



МИР цифровой обработки

В.П. Дворкович

А.В. Дворкович

**Метрологическое
обеспечение
видеоинформационных
систем**

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2015

УДК 004.421, 004.932, 519.722, 621.317, 621.397

ББК 32.811

Д 24

Рецензент: д.т.н., профессор Исаев Л.К.

Д 24 Дворкович В.П., Дворкович А.В.

Метрологическое обеспечение видеoinформационных систем

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 784с. ISBN 978-5-94836-419-3

Настоящая книга посвящена теоретическим проблемам и практической реализации метрологического обеспечения современных видеoinформационных систем, включая оценку параметров и качественных показателей оборудования формирования, передачи и приема видеoinформации. Данная монография является продолжением темы, рассмотренной авторами в книге «Цифровые видеoinформационные системы. Теория и практика» (ТЕХНОСФЕРА, 2012 г.). Книга состоит из 13 глав.

Первая глава посвящена основным вопросам метрологического обеспечения и особенностям измерений и контроля в видеoinформационных системах. Во второй главе рассмотрены аналоговые системы формирования и передачи видеoinформации. В третьей главе анализируются параметры систем цифрового вещательного телевидения, используемых в России. В четвертой главе рассмотрены методы синтеза измерительных сигналов для оценки как аналоговых, так и цифровых систем передачи видеoinформации. Пятая глава посвящена вопросам повышения точности обработки измерительных сигналов при оценке параметров видеoinформационных систем. В шестой главе представлены классические и новые оконные функции для гармонического анализа сигналов. В седьмой главе рассмотрены основные интерфейсы, используемые в цифровых видеoinформационных системах. Восьмая глава посвящена вопросам оценки искажений в цифро-аналоговых видеoinформационных системах. В девятой и десятой главах подробно изложены методы измерений в системах цифрового вещания DVB первого и второго поколений соответственно. Одиннадцатая глава рассматривает проблемы психоакустики и методы перцептуальной оценки качества звуковых сигналов. В двенадцатой главе приведено описание параметров и метрологии отечественной системы цифрового наземного мультимедийного вещания РАВИС. Тринадцатая глава предоставляет информацию о практической реализации контроля и измерений в цифровых видеoinформационных системах.

Книга адресована магистрам, инженерам и аспирантам телекоммуникационной отрасли, работающим в области разработки и эксплуатации видеoinформационных систем и сетей.

УДК 004.421, 004.932, 519.722, 621.317, 621.397

ББК 32.811

© 2015, Дворкович В.П., Дворкович А.В.

© 2015, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-419-3

*Всем Дворковичам,
погибшим и расстрелянным
в «Балке смерти» под Таганрогом,
посвящается.
И в 70-летие Победы
в Великой Отечественной войне
помним!*

Содержание

Введение	14
Глава 1	
Основные понятия об измерениях и контроле в видеотелекоммуникационных системах	26
1.1. Метрологическое обеспечение и специфические особенности измерений и контроля в видеотелекоммуникационных системах	26
1.1.1. Виды искажений измерительных сигналов	28
1.1.2. Критерии оценки искажений измерительных сигналов	30
1.2. Краткие сведения о погрешностях измерений и контроля	31
1.2.1. Закономерности проявления погрешностей	33
1.2.2. Оценки точностных характеристик средств измерений	36
1.2.3. Использование порядковых статистик в анализе результатов измерений	44
1.2.4. Использование цикличности измерения параметров сигналов	48
Литература к главе 1	50
Глава 2	
Форматы изображений, системы формирования и передачи аналоговой видеотелекоммуникации	54
2.1. Форматы изображений. Объем информации изображений при цифровой дискретизации изображений	54
2.2. Объем информации в стандартных системах аналогового телевизионного вещания	56
2.2.1. Видеосигналы монохромного телевидения	56
2.2.2. Цветное телевидение	59
2.2.3. Видеосигналы системы NTSC	62
2.2.4. Видеосигналы системы PAL	66
2.2.5. Видеосигналы системы SECAM	69
2.2.6. Основные параметры полного цветового ТВ-сигнала на радиочастоте	74
2.2.7. Уменьшение объема информации при преобразовании составляющих ТВ-сигналов в цифровую форму	82
2.2.8. Качественные показатели телевизионных изображений	84
Литература к главе 2	87

Глава 3

Кодирование видеоинформации и системы цифрового вещательного телевидения	90
3.1. Стандарты кодирования динамических изображений	90
3.2. H.264/AVC — улучшенное видеокодирование	94
3.3. H.265/HEVC — высокоэффективное видеокодирование	122
3.4. Мультиплексирование цифровых потоков в системах цифрового теле- видения	135
3.4.1. Транспортный поток MPEG-2	136
3.4.2. Программный поток MPEG-2	143
3.4.3. Обобщенный инкапсулированный поток (GSE)	146
3.5. Стандарты цифрового телевизионного вещания	150
3.6. Системы цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T/DVB-T2	152
3.6.1. Система наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T ..	152
3.6.2. Стандарт усовершенствованной системы наземного цифрового телевизионного вещания DVB-T2	163
3.7. Системы цифрового спутникового телевизионного вещания DVB-S/DVB-S2	201
3.7.1. Стандарт системы цифрового спутникового телевизионного ве- щания DVB-S	202
3.7.2. Стандарт высокоскоростного цифрового спутникового телевизи- онного вещания DVB-S2	205
3.8. Системы цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C/DVB-C2	213
3.8.1. Стандарт системы цифрового кабельного телевидения DVB-C...	214
3.8.2. Стандарт системы высокоскоростного цифрового кабельного те- левидения DVB-C2	216
Литература к главе 3	226

Глава 4

Синтез измерительных сигналов для оценки аналоговых и цифровых видеоинформационных систем	230
4.1. Стандартные измерительные сигналы для аналоговых систем ТВ-ве- щания	231
4.1.1. Элементы измерительных сигналов и их параметры	231
4.1.2. Периодические измерительные сигналы	236
4.1.3. Сигналы испытательных строк	236
4.2. Системные искажения стандартных измерительных сигналов	239
4.2.1. Системные искажения сигналов для измерения импульсных ха- рактеристик	239
4.2.2. Системные искажения сигналов для измерения переходных ха- рактеристик	241
4.2.3. Системные искажения сигналов для измерения частотных ха- рактеристик	243



4.3. Критерии оптимальности измерительных сигналов для оценки каналов аналоговой и цифровой передачи видеoinформации	245
4.3.1. Критерии оптимальности измерительных сигналов для оценки импульсных характеристик.....	246
4.3.2. Критерии оптимальности измерительных сигналов для оценки переходных характеристик	248
4.4. Синтез оптимальных измерительных сигналов для оценки каналов аналоговых и цифровых видеoinформационных систем	249
4.4.1. Синтез оптимальных сигналов для оценки импульсных характеристик	249
4.4.2. Синтез оптимальных сигналов для оценки переходных характеристик	253
4.4.3. Синтез оптимальных сигналов для оценки частотных характеристик	255
4.5. Синтез измерительных сигналов, форма которых совпадает с огибающей их спектра	257
4.5.1. Сигналы для одновременного измерения импульсных и частотных характеристик	257
4.5.2. Искажения сигналов, форма которых совпадает с огибающей их спектра	260
4.6. Синтез измерительных сигналов для оценки эхо-радиосигналов	262
4.6.1. Использование практически финитных по спектру и времени измерительных сигналов	262
4.6.2. Измерительные сигналы для анализа ближних эхо-сигналов	266
4.7. Искажения измерительных сигналов в системах с частичным подавлением одной боковой полосы	269
4.7.1. Искажения измерительного импульсного сигнала В1*	272
4.7.2. Искажения сигналов для измерения переходных характеристик В2*	273
4.7.3. Искажения сигналов F для измерения РУ и РВ.....	276
4.7.4. Искажения серий синусоидальных колебаний С2	278
4.7.5. Искажения сигналов D2 для оценки дифференциальных характеристик	279
Литература к главе 4	280

Глава 5

Алгоритмы обработки измерительных сигналов при оценке параметров видеoinформационных систем..... 283

5.1. Алгоритмы анализа стандартных измерительных сигналов для аналоговых систем ТВ-вещания.....	283
5.2. Дискретная и непрерывная оптимальная фильтрация постоянных уровней видеоимпульсов	290
5.2.1. Условия оптимальной линейной фильтрации помехи	290
5.2.2. Зависимости оптимального уменьшения дисперсии помехи от величины интервала обработки сигнала	296

5.2.3.	Реализация специальных сигналов, обеспечивающих повышение точности оценки уровней	297
5.3.	Цифровая обработка быстроизменяющихся процессов	300
5.3.1.	Активные методы поиска экстремумов	301
5.3.2.	Поиск экстремумов с применением методов стохастической аппроксимации	304
5.3.3.	Поиск экстремумов с применением методов цифровой фильтрации	306
5.3.4.	Поиск переходов сигнала через заданный потенциальный уровень	311
5.4.	Использование порядковых статистик и критериев сравнения оценок при обработке результатов измерений	313
5.5.	Алгоритмы обработки измерительных сигналов и результатов измерений	314
5.5.1.	Особенности измерения размахов синусоидальных колебаний	316
5.5.2.	Специфика анализа импульсных характеристик	318
5.6.	Алгоритмы оценки параметров помех	319
5.6.1.	Методы одновременной оценки параметров флуктуационных и синусоидальных помех	323
5.6.2.	Особенности оценки частот синусоидальных помех по дискретным выборкам	325
5.7.	Цифровые методы оценки флуктуационных помех в сигналах динамического изображения	328
5.7.1.	Дискретное преобразование сигнала подвижного изображения ..	331
5.7.2.	Линейная фильтрация флуктуационной помехи в динамическом изображении	333
5.7.3.	Повышение эффективности анализа флуктуационных помех с применением нелинейных методов цифровой обработки	336
	Литература к главе 5	338

