней частоты	132
6.4.1. Автоковариационная обработка: процессор парных импульсов	132
6.4.2. Спектральная обработка	137
6.5. Методы оценки ширины спектра	138
6.5.1. Автоковариационная обработка	139
6.5.2. Спектральная обработка	141
6.6. Минимальные границы дисперсии	144
6.7. Способы представления данных	146
Список литературы	150
7. Особенности применения доплеровских РЛС в метеорологических исследованиях	152
7.1. Неопределенность в измерении дальности	152
7.1.1. Вероятность наложения сигналов от отдельной конвективной ячейки	155
7.1.2. Наложение сигналов от линии шквалов	157
7.2. Неопределенность измерения скорости	160
7.3. Когерентность эхосигналов	162

7.4. Методы расширения диапазона однозначных измерений дальности и скорости и уменьшения потерь информации в результате наложения эхосигналов	163
7.4.1. Поимпульсное изменение фазы	164
7.4.2. Поляризационное кодирование пары импульсов	165
7.4.3. Использование метода изменения межимпульсных интервалов для расширения диапазона однозначных измерений скорости	167
7.4.4. Чередувание измерений скорости и отражаемости	172
7.4.5. Устранение подмен скорости	173
7.5. Методы уменьшения времени сбора данных	176
7.5.1. Изменение частоты излучения от импульса к импульсу	176
7.5.2. Излучение последовательности случайных сигналов	177
7.6. Эффективная диаграмма направленности антенны сканирующей РЛС	181
7.7. Боковые лепестки ДН антенны	185
7.8. Помехи от наземных объектов и их подавление	188
7.9. Аппаратурные эффекты, искажающие спектр	192
7.9.1. Шумы ограничения и квантования	194
7.9.2. Рассогласование по амплитуде и фазе	197
7.9.3. Дрожание фазы	199
7.10. Обнаружение слабых метеосигналов	200
7.10.1. РЛС со сжатием импульсов	201
7.10.2. Дополнительные коды	204
7.10.3. Доплеровская РЛС с непрерывным излучением и частотной модуляцией	206
Список литературы	215

8. Измерение жидких осадков 217

8.1. Распределение капель дождя по размерам	217
8.1.1. Распределение облачных капель по размерам	218
8.1.2. Распределение капель по размерам в дождях	221
8.2. Установившаяся скорость падения капель	224
8.3. Интенсивность дождя, отражаемость, ослабление и водность жидкокапельной части	226
8.3.1. Водность жидкокапельной части	226
8.3.2. Отражаемость Z	227
8.3.3. Интенсивность дождя	229
8.3.4. Коэффициент ослабления K	231
8.4. Оценка интенсивности дождя по измерениям одного параметра	235
8.4.1. $Z-R$ -соотношение	235
8.4.2. Метод измерения ослабления	239
8.5. Оценка интенсивности дождя по измерениям двух параметров	242
8.5.1. Диаграмма параметров дождя	243
8.5.2. Двухволновый метод	245
8.5.3. Измерения на двух поляризациях	250
8.5.4. Пазунограф и радиолокатор	262
8.6. Измерение распределения капель по размерам по доплеровскому спектру	270
8.7. Выводы	272
Список литературы	274

9. Исследование воздушных потоков, градовых облаков и связанных с ними явлений 279

9.1. Структура грозовых облаков	280
9.2. Наблюдения с помощью двух доплеровских радиолокаторов	287
9.2.1. Восстановление полей скорости ветра	288

9.2.2.	Исследования кучевых облаков с торнадо	290
9.2.3.	Ошибки при получении поля скоростей ветра	298
9.3.	Измерения скорости воздушного потока, однородного в горизонтальной плоскости, с помощью одного доплеровского радиолокатора	299
9.3.1.	Использование метода наименьших квадратов для расчета поля ветра	304
9.3.2.	Расчет скорости при сканировании по круговым дугам	306
9.3.3.	Расчет скорости при сканировании по полному кругу	307
9.3.4.	Расчет скорости по измерениям, проводимым в конических секторах	314
9.3.5.	Расчет скорости по измерениям внутри объема: метод VVP	315
9.3.6.	Наблюдения в предоблачной атмосфере	316
9.4.	Воздушный поток, неоднородный в горизонтальной плоскости	320
9.4.1.	Вертикальный воздушный поток	320
9.4.2.	Волны	322
9.5.	Метеорологические явления, наблюдаемые с помощью одного доплеровского радиолокатора	323
9.5.1.	Вихри	324
9.5.2.	Мощные кучевые облака	328
9.5.3.	Доплеровский спектр торнадо	337
9.5.4.	Нисходящие потоки	345
9.5.5.	Линия шквалов	348
9.5.6.	Молнии	357
9.5.7.	Ураганы	363
	Список литературы	365
10.	Измерение параметров турбулентности	369
10.1.	Статистическая теория турбулентности	369
10.1.1.	Спектр турбулентности и функция корреляции	370
10.1.2.	Структурные функции (локально однородные поля)	375
10.1.3.	Структурная и корреляционная функции в предположениях подобия	377
10.1.4.	Теория Чандрасекхара	379
10.2.	Пространственные спектры скоростей в точке и осредненные по разрешаемому объему	382
10.2.1.	Фильтрующие свойства разрешаемого объема	382
10.2.2.	Дисперсия в точке и средние скорости	389
10.2.3.	Параметры турбулентности по данным измерений с помощью одного радиолокатора	390
10.2.4.	Параметры турбулентности по данным двух доплеровских радиолокаторов	391
10.3.	Ширина доплеровского спектра и скорость диссипации турбулентной энергии	393
10.4.	Ширина доплеровского спектра в грозах	395
	Список литературы	405
11.	Отражение в безоблачной турбулентной атмосфере	408
11.1.	Отражение, преломление и рассеяние: когерентность	408
11.2.	Вывод волнового уравнения для неоднородной и турбулентной среды	410
11.3.	Решение для полей, рассеянных на неоднородностях	414
11.4.	Фраунгоферово рассеяние	420
11.4.1.	Обсуждение и примеры	423

11.4.2.	Средняя плотность мощности рассеянных сигналов . . .	427
11.5.	Френелевское рассеяние	438
11.5.1.	Рассеяние на неоднородностях, радиус корреляции которых меньше зоны Френеля	438
11.5.2.	Рассеяние на неоднородностях, радиус корреляции которых сравним с размером зоны Френеля или превышает его	441
11.5.3.	Обратное рассеяние на анизотропных неоднородностях	447
11.6.	Структурная постоянная показателя преломления	451
11.6.1.	Зависимость структурной постоянной от высоты	457
11.6.2.	Инерционный интервал	462
11.6.3.	Критерий измерения скорости движения неоднородностей показателя преломления	465
11.7.	Наблюдение радужа в «ясном» небе	469
11.8.	Наблюдения за ветром, волнами и турбулентностью в безоблачной атмосфере	475
11.8.1.	Определение профиля скорости ветра	476
11.8.2.	Кинематическая структура конвективного пограничного слоя	479
	Список литературы	487
Приложение А	. . . . .	491
Приложение Б	. . . . .	494
Приложение В	. . . . .	497
Приложение Г	. . . . .	502
Приложение Д	. . . . .	504
	Список литературы	505
	Список авторов	506
	Предметный указатель	509