Глава 6

Анализ спектров сигналов с использованием оконных функций

6.1.	Основные параметры оконных функций	345
6.1.1.	Эквивалентная шумовая полоса	345
6.1.2.	Усиление преобразования	346
6.1.3.	Корреляция перекрывающихся участков	347
6.1.4.	Паразитная амплитудная модуляция спектра	348
6.1.5.	Максимальные потери преобразования	349
6.1.6.	Просачивание спектральных составляющих	349
6.1.7.	Минимальная разрешаемая полоса	349
6.1.8.	Относительная разность шумовой полосы оконной функции и ее полосы по уровню 3 дБ	350
6.1.9.	Максимальный уровень боковых лепестков	350
6.1.10.	Скорость спада боковых лепестков	351
6.2.	Классические оконные функции	351
6.2.1.	Прямоугольная и треугольная оконные функции	352

6.2.2.	Оконные функции Хеннинга	353
6.2.3.	Оконные функции Хемминга, Блэкмаха, Блэкмана–Херриса	355
6.2.4.	Оконные функции Наталла, Блэкмана–Наталла, Бартлетта–Ханна, окно с плоской вершиной	357
6.3.	Оконные функции, сконструированные различными авторами	359
6.3.1.	Оконные функции Рисса, Римана, Валле–Пуассона	360
6.3.2.	Оконные функции Тьюки	361
6.3.3.	Оконные функции Бомана и Пуассона	363
6.3.4.	Оконные функции Хеннинга–Пуассона, Коши и Гаусса	364
6.3.5.	Оконные функции Кайзера–Бесселя	366
6.4.	Оконные функции Дольфа–Чебышева и Барсилона–Темеша и их модификации	368
6.4.1.	Равноволновые окна Дольфа–Чебышева и их модификации	368
6.4.2.	Окна Барсилона–Темеша и их модификации	379
6.5.	Оконные функции Кравченко	385
6.6.	Принципы синтеза высокоэффективных оконных функций	388
6.6.1.	Алгоритм минимизации спектральных составляющих оконной функции вне пределов заданного интервала	389
6.6.2.	Алгоритм минимизации различий формы и спектра оконной функции	392
6.6.3.	Алгоритмы максимизации спада уровней боковых лепестков спектра оконной функции	398
6.6.4.	Формирование окон путем перемножения оконных функций или возведения в степень их спектров	406
6.7.	Выбор оконных функций при цифровой обработке сигналов	409
	Литература к главе 6	411

Глава 7

Интерфейсы в цифровых видеоинформационных системах. Основные параметры и методы их измерения	413
7.1. Синхронный параллельный интерфейс SPI	413
7.1.1. Параллельный интерфейс при цифровом преобразовании компонентного сигнала	415
7.1.2. Параллельный интерфейс при цифровом преобразовании комбинированного сигнала	417
7.2. Цифровой последовательный интерфейс SDI	419
7.2.1. Синхронный последовательный интерфейс	422
7.2.2. Асинхронный последовательный интерфейс	424
7.3. Высокоскоростной цифровой последовательный интерфейс IEEE-1394	429
7.4. Основные виды искажений цифровых сигналов. Джиттер	433
7.5. Методы анализа и измерения джиттера	436
7.5.1. Глазковая диаграмма	436
7.5.2. U-образная кривая и ее экстраполяция	439
7.5.3. Гистограммы распределения набора значений параметров глазковой диаграммы	441
7.5.4. Измерение частотных характеристик джиттера	442

7.5.5. Контур вероятности распределения BER	443
Литература к главе 7	445

Глава 8

Измерения искажений сигналов и изображений в цифроаналоговых видеотрансмиссионных системах..... 448

8.1. Классификация характерных искажений аналого-цифровых систем формирования и передачи сигналов изображения	449
8.2. Тестовые видеопоследовательности для анализа искажений при MPEG-подобном кодировании	457
8.3. Испытательные таблицы для анализа искажений в аналого-цифровых каналах	463
8.4. Анализ параметров цифрового транспортного потока MPEG-2.....	471
8.4.1. Семантика полей заголовка транспортного пакета и их анализ...	471
8.4.2. Семантика полей поля адаптации ТП и их анализ.....	475
8.4.3. Перечень параметров анализа транспортного потока MPEG-2 ...	477
8.4.4. Номенклатура анализируемых параметров в сетях передачи транспортного потока MPEG-2.....	484
8.5. Визуализация параметров кодирования видеотрансмиссионной информации в соответствии со стандартами H.264/AVC и H.265/HEVC	484
Литература к главе 8	491

Глава 9

Измерения в цифровых системах DVB первого поколения 494

9.1. Перечень параметров, измеряемых в каналах систем спутникового, кабельного и наземного ТВ-вещания.....	495
9.1.1. Общие параметры спутниковых и кабельных сред передачи	495
9.1.2. Специфические параметры спутниковых и кабельных сред передачи	496
9.2. Определение общих параметров для спутниковых и кабельных сред передачи.....	499
9.2.1. Работоспособность системы	499
9.2.2. Наличие локальной связи	499
9.2.3. BER до декодера Рида–Соломона	500
9.2.4. Запись протокола ошибок.....	501
9.2.5. Точность таймера символов передатчика и величина его джиттера	502
9.2.6. Мощность сигнала РЧ/ПЧ	502
9.2.7. Мощность шума.....	503
9.2.8. Подсчет битовых ошибок после декодирования Рида–Соломона .	505
9.2.9. Анализ сигналов I и Q	505
9.2.10. Интерференция.....	512
9.3. Определение дополнительных параметров для спутниковых сред передачи.....	513
9.3.1. BER до декодирования Витерби	513

9.3.2.	Получение зависимости BER от отношения E_b/N_0	514
9.3.3.	Спектр ПЧ.....	515
9.4.	Определение дополнительных параметров для кабельных сред передачи.....	516
9.4.1.	Допустимый уровень шума	516
9.4.2.	Оценка допустимого уровня шума	517
9.4.3.	Пороговый тест качества сигнала	517
9.4.4.	Уровень шума, эквивалентный ухудшению	520
9.4.5.	Зависимость BER от отношения E_b/N_0	521
9.4.6.	Фазовый шум несущей РЧ.....	522
9.4.7.	Амплитудная, фазовая и импульсная характеристики канала....	523
9.4.8.	Излучения вне полосы	523
9.5.	Определение параметров для наземных сред передачи.....	524
9.5.1.	Точность РЧ.....	524
9.5.2.	Избирательность	524
9.5.3.	Рабочая область АПЧ.....	524
9.5.4.	Фазовый шум внутренних генераторов	525
9.5.5.	Мощность сигнала РЧ/ПЧ	526
9.5.6.	Мощность шума.....	527
9.5.7.	Спектр РЧ и ПЧ.....	528
9.5.8.	Диапазон избирательности / динамический диапазон приемника для гауссова канала	528
9.5.9.	Уровень шума, эквивалентный ухудшению	529
9.5.10.	Определение параметров линейности (подавление выброса)	529
9.5.11.	Эффективная мощность.....	530
9.5.12.	Когерентная интерференционная помеха	530
9.5.13.	Зависимость BER от отношения C/N при изменении мощности передатчика.....	531
9.5.14.	Зависимость BER от отношения C/N при изменении мощности гауссова шума.....	531
9.5.15.	BER до (внутреннего) декодера Витерби	532
9.5.16.	BER до (внешнего) декодера Рида–Соломона	532
9.5.17.	BER после (внешнего) декодера Рида–Соломона.....	533
9.5.18.	Анализ сигналов I и Q	533
9.5.19.	Общая задержка сигнала.....	534
Литература к главе 9		535

Глава 10

Измерения в цифровых системах DVB второго поколения

537

10.1.	Перечень параметров информационных пакетов T2-MI, измеряемых в каналах системы наземного ТВ-вещания второго поколения	537
10.1.1.	Контроль синтаксиса пакетов T2-MI	539
10.1.2.	Проверка пакетов информации модулятора T2-MI	541
10.1.3.	Проверка связности сигнальной информации T2-MI.....	542
10.1.4.	Измерения на транспортном уровне T2-MI	542

10.2. Перечень параметров, измеряемых в каналах системы наземного ТВ-вещания второго поколения	546
10.2.1. Измерения в радиочастотном диапазоне	549
10.2.2. Избирательность	549
10.2.3. Рабочая область АПЧ	550
10.2.4. Фазовый шум внутренних генераторов	550
10.2.5. Мощность сигнала РЧ/ПЧ	550
10.2.6. Отношение мощностей в режиме MISO	551
10.2.7. Мощность шума	551
10.2.8. Спектр РЧ и ПЧ	551
10.2.9. Избирательность приемника / динамический диапазон гауссова канала	551
10.2.10. Определение параметров линейности — подавление вне полосы ..	552
10.2.11. Эффективная мощность	552
10.2.12. Эффективность PAPR	552
10.2.13. Коэффициент ошибок символа P1	553
10.2.14. BER перед (внутренним) декодером LDPC-кода	553
10.2.15. Количество итераций LDPC-кода	554
10.2.16. BER перед (внешним) декодером BCH-кода	554
10.2.17. Коэффициент ошибок в ВВ-кадрах	554
10.2.18. Доля секундных интервалов, содержащих ошибки	554
10.2.19. Анализ сигналов I и Q	555
10.2.20. Синхронизация одночастотной сети	558
10.2.21. Ошибка сигнализации L1	559
10.2.22. Среднеквадратичный разброс случайных задержек	559
10.2.23. Максимальная избыточная задержка	559
10.2.24. Тест проверки соответствия модели буфера приемника	560
10.2.25. Относительный уровень мощности на протяжении фрагмента FEF, не относящегося к символу P1	560
10.3. Перечень параметров, измеряемых в каналах системы кабельного телевизионного вещания второго поколения	560
10.3.1. Измерения в радиочастотном диапазоне	562
10.3.2. Рабочая область АПЧ	563
10.3.3. Фазовый шум внутренних генераторов	563
10.3.4. Мощность сигнала РЧ/ПЧ	564
10.3.5. Мощность шума	564
10.3.6. Спектр РЧ и ПЧ	564
10.3.7. Чувствительность приемника / динамический диапазон для гауссова канала	564
10.3.8. Характеристика линейности / подавление выброса	565
10.3.9. BER перед (внутренним) декодером LDPC	565
10.3.10. Количество итераций декодера LDPC	565
10.3.11. BER перед (внешним) декодером BCH	566
10.3.12. Коэффициент ошибок в кадрах	566
10.3.13. Анализ сигналов I и Q	566
10.3.14. Ошибка сигнализации L1	567
10.3.15. Тест проверки соответствия модели буфера приемника	568



10.4. Перечень параметров, измеряемых в каналах системы спутникового телевизионного вещания второго поколения.....	568
Литература к главе 10	569

Глава 11

Методы оценки качества кодирования звуковой информации

571

11.1. Основные проблемы психоакустики	573
11.1.1. Абсолютный порог слышимости	573
11.1.2. Критические полосы	574
11.1.3. Частотное (одновременное) маскирование	576
11.1.4. Временное (неодновременное) маскирование	577
11.1.5. Кривые равной громкости, фоны, соны	578
11.2. Перцептивная оценка качества звука PEAQ	580
11.2.1. Психоакустическая модель FFT based	583
11.2.2. Психоакустическая модель Filter Bank based	589
11.2.3. Предварительная обработка энергий возбуждения	595
11.2.4. Вычисление параметров MOV	601
11.2.5. Громкость искажений	603
11.2.6. Ширина полосы	606
11.2.7. Отношение шум/маска	607
11.2.8. Вероятность обнаружения	608
11.2.9. Структура ошибочных гармоник	611
11.3. Когнитивная модель	612
11.4. Проблемы совершенствования систем оценки качества кодеров звука	615
11.4.1. Психоакустическая модель	615
11.4.2. Когнитивная модель	616
11.4.3. Мультиканальные метрики	619
11.5. Выравнивание по времени исходного и тестируемого сигналов	620
11.5.1. Методы выделения постоянной задержки в линейных системах	621
11.5.2. Методы выделения переменной задержки	624
11.5.3. Новый метод выделения постоянной задержки	625
11.5.4. Принцип экспериментальных исследований	629
Литература к главе 11	632

Глава 12

Система РАВИС и ее метрологическое обеспечение

636

12.1. Основные требования к разработке системы	636
12.2. Компоненты аудиовизуальной информационной системы	639
12.2.1. Кодер источника	639
12.2.2. Передатчик	642
12.2.3. Приемник	656
12.3. Эффективность аудиовизуальной информационной системы РАВИС	659
12.4. Результаты натурных испытаний и разработки аппаратуры системы РАВИС	665



12.5. Метрологическое обеспечение системы РАВИС	669
12.5.1. Технические требования к основным параметрам системы РАВИС	672
12.5.2. Условия и оборудование для измерений и испытаний передающей и приемной аппаратуры системы РАВИС	673
12.5.3. Измерения основных параметров системы РАВИС	674
12.5.4. Примеры измерений параметров системы РАВИС в радиочастотном диапазоне	698
Литература к главе 12	707

Глава 13

Практическая реализация аппаратуры измерения характеристик и параметров аналоговых и цифровых видеотелевизионных систем	712
--	------------

13.1. Обзор современных средств измерений для решения задач метрологии формирования, передачи и воспроизведения изображений	712
13.1.1. Формирователи видеотелевизионных ИС и ИТ	712
13.1.2. Измерители искажений ТВИС и ЦИС	713
13.1.3. Средства оценки качества изображений	714
13.1.4. Средства анализа ошибок в цифровых ТП	715
13.1.5. Средства контроля процесса воспроизведения видеоданных	716
13.2. Комплексы измерительные телевизионные КИ-ТВМ и КИ-ТВМ-Э	717
13.2.1. Формирование измерительных сигналов и измерение параметров аналогового и аналого-цифрового телевидения	718
13.2.2. Измерение параметров радиосигналов аналоговых и цифровых систем	724
13.2.3. Анализ параметров транспортного потока сигналов цифрового телевидения	728
13.2.4. Формирование измерительных сигналов и анализ параметров сигналов звукового сопровождения	733
13.3. Комплекс измерительный цифрового телевидения КИ-ЦВТ	738
13.3.1. Генератор сигналов SDI	738
13.3.2. Анализатор сигналов SDI	740
13.3.3. Генератор сигналов ASI	741
13.3.4. Анализатор сигналов ASI	742
13.3.5. Анализатор формы сигналов SDI	743
13.4. Комплекс измерительный аудиовизуальной информационной системы КИ-ТВМ-РАВИС	746
13.5. Методы калибровки и поверки измерительных приборов	749
13.5.1. Комплекс измерительный телевизионный КИ-ТВМ-Э	749
13.5.2. Комплекс измерительный телевизионный КИ-ТВМ	757
13.5.3. Комплекс измерительный телевизионный КИ-ЦВТ	757
13.5.4. Комплекс измерительный телевизионный КИ-ТВМ-РАВИС	760
Литература к главе 13	762

@language english @language russian

Существует лишь то, что можно измерить.
Макс Планк

Введение

Метрология видеоинформационных систем предназначена для определения и использования научных и организационных основ, реализации технических средств, норм и правил, необходимых для соблюдения принципа единства и точности измерительных процедур в данной технологической отрасли.

Системный подход к основной функции метрологии — разработке метрологического обеспечения — должен использовать всю совокупность взаимосвязанных процессов, объединенных целью достижения требуемого качества измерений.

В этом плане выделяется ряд работ:

- определение номенклатуры измеряемых параметров в системах формирования, передачи и воспроизведения видео- и аудиоинформации, а также наиболее подходящих норм точности при измерениях и контроле качества продукции и управлении процессами;
- установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и качественных показателей, выбор требований к средствам измерений и контроля, а также обоснование метрологических процессов;
- стандартизация и унификация алгоритмов обработки измерительной информации, технологии контроля и измерений;
- разработка, внедрение и аттестация современных методик выполнения измерений, испытаний и контроля;
- поверка, метрологическая аттестация и калибровка применяемого измерительного, а также испытательного оборудования;
- участие в процессе создания и внедрения международных, государственных, отраслевых стандартов, а также иных нормативных документов, стандартизованных в России;
- подготовка работников соответствующих метрологических служб и подразделений к выполнению контрольно-измерительных процессов.

Внедрение современных мультимедийных систем, осуществляемое во всем мире и в России, как правило, путем постепенной замены отдельных аналоговых звеньев формирования, передачи и приема на цифровые, требует создания новых методик и стандартов их метрологического обеспечения. Качество каналов формирования, передачи и воспроизведения видео- и аудиоинформации оценивалось с помощью стандартных специальных измерительных сигналов и испытательных таблиц.

С появлением цифровых технологий приходится утверждать, что используемые сигналы и таблицы устарели, и возникла необходимость в создании новых измерительных процедур, адекватных используемым системам преобразований

сигналов, разработке новых методик измерений и контроля, тем не менее, совместимых с традиционными.

При этом подлежат решению ряд проблем:

- поскольку при встраивании цифрового звена в тракт передачи видеoinформации требуется выделение из полного цветового ТВ сигнала его яркостной и цветowych составляющих, их аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка и передача, а затем, на выходе этого звена, обратное преобразование, система измерений должна обеспечить оценку качества таких преобразований;
- зачастую до сих пор используют различные системы формирования телевизионных сигналов (SECAM/PAL), различные системы их цифрового кодирования (с компрессией или без нее) и передачи и, наконец, различные системы обратного преобразования и воспроизведения изображений; система измерений должна учитывать эту специфику;
- при применении обработки динамических изображений разработанных систем цифрового кодирования очень хорошо передаются статические изображения, и хуже — изображения, быстро меняющиеся во времени; по этой причине попытки определить качество телевизионных кодеров-декодеров различных фирм с помощью статических таблиц, содержащих миры различного пространственного разрешения, обычно не приводят к положительному результату — разрешение принимаемого сигнала оказывается высоким практически независимо от скорости выходного потока кодера;
- просмотр реального видеоматериала показывает, что кодеры различных фирм отличаются по качеству; при этом наблюдаемые шумы и искажения носят новый характер и не выражаются в старых «аналоговых» терминах, например, таких как разрешение в «числе линий», количество воспроизводимых градаций яркости и др.;
- используемые алгоритмы цифрового преобразования аудиоинформации в принципе не позволяют обеспечить оценку качества передачи информации путем, например, сравнения формы исходных и воспроизводимых сигналов.

Таким образом, несмотря на наличие новых свойств цифровых видеoinформационных систем, при приеме и воспроизведении сигналов возможны и искажения, имеющие не только цифровое, но и аналоговое происхождение. Такие искажения могут быть обусловлены плохим качеством цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей на входе/выходе цифровых кодеров/декодеров, плохим качеством цифровых преобразований сигналов. Поэтому, например, новые телевизионные измерительные сигналы и испытательные таблицы должны быть пригодны не только для испытания качества цифрового кодирования, но и должны содержать в себе элементы старых таблиц для оценки чисто аналоговых искажений.

Следует подчеркнуть, что метрологическое обеспечение испытаний оборудования на этапах его разработки, производства и эксплуатации, являющееся гарантией достижения объективности и достоверности их результатов, имеет исключительное значение для взаимного признания результатов измерений организаций формирования телевизионной информации, ее передачи и приема, а также при международном обмене.

Многообразие используемых методов формирования и передачи телевизионных изображений требует использования метрологического обеспечения как аналоговых и цифровых участков ТВ канала, так и аналого-цифрового канала в целом. Такие системы требуют создания принципиально новых способов измерений и соответствующих контрольных и измерительных средств. При этом необходимо, чтобы эти средства были совместимы и с традиционными аналоговыми системами.

На современном этапе развития техники выполнение требований метрологии связано с использованием персональных компьютеров в качестве устройств анализа и организации структуры систем формирования и обработки измерительной информации.

Современные цифровые системы позволяют гибко настраивать параметры передачи видеoinформации под конкретные требования потребителей и возможности каналов связи, обеспечивая при этом возможности трансляции изображений различного качества при скоростях цифрового потока до десятков и даже сотен мегабит в секунду. Для оценки соответствия качества передаваемой видео- и аудиоинформации требованиям, предъявляемым к ней в различных системах и условиях передачи, а также для сравнения эффективности работы различных устройств их кодирования и передачи, требуются методики и средства субъективной и объективной оценки качества изображений и звукового сопровождения, наблюдаемых потребителем.

Отличительной особенностью цифровых видеoinформационных систем является использование канала связи в качестве «контейнера данных», обеспечивающего передачу различных сигналов (информационных сообщений, одной или более ТВ-программ, данных) по запросу пользователя. Такая система позволяет оператору потока данных в несколько раз увеличить число программ и дополнительных услуг, предлагаемых различным потребителям, без использования дополнительного частотного ресурса.

Широкое практическое использование техники цифровой обработки сигналов — одной из самых динамичных и быстро развивающихся технологий в мире телекоммуникаций и информатизации общества — обеспечивает решение задач обработки, сокращения избыточности сигнала и передачи информации в реальном времени.

Процесс цифровой обработки визуальной информации охватил различные виды видеoinформационных приложений и существенно расширил их спектр: кроме широко распространенного традиционного телевидения и различных экзотических разновидностей ТВ специального назначения появились и повсеместно внедряются самые различные видеоприложения — от видеотелефонии до телевидения высокой и ультравысокой четкости (ТВЧ, ТУВЧ), 3D видеовещания и др.

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) — информатика реального времени — позволяет достичь невиданного доселе уровня качества кодирования изображений, их передачи и приема, и предоставляет пользователю массу новых возможностей и новых видов услуг.

Следует еще раз подчеркнуть, что разработка современных цифровых видеoinформационных систем и их внедрение невозможны без метрологического обеспечения и наличия соответствующей измерительной аппаратуры.

Метрологическое обеспечение содействует оптимизации управления технологическими процессами, поддерживает качество изготовления аппаратуры и экс-

плуатации видеoinформационных систем. При этом затраты на метрологическое обеспечение должны соответствовать масштабам систем формирования, кодирования, передачи и воспроизведения видеoinформации, сложности технологических процессов и, в конечном счете, не только окупаться, но и приносить доход.

И в этом плане обеспечение метрологической безопасности России является залогом создания отечественной высококачественной видеoinформационной аппаратуры и ее эффективного использования.

Материал в настоящей книги, посвященный измерениям в видеoinформационных системах, содержит 13 глав.

В *первой главе* анализируются проблемы метрологического обеспечения и специфические особенности измерений и контроля в видеoinформационных системах, включающих в себя самые последние научные достижения, связанные с совершенствованием ее эталонной базы и способов обработки результатов контроля и измерений. Приведены краткие сведения об основных параметрах измеряемых величин, классификации погрешностей измерений, оценке точностных характеристик средств измерений. Наибольшее внимание уделено специфическим особенностям измерений и контроля в видеoinформационных системах, критериям оценки искажений видеосигналов и специальных измерительных сигналов, алгоритмам обработки измерительной информации.

Рассмотрены важные проблемы повышения точности, устранения различного рода мешающих факторов и существенного сокращения времени измерений путем широко применяемых в прикладной математической статистике методов, основанных на использовании порядковых статистик, а также оценке цикличности измерения параметров сигналов, основанной на гипотезах равенства математических ожиданий или дисперсий в выборках анализируемых параметров.

Во *второй главе* рассмотрены различные форматы динамических изображений, приводится оценка объема информации изображений в основных видах приложений: кроме традиционного аналогового цветного телевидения и телевизионных систем специального назначения внедряются самые различные системы — от видеотелефонии и видеоконференцсвязи до телевидения высокой и сверхвысокой четкости многоракурсных телевизионных систем. При цифровой дискретизации таких изображений объем информации меняется от единиц мегабит до десятков и сотен гигабит в секунду. Современные системы цифрового кодирования видеoinформации позволяют сократить потоков кодированных видеоданных в сотни и даже тысячи раз.

Приводятся сведения об основных параметрах полного цветового сигнала систем аналогового телевидения на видео- и радиочастотах с учетом частичного подавления одной боковой полосы, уменьшении объема информации при непосредственном преобразовании полных цветовых ТВ сигналов в цифровую форму, а также в случаях их разделения на составляющие яркости и цветности. Рассмотрены проблемы оценки качественных показателей телевизионных изображений, зависящие от используемой системы вещания, формы полного цветового ТВ сигнала, качества воспроизводящих устройств.

В *третьей главе* изложены параметры систем цифрового кодирования изображений и систем эфирного, спутникового и кабельного телевизионного вещания, используемых в России.

В настоящее время наряду с улучшением и созданием новых систем сжатия традиционных видеосигналов, снимаемых с одной точки наблюдения, бурно

развивается как стереоскопическое телевидение (бинокулярное или 3D), так и автостереоскопическое или многоракурсное (с несколькими точками наблюдения — до 9–16 видов). Также создано и развивается такое направление, как телевизионные системы с произвольной точкой наблюдения (ТСПН или Free Viewpoint TV — FTV).

Значительные успехи были достигнуты в создании метрик качества, которые лучше оценивают субъективно (перцептуально) воспринимаемое качество. Однако в большинстве случаев эти новые метрики были разработаны при кодировании статических изображений. Сопоставимые результаты для динамических изображений не так развиты. Развитие перцептуально-ориентированных инструментов, которые включали бы временные качественные критерии, является ключевой задачей по улучшению рабочих характеристик систем кодирования видео. Заметим, что эти виды инструментов достаточно хорошо развиты для кодирования звука.

Движущей силой создания стандартов кодирования видеоинформации являются различные приложения и развитие их аппаратного обеспечения. Среди прошлых стандартов можно перечислить H.261, MPEG-1, MPEG-2/H.262, H.263 и MPEG-4 (Part 2). Наиболее эффективными являются стандарты H.264/AVC (MPEG-4, Part 10) и H.265/HEVC (MPEG-H, Part 2). К этим стандартам принимаются дополнения по кодированию масштабируемого видео (SVC — scalable video coding), кодированию многоракурсного видео (MVC — multiview video coding) и реконфигурируемого кодирования видео.

Необходимо отметить, что стандарт H.265/HEVC при высоком качестве кодирования обеспечивает формирование информационного потока при величине порядка 0,1 бит на пиксел изображения. Это означает, что при кодировании стандартного ТВ сигнала (720×576 пикселей на кадр, 25 кадров в секунду, 8×3 бит на пиксел) удастся сформировать потоке данных менее 1,5 Мбит/с, а при кодировании сигнала ТВЧ — менее 5 Мбит/с.

Отдельный раздел третьей главы посвящен методам мультиплексирования цифровых потоков: транспортного потока MPEG-TS и обобщенного инкапсулированного потока GSE.

Одними из важных и сложных задач стандартизации цифрового телевизионного вещания явились задачи использования эффективных методов передачи мультиплексированных цифровых потоков по наземным, спутниковым и кабельным системам связи.

В частности, цифровое телевизионное вещание в Европе основано на очень успешной серии стандартов DVB. Частотные распределения согласованы в рамках Международного союза электросвязи (ITU), в то время как сами сети вещания реализуются в соответствии с национальными спецификациями.

Особое внимание уделено требованиям к параметрам наземных, спутниковых и кабельных DVB-систем связи, которые необходимо контролировать непосредственно в процессе телевизионного вещания.

Четвертая глава посвящена вопросам анализа искажений стандартных измерительных сигналов при их преобразовании в цифровую форму и синтеза новых сигналов для оценки аналоговых и цифровых видеоинформационных систем.

Несопряженность спектров стандартных измерительных сигналов, предназначенных для оценки импульсных, переходных и частотных характеристик, с полосой пропускания каналов связи приводит к существенным искажениям при их дискретизации с последующим восстановлением. Неприятность еще связа-

на с тем, что форма восстановленных сигналов существенно зависит от взаимного положения дискретизируемых сигналов и дискретизирующих импульсов. Проведенный анализ таких искажений стандартных телевизионных измерительных сигналов привел к выводу о невозможности их использования в системах с аналого-цифровым преобразованием.

Сигналы, синтезированные путем минимизации мощности спектра вне пределов заданной полосы частот и близкие по форме стандартным измерительным сигналам, позволили решить одну из важнейших задач разработки методов высокоточных измерений качественных показателей аналого-цифровых каналов передачи видеoinформации.

На базе предложенных критериев оптимальности созданы варианты модернизированных сигналов для оценки импульсных, переходных и частотных характеристик, практически не обладающих указанными системными искажениями.

Рассмотрены алгоритмы синтеза сигналов, форма которых с точностью до размерного множителя практически совпадает с формой огибающей их спектра. Такие сигналы практически ограничены как по спектру, так и по длительности. Предложены варианты симметричных и кососимметричных сигналов, проанализированы зависимости искажений таких сигналов от искажений АЧХ и ФЧХ каналов связи.

Весьма важной проблемой при реализации систем коллективного приема и кабельного телевидения является измерение параметров эхо-радиосигналов. Визуальное восприятие такой помехи зависит от ее величины, задержки эхо-сигнала относительно основного сигнала, а также от разности фаз несущих основного и эхо-сигнала.

Показана эффективность использования для целей таких измерений сигналов, практически финитных по времени и спектру, ограниченному шириной частично подавленной боковой полосы. Разработана структурная схема анализатора величины и задержки эхо-сигналов, проанализированы параметры относительно удаленных и ближних эхо-сигналов, приведены номограммы зависимостей их значений от уровней и задержек.

Используемый в аналоговых системах метод передачи видеoinформации с частичным подавлением одной боковой полосы также приводит к специфическим системным искажениям измерительных сигналов, что особо проявляется как при применении линейного детектора, так и при неточной синхронизации работы синхронного детектора.

Достаточно подробно проанализированы искажения измерительных сигналов для оценки импульсных, переходных, частотных характеристик, анализа различия усиления и расхождения во времени сигналов яркости и цветности и контроля нелинейных характеристик: дифференциального усиления и дифференциальной фазы.

В *пятой главе* рассмотрены проблемы создания высокоточных алгоритмов обработки сигналов и различного рода помех при оценке параметров видеoinформационных систем.

Эффективность обработки измерительных сигналов определяется способностью используемых алгоритмов существенно уменьшить влияние на результаты измерений различного рода помех. Приведены зависимости оптимального уменьшения дисперсии помехи от величины интервала обработки сигнала при

различных формах спектра помехи, указаны ограничения к длительности анализируемого постоянного уровня сигнала.

Одна из проблем фильтрации помехи, аддитивно сложенной с видеоимпульсами, возникает при измерении размахов сигналов в области их установившихся значений. Проанализированы условия оптимальной несмещенной дискретной и непрерывной фильтрации сигнала на заданном временном интервале, разработаны структурные схемы оптимальных фильтров.

Проанализированы зависимости оптимального уменьшения дисперсии помехи от величины интервала обработки сигнала при различных формах спектра помех и на их базе приводятся требования к длительности этого интервала.

Значительное количество качественных показателей канала связи определяется уровнями, на которых располагаются характерные точки быстроизменяющихся на интервале обработки измерительных сигналов (экстремальные значения, переходы через уровень нулевого потенциала и др.).

Процесс оценки уровней характерных точек, расположенных в экстремумах измерительных сигналов, связан с поиском их положения и определением размахов сигналов в этих точках. При наличии помех стандартные методы, такие, например, как метод дихотомии, чисел Фибоначчи, золотого сечения и др., оказываются неэффективными и характеризуются большими временными затратами.

Поиск экстремумов с применением алгоритмов стохастической аппроксимации, например, метод Роббинса-Монро или процедура Кифера-Вольфовица, обладает также рядом недостатков, связанных с зависимостью поиска не только от формы сигнала в области его обработки, но и от величины его экстремального значения, невозможностью применения в случае, если сигнал на интервале обработки имеет несколько экстремумов.

Этих недостатков лишен предложенный авторами метод цифровой фильтрации, с использованием которого выбирается необходимый шаг дискретизации, определяются значения коэффициента подавления дисперсии помехи и коэффициенты взвешивания отсчетов сигнала.

На основе анализа различных видов измерительных сигналов предложено использование эффективных алгоритмов обработки сигналов и результатов измерений.

Отдельный раздел пятой главы посвящен измерениям отношения сигнала к эффективному напряжению флуктуационных и синусоидальных помех по дискретной выборке их отсчетов в статических и динамических сигналах цветного телевидения.

Шестая глава посвящена анализу спектров сигналов на ограниченном интервале времени при наличии различного рода помех с использованием оконных функций. Основной задачей обработки сигналов с использованием оконных функций является измерение их параметров, определяющих составляющие этих сигналов, обычно при наличии различного рода помех. Окна влияют на многие показатели преобразования гармонической информации, в том числе на их обнаружение, разрешение, динамический диапазон, степень достоверности и реализуемости вычислительных операций.

Приведены сведения о параметрах основных классических оконных функций, конструкций окон в виде произведений, сумм и сверток простых функций, а также реализаций с применением некоторых критериев оптимальности.

Особенное внимание уделено анализу оконных функций Дольфа–Чебышева, основанных на использовании полиномов Чебышева первого рода n -го порядка, обладающих равенством амплитуд всех боковых лепестков спектра и разработанных для анализа дискретных сигналов, спектр которых обладает свойством периодичности. Показано, что нормированные спектральные функции окон Дольфа–Чебышева тождественно определяются конечным числом косинусоидальных функций.

Уровни боковых лепестков могут быть существенно уменьшены путем модернизации спектра оконной функции Дольфа–Чебышева в соответствии с соотношением $F_m(y) = (2F(yn) + F(yn + 2) + F(yn - 2))/4$, где $F(yn)$ — нормированный спектр окна Дольфа–Чебышева n -го порядка (Дворкович В.П., Дворкович А.В. Новые методы расчета оконных функций Дольфа–Чебышева, Барсилона–Темеша и их модификаций // Радиотехника и электроника. — 2015. — Т. 60, № 4. — С. 369–385.).

Аналогичная ситуация имеет место с окнами Барсилона–Темеша, основанными на применении полиномов Чебышева первого и второго рода n -го порядка и реализации алгоритма минимизации энергии спектральных составляющих, заданных вне полосы главных лепестков спектральных функций. Также показано, что нормированные спектральные функции окон Барсилона–Темеша тождественно определяются конечным числом косинусоидальных функций.

Уровни боковых лепестков могут быть существенно уменьшены путем модернизации спектра оконной функции Барсилона–Темеша в соответствии с приведенным выше соотношением, если $F(yn)$ — нормированный спектр окна Барсилона–Темеша n -го порядка.

В данной главе также рассмотрены новые методы синтеза оконных функций с применением алгоритмов минимизации спектральных составляющих вне пределов заданного частотного интервала, показано, что большинство классических окон определяются именно таким способом.

Другой вариант синтеза оконных функций основан на минимизации различий формы окна и огибающей его спектра, позволяющих реализовать существенное подавление боковых лепестков. Рассмотрены также варианты расчета оконных функций путем максимизации скорости спада уровней боковых лепестков спектра, перемножения форм или спектров различных оконных функций. Приведены таблицы коэффициентов разложения и параметров оконных функций, разработанных с использованием предложенных алгоритмов.

В заключение в этой главе рассмотрены проблемы выбора оконных функций при цифровой обработке сигналов.

В *седьмой главе* излагаются основные параметры и методы измерения интерфейсов в цифровых видеоинформационных системах. Рассмотрены параллельные интерфейсы SPI при цифровом преобразовании компонентного и композитного сигналов, цифровые последовательные интерфейсы SDI, синхронные SSI и асинхронные ASI последовательные интерфейсы, высокоскоростные интерфейсы IEEE-1394. Анализируются основные виды искажений цифровых сигналов, проявляющихся в виде различных типов джиттера, которые можно характеризовать смещением временных и амплитудных положений переходов относительно номинальных величин, определяемых идеальным положением уровней сигнала и точной синхронизацией. Джиттер вызывается амплитудными и фазовыми по-

межами как внутреннего, так и внешнего происхождения, и имеет различные параметры в зависимости от причин и источников его возникновения.

Приведена подробная классификация видов джиттера. Применяемые методы наблюдения, анализа и измерения джиттера позволяют прояснить его происхождение, найти причины джиттера и определить пути для его уменьшения или устранения.

В *восьмой главе* рассмотрены вопросы измерения искажений сигналов и изображений в цифро-аналоговых видеотрансмиссионных системах. Приводится перечень параметров и качественных показателей аналоговых, аналого-цифровых и цифровых систем и их влияние на качество воспроизводимых изображений.

Особое внимание уделено описанию искажений изображений, возникающих при MPEG-подобных преобразованиях, обладающих большой гибкостью, позволяющих менять целый ряд параметров, от которых существенно зависит качество передачи.

Приводится подробное описание характерных искажений в аналоговых, аналого-цифровых и цифровых системах формирования изображений, важный раздел посвящен описанию перечня искажений в MPEG-подобных системах и их влиянию на качество изображений, поясняемое соответствующими иллюстрациями. Рассматриваются специальные тестовые последовательности для анализа искажений при таких преобразованиях.

Для объективного анализа характеристик каналов, например, SECAM-MPEG-SECAM или PAL-MPEG-SECAM, могут быть использованы стандартные и модифицированные измерительные сигналы в составе испытательных таблиц и в том случае, когда в цифровом звене телевизионные сигналы кодируются со значительным устранением избыточности информации, т.е. с учетом перемещения движущихся элементов изображения, как это предусмотрено MPEG-стандартами. Даны также описания динамических испытательных таблиц, используемых и для субъективного контроля искажений в аналого-цифровых системах видеовещания.

Отдельный раздел этой главы посвящен перечню и анализу параметров цифрового транспортного потока MPEG-2. Непрерывный или периодический мониторинг транспортного потока (ТП) MPEG-2 осуществляется по ряду параметров (индикаторов), объединенных в три таблицы по важности их влияния на качество передаваемой информации. В таблицах приведены номенклатура основных параметров высшего приоритета, необходимых для обеспечения возможности декодирования ТП, а также измеряемых индикаторов (параметров) второго и третьего приоритета.

Рассмотрены вопросы визуализации параметров кодирования видеотрансмиссионной информации в соответствии со стандартами H.264/AVC и H.265/HEVC.

Девятая глава посвящена измерениям в цифровых системах DVB первого поколения — DVB-T, DVB-S и DVB-C, в которых определены основные требования к различным передающим средствам спутникового, кабельного, наземного и других видов передачи информации. Каждый основополагающий системный стандарт определяет схемы канального кодирования и модуляции для соответствующих передающих средств. Мультиплексирование кодированных источников информации для систем DVB первого поколения осуществляется в соответствии со стандартом MPEG-2.

Оценка производительности и качества сервиса производится с помощью комплекса параметров, связанных с ТП MPEG-2, доступного в определенных условиях приема.

Приводятся упрощенные структуры передающих и приемных устройств спутниковых и кабельных, а также наземных сред телевизионного вещания с указанием точек измерения. Даны таблицы общих параметров и специфических параметров спутниковых и кабельных сред передачи, а также параметров эфирной среды передачи. Даны определения и методы оценки этих параметров.

Десятая глава посвящена особенностям измерений в системах цифрового телевидения DVB второго поколения — DVB-T2, DVB-C2 и DVB-S2. При анализе параметров этих систем применяются также основные методы измерений, изложенные в девятой главе. Наибольшее внимание уделено вопросам измерения типичной сети стандарта DVB-T2, включающей систему формирования информационных пакетов T2-MI и структуры передающих и приемных устройств с соответствующим перечнем точек контроля и измерений.

Основной материал *одиннадцатой главы*, в котором изложены методы оценки качества современных систем кодирования звуковой информации, составлен талантливым научным сотрудником А.А. Егоровым.

Материалы данной главы содержат достаточно подробные сведения о проблемах психоакустики.

Рассмотрены две версии перцептивной оценки качества звука PEAQ: базовая версия (FFT based), имеющая только одну периферийную психоакустическую модель, определяемую одиннадцатью параметрами, и продвинутая версия (Filter Bank based), характеризующаяся только пятью параметрами. Базовая версия используется в приложениях, где приоритетным критерием является вычислительная эффективность. Продвинутая версия, обеспечивающая более точную оценку по сравнению с базовой, требует в четыре раза больше вычислений и используется в приложениях, где точность крайне важна.

Рассмотрены проблемы совершенствования систем оценки качества кодирования аудиоинформации PEAQ, связанные с разработкой новой психоакустической модели, в которой исходный и тестируемый сигналы выравниваются по времени и разделяются на 35 критических полос, моделирующих поведение базиллярной системы. Корреляция между субъективными и объективными оценками показывает, что модифицированная базовая версия PEAQ превосходит существующий стандарт PEAQ на сигналах кодеков среднего и низкого качества. Предложенная метрика показала лучшую корреляцию для всех типов искажений. При этом она не использует многослойную перцептронную нейронную сеть в своей когнитивной модели. Вместо этого вычисляется коэффициент взаимной линейной корреляции между внутренними представлениями исходного и тестируемого сигналов. Рассмотрены также оценки качества кодирования мультиканального звукового сигнала.

Двенадцатая глава посвящена описанию аудиовизуальной информационной системы реального времени РАВИС и ее метрологическому обеспечению (Дворкович А.В., Дворкович В.П., Иртюга В.А. Цифровое мобильное ТВ из России // Стандарт, № 6 (137), июнь 2014, с. 34–37). Важнейшим стимулом реализации системы РАВИС является утверждение в 2011 году отечественного стандарта (ГОСТ Р 54309–2011), в котором определены параметры формирования кадровой струк-

туры, канального кодирования и модуляции для системы цифрового наземного узкополосного мультимедийного вещания в ОВЧ-диапазоне.

Нормы на основные параметры оборудования системы РАВИС и методы их измерения при испытаниях и эксплуатации устанавливает отечественный стандарт ГОСТ Р 55689–2013 и ряд международных документов. Приведены функциональные схемы передающей и приемной частей системы РАВИС, на которых указаны точки контроля и измерений ее основных характеристик, дан перечень измеряемых параметров и методы их анализа.

Специфический подход реализован при анализе сигналов I и Q системы. Алгоритмы анализа звездной диаграммы, определяют взаимную зависимость измеряемых параметров что не позволяет установить независимые допуски на их изменения. По это причине принята определенная последовательность измеряемых параметров, изменяющих усредненное значение отсчетов относительно заданного центра созвездия в каждой ячейке, и последовательное устранение геометрических искажений звездной диаграммы (Дворкович В.П., Дворкович А.В. Анализ параметров I/Q -сигналов в системах цифрового телевидения // Измерительная техника. — 2015. — № 2. — С. 56–60).

Изложенный в двенадцатой главе материал составлен совместно с к.т.н. В.А. Иригойой и к.т.н. В.Т. Басием.

Последняя, *тринадцатая глава* посвящена проблемам практической реализации контроля и измерений характеристик и параметров цифровых видеотелевизионных систем. Приводится подробный обзор современных отечественных и зарубежных средств формирования измерительных сигналов и испытательных таблиц, анализаторов искажений и контроля формы видео- и радиосигналов систем вещания, средств оценки качества воспроизведения изображений, систем анализа цифровых транспортных потоков и цифровых видеотелевизионных сетей, средств контроля процесса воспроизведения видеоданных.

Основное внимание уделено разработке отечественных измерительных телевизионных комплексов КИ-ТВМ, КИ-ТВМ-Э, КИ-ЦВТ (Свидетельства об утверждении типа средств измерений RU.C.35.002.A №№ 57903-57905 от 26.02.2015), а также КИ-ТВМ-РАВИС.

Измерительный комплекс КИ-ТВМ реализует функции формирования измерительных сигналов и испытательных таблиц аналогового, аналого-цифрового и цифрового телевидения, измерения параметров радиосигналов аналоговых и цифровых систем, анализа параметров транспортных потоков цифровых систем.

При этом реализуются виртуальные осциллографические системы, анализаторы спектра, измерители частотных характеристик радиопередающих средств, архиваторы данных контроля и измерений.

Комплекс КИ-ТВМ-Э (Эталон) отличается от КИ-ТВМ существенно более высокой точностью измерений и реализует метрологическую поддержку телевизионной измерительной аппаратуры.

Измерительный комплекс цифрового телевидения КИ-ЦВТ реализует виртуальный генератор формирования эталонных сигналов SDI и ASI и измеритель их параметров, обеспечивает осциллографические измерения сигналов, в том числе анализ глазковой диаграммы и графических представлений джиттера, а также спектров сигналов.



Комплекс системы КИ-ТВМ-РАВИС реализует измерения параметров радиосигналов системы цифрового вещания РАВИС в I и II полосах ОВЧ-диапазона частот (65,8–74,0 МГц и 87,5–108,0 МГц). Этот комплекс также реализует ряд виртуальных приборов и обеспечивает прием и демодуляцию сигналов системы РАВИС, определение вида модуляции и скорости кодирования, построение диаграммы созвездия принимаемого сигнала, анализ всех видов искажений сигналов I и Q системы РАВИС, измерения АЧХ и ГВЗ принимаемого радиосигнала.

Глава 13 написана совместно с к.т.н. В.Т. Басием, к.т.н. Д.Г. Макаровым и В.В. Нечепавым. Программная реализация рассмотренных измерительных комплексов осуществлена к.т.н. Д.Г. Макаровым.

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И КОНТРОЛЕ В ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

I.1. Метрологическое обеспечение и специфические особенности измерений и контроля в видеоинформационных системах

Разработка научных основ новых цифровых технологий кодирования, передачи и воспроизведения аудиовизуальной информации непосредственно связана с созданием эталонов и средств измерений, охватывающих большое количество физических величин, требующих расширения диапазонов измерений и повышения их точности.

В таких условиях, чтобы разобраться с вопросами и проблемами измерений, метрологического обеспечения и обеспечения единства измерений, нужна разработка новых методов и измерительных систем на базе действующих стандартов и технических регламентов. Единым научным и законодательным фундаментом, обеспечивающим в практической деятельности высокое качество измерений, является **метрология видеоинформационных систем (ВС)**, впитывающая в себя самые последние научные достижения, что выражается в совершенствовании ее эталонной базы и способов обработки результатов измерений.

Понятие метрологии приобрело в последнее время более широкий научный и практический смысл, расширилось содержание метрологической деятельности по **метрологическому обеспечению разработок, производства и эксплуатации систем и средств формирования и передачи аудиовизуальной информации.**

Метрологическое обеспечение при этом распространяется на утверждение и применение метрологических норм, правил и методик выполнения измерений, а также разработку, изготовление и применение технических средств для обеспечения единства и требуемой точности измерений [1.1, 1.2].

Условно различают три раздела метрологии: теоретическая, законодательная и прикладная.

Теоретическая метрология связана с изучением проблем измерений в целом и определяющих процесс измерения элементов: средств измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и др. Важным понятием теоретической метрологии является единство измерений — состояние измерительного процесса, при котором результаты всех измерений выражаются в одних и тех же узаконенных единицах измерения, и оценка их точности обеспечивается с гарантированной доверительной вероятностью.

Законодательная метрология разрабатывает и внедряет нормы и правила выполнения измерений, устанавливает требования, направленные на обеспечение единства измерений, порядок разработки и испытаний средств измерений, устанавливает термины и определения в области метрологии, единицы физических величин и правила их применения, создавая нормативную базу для взаимного признания результатов измерений.

Прикладная (практическая) метрология предназначена для реализации научных и юридических аспектов метрологии как науки и специфической деятельности и решает вопросы практического применения разработок теоретической и положений законодательной метрологии. И именно с ее помощью осуществляется метрологическое обеспечение разработок, производства и эксплуатации систем и аппаратуры их реализации.

Для разработчиков, промышленных предприятий и пользователей средств измерений в рамках национальной системы измерений прикладной интерес представляет часть метрологического обеспечения, связанная с деятельностью метрологических служб, которые, в основном, включают:

- анализ состояния измерений;
- установление рациональной номенклатуры измеряемых величин и использование средств измерений (рабочих и эталонных) соответствующей точности;
- проведение поверки и калибровки средств измерений;
- разработку методик выполнения измерений для обеспечения установленных норм точности;
- проведение метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации;
- внедрение необходимых нормативных документов (государственных, отраслевых, фирменных);
- аккредитацию на техническую компетентность;
- проведение метрологического контроля, частью которого является метрологический надзор.

Метрологическое обеспечение должно содействовать оптимизации управления технологическими процессами, стабилизировать процессы, поддерживать качество изготовления продукции. При этом затраты на метрологическое обеспечение производства должны соответствовать масштабам производства, сложности технологических циклов и в конечном счете не только окупаться, но и приносить доход.

Задачей измерений и контроля в аналоговых и цифровых ВС является получение количественных и качественных оценок свойств физических процессов, реализующих, например, специфические особенности создания передачи, преобразования, распределения и воспроизведения программ телевизионного (ТВ) вещания [1.3–1.10].

Область измерений ВС охватывает вопросы, связанные со светотехническими, колориметрическими и радиотехническими измерениями. С помощью светотехнических и колориметрических измерений осуществляется оценка характеристик источников света, передаваемого и воспроизводимого изображений, а также процессов преобразования свет–сигнал и сигнал–свет.

При оценке качества преобразования свет–сигнал часто пользуются специальными испытательными изображениями и методами измерений, которые позволяют определять основные характеристики таких преобразователей в реальных условиях их работы в передающих видеокамерах. Для определения потенциальных возможностей преобразователей сигнал–свет применяются формируемые электрическим способом сигналы, с помощью которых можно оценить качество воспроизведения параметров мелких и крупных деталей изображения (яркость, цветность, контраст, четкость и т.д.).

В настоящей книге наибольшее внимание уделено специфическим радиотехническим измерениям, применяемым в цифровых ВС. Физические причины возникновения искажений изображений связаны с инерционностью и нелинейностью характеристик канала передачи сигналов, их преобразования в цифровую форму, сжатия аудиовизуальной информации, с возникновением аддитивных и мультипликативных помех.

Обычно искажения, обусловленные влиянием различных физических свойств и алгоритмов кодирования (инерционностью, нелинейностью, сокращением избыточности передаваемой информации, возникновением фоновых, флуктуационных помех и др.), измеряют и контролируют различными способами независимо друг от друга. В зависимости от источника измерительной информации большинство методов измерений в канале передачи сигнала ВС можно подразделить на две основные группы.

К первой группе можно отнести методы, использующие в качестве источника измерительной информации сам сигнал ВС. Измерение основных параметров такого сигнала имеет особое значение ввиду того, что режим работы канала передачи информации зачастую существенно зависит от временных и амплитудных соотношений составляющих сигнала ВС.

Ко второй группе относятся методы, основанные на использовании специальных измерительных сигналов, наиболее чувствительных к данному виду искажений. Для нормального функционирования канала передачи информации структура специальных измерительных сигналов часто соответствует структуре сигнала ВС. Установление однозначного соответствия между искажениями специальных измерительных сигналов и сигналов реальных изображений достигается выбором их формы.

1.1.1. Виды искажений измерительных сигналов

Измерение — это процесс сравнения данной физической величины с другой однородной физической величиной, принятой за единицу сравнения. Это сравнение приводит к результату измерения, выражаемому в виде именованного числа, совокупности чисел, графика. Зависимость между значением измеренной величины X и значением величины x_0 , принятой за единицу сравнения, выражается равенством

$$X = R x_0, \quad (1.1)$$

которое называется основным уравнением измерения. В этом уравнении отвлеченное число R показывает, в каком соотношении находятся результат измерения X и величина x_0 . Один и тот же результат измерения может быть представлен различными числовыми значениями, зависящими от выбора единицы сравнения,

определяющей наименование величины X (вольты, милливольты, проценты, биты и т.д.).

По характеру исполнения все измерения разделяются на прямые и косвенные. При прямых (непосредственных) измерениях искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных, результат измерения получают согласно основному уравнению (1.1). При косвенных измерениях значение измеряемой величины получают путем ее вычисления как функции одного или нескольких результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной формулой вида $Q = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, где $x_1, x_2, \dots, x_m$ — величины, измеренные прямыми методами (например, различие фаз синусоидальных колебаний определяют по размаху сигнала на выходе фазового детектора).

В практических приложениях измерения также делят на необходимые и дополнительные. Необходимые измерения позволяют получить только один результат прямого или косвенного измерения данной физической величины. Дополнительные (избыточные) измерения, совместно с необходимыми, обеспечивают получение двух и более результатов измерения данной физической величины. Дополнительные измерения имеют существенное значение в измерительной технике и дают возможность получения таких приближенных значений измеряемой величины, которые в общем случае оказываются значительно ближе к истинной величине, чем отдельно взятый необходимый результат измерения.

В связи с тем, что к каналу передачи сигналов ВС предъявляются требования воспроизведения их формы, целью измерений в данном случае является определение искажений передаваемого сигнала. Можно считать, что искажения отсутствуют (система передачи идеальна), если в процессе передачи сигнала $u_1(t)$ изменяются только его масштаб (линейное усиление или ослабление), задержка во времени и постоянная составляющая, т.е. на выходе идеального канала передачи появляется сигнал

$$u_{2\text{ ид}}(t) = k \cdot u_1(t - \tau) + U_-, \quad (1.2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, τ — задержка во времени, U_- — постоянная составляющая.

В случае если канал передачи информации не является идеальным, на его выходе возникает сигнал

$$u_2(t) = A\{u_1(t)\}, \quad (1.3)$$

где A — некоторый оператор, определяемый характеристиками и параметрами канала передачи.

Например, если канал нелинеен и безынерционен, то

$$u_2(t) = f[u_1(t)], \quad (1.4)$$

где $f[\cdot]$ — нелинейная амплитудная характеристика канала.

Для канала, обладающего лишь линейными искажениями,

$$u_2(t) = \int_0^{\infty} u_1(t - \tau) h(\tau) d\tau, \quad (1.5)$$

где $h(\tau)$ — импульсная реакция канала.

Если на передаваемый сигнал воздействуют мультипликативная $c(t)$ и аддитивная $\xi(t)$ флуктуационные помехи, то

$$u_2(t) = c(t)u_1(t) + \xi(t). \quad (1.6)$$

Таким образом, сигнал на выходе канала $u_2(t)$ можно разделить на полезный идеальный сигнал $u_{2\text{ ид}}(t)$ и искажения

$$\Delta u(t) = u_2(t) - u_{2\text{ ид}}(t). \quad (1.7)$$

Критерием отличия сигнала на выходе канала от идеального может служить любой неотрицательный функционал $F\{u_2(t), u_{2\text{ ид}}(t)\}$, обращающийся в нуль при $u_2(t) \equiv u_{2\text{ ид}}(t)$.

1.1.2. Критерии оценки искажений измерительных сигналов

Выбор формы входного сигнала, а также критерия оценки его искажений характеризуют метод измерения того или иного параметра, диапазон измеряемых величин, чувствительность, разрешающую способность и точность измерений.

Диапазон измеряемых величин определяется минимальным X_{MIN} и максимальным X_{MAX} значениями данного параметра, которые могут быть измерены с заданной точностью.

Чувствительность — это отношение приращения показаний измерительного прибора к вызвавшему его приращению измеряемой величины.

Разрешающая способность — это минимальная разность двух значений измеряемых однородных величин, которая может быть различима измерителем.

Под **точностью измерения**, следуя К.П. Широкову, обычно понимают качество измерения, характеризующее близость его результата к действительному значению измеряемой величины. Это на первый взгляд верное определение с научной точки зрения не выдерживает критики. Величина уклонения результата измерения от истинной величины не может быть критерием точности измерений по следующим причинам:

- во-первых, истинная измеряемая величина, а вместе с тем и уклонение результата измерения, как правило, неизвестны;
- во-вторых, данное конкретное уклонение результата измерения порождается случайным стечением обстоятельств, связанных с условиями измерений, и может оказаться «большим» при измерениях весьма тщательных и «малым» при грубых измерениях.

Поэтому под точностью измерений мы понимаем **степень доверия** к получаемому результату измерений в данных конкретных условиях их проведения. Если результаты измерений получены в одинаковых условиях, их считают равноточными (разумеется, одним и тем же наблюдателем, с помощью одного и того же средства измерений). Количественная оценка точности измерений осуществляется по величинам систематических и случайных ошибок (погрешностей) измерений.

В отличие от измерений, контроль — это процесс, заключающийся в отнесении контролируемой величины X_0 к той или иной из ряда качественно различаемых областей, на которые разбита вся область измерения величины X . В простейшем

случае область измерения величины X разбивается на два интервала, разделяемых граничной точкой $X_{\text{доп}}$, а результат контроля в этом случае представляет собой логическое заключение, например «больше» — «меньше», «в норме» — «не в норме» и т.д.

Сравнивая операции измерения и контроля, можно сказать, что один и тот же преобразователь можно рассматривать и как измерительное устройство, и как устройство контроля. Это зависит от того, производится ли отсчет его показаний в именованных единицах, соответствующих физической природе объекта измерения, или в условных числах, которым не придается иного смысла, кроме номера интервала шкалы, в пределах которого находится контролируемая величина. Самые общие подходы к проблемам измерений и контроля рассмотрены в работах А.С. Бондаревского.

1.2. Краткие сведения о погрешностях измерений и контроля

Практически при любой степени совершенства метода измерения, точности измерительных приборов, тщательности выполнения измерительных операций результат измерения отличается от действительного (истинного) значения измеряемой величины. Это — следствие ошибок или погрешностей измерения.

Влияние различных погрешностей приводит к тому, что многократно снятые характеристики прибора или серии однотипных приборов занимают на графике зависимости результатов измерений от измеряемой величины некоторую полосу. Поэтому в теории измерений может быть принято понятие *полосы неопределенности*, или *полосы погрешностей*, данного типа для данного экземпляра прибора. Некоторая детерминированная средняя линия этой полосы (рис. 1.1) принимается за *номинальную характеристику* приборов этого типа, указывается в паспорте прибора и используется для определения результатов измерения [1.11].

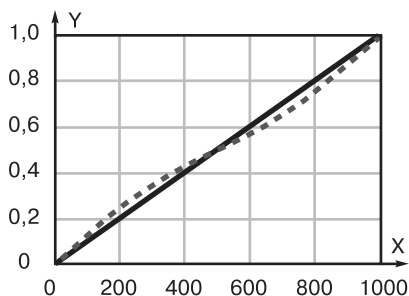


Рис. 1.1. Реальная (пунктирная линия) и номинальная (сплошная линия) характеристики прибора

Более информативными являются графики зависимостей разности множества результатов измерений и его линейной регрессии и сглаженной разности множества результатов измерений в *полосе неопределенности* и его линейной регрессии от измеряемой величины. Примером таких зависимостей могут служить графики, характеризующие нелинейность амплитудной характеристики (АХ) современного генератора ТВ измерительных сигналов (ТВ ИС), приведенные на рис. 1.2.

По способу выражения различают три разновидности погрешностей:

- **абсолютную погрешность** Δx , представляющую собой разность между результатом измерения X и действительным значением измеренной физической величины X_0 , т.е.

$$\Delta x = X - X_0 \quad (1.8)$$

(за действительное принимают значение, измеренное эталонным прибором или найденное теоретическим путем);

- **относительную погрешность** δx , определяемую при $X_0 \neq 0$ соотношением

$$\delta x = \Delta x / X_0; \quad (1.9)$$

поскольку результат измерения X обычно мало отличается от действительной величины X_0 , на практике относительную погрешность при $X_0 \neq 0$ характеризуют соотношением

$$\delta x = \Delta x / X; \quad (1.10)$$

- **приведенную погрешность** $\delta x_{\text{п}}$, характеризуемую отношением абсолютной погрешности к разности максимального X_{MAX} и X_{MIN} минимального значений шкалы измеряемых величин

$$\delta x_{\text{п}} = \Delta x / (X_{\text{MAX}} - X_{\text{MIN}}). \quad (1.11)$$

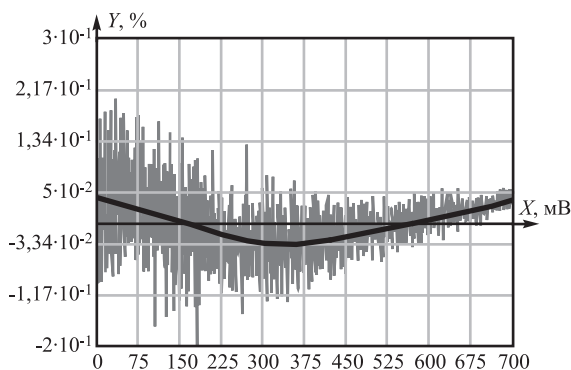


Рис. 1.2. Область неопределенности амплитудно-частотной характеристики

Обычно относительную и приведенную погрешности выражают в %:

$$\delta x = (\Delta x / X) \times 100\%; \quad \delta x_{\text{п}} = (\Delta x / (X_{\text{MAX}} - X_{\text{MIN}})) \times 100\%. \quad (1.12)$$

Относительная и приведенная погрешности могут быть рассчитаны, если известна абсолютная погрешность измерений (и наоборот).

Поэтому, если специально не оговорено, в дальнейших рассуждениях используется только понятие абсолютной погрешности. Соответственно условиям эксплуатации средств измерения (СИ) различают **основную погрешность**, которая имеет место при нормальных условиях (в технических условиях на СИ строго оговаривается, какие условия являются нормальными; при этом указывается окружающая температура, относительная влажность, атмосферное давление, напряжение и частота питающей сети, условия согласования с источником сигнала и нагрузкой, входная и выходная мощности и т.д.), и дополнительные погрешности, каждая из которых вызывается отклонением условий эксплуатации от нормальных или воздействием какого-либо внешнего фактора [1.12, 1.13].

СИ обычно характеризуют предельно допустимой основной погрешностью.

Класс точности СИ — это характеристика, определяющая гарантированные границы основных и дополнительных погрешностей, а также другие свойства СИ, влияющие на точность. ГОСТ 8.401–80 [1.14] устанавливает общие положения деления СИ на классы точности, способы нормирования метрологических

характеристик, комплекс требований к которым зависит от класса точности СИ, и обозначения классов точности.

ГОСТ 8.009–84 [1.15] устанавливает номенклатуру метрологических характеристик (МХ), правила выбора комплексов нормируемых МХ (НМХ) для конкретных типов средств измерений и способы нормирования МХ в нормативно-технических документах (НТД) на СИ.

В тех случаях, когда погрешность измерения не постоянна в диапазоне измеряемых величин, ее часто выражают в виде двух слагаемых. Одно из них, имеющее одно и то же предельное значение в диапазоне измеряемых величин, называют **аддитивной** составляющей погрешности (для стрелочных приборов — погрешностью нуля). Другое слагаемое, имеющее предельное значение, линейно возрастающее с ростом измеряемой величины X и вызываемое изменением коэффициента преобразования, называют **мультипликативной** составляющей погрешности (погрешностью чувствительности). При наличии таких составляющих погрешность нормируют двучленной формулой:

$$\Delta x_{\text{пр}} = \pm(\Delta a + \delta_m X), \quad (1.13)$$

где $\Delta x_{\text{пр}}$ — предельная абсолютная суммарная погрешность в данной точке шкалы, Δa — предельная абсолютная аддитивная погрешность, δ_m — предельная относительная мультипликативная погрешность.

Так, например, для милливольтметра абсолютная погрешность измерения должна находиться в пределах $\Delta U_{\text{пр}} = \pm(0,01U + 2)\text{мВ}$, где U — измеряемое значение напряжения в мВ. Относительная погрешность в соответствии с соотношением (1.9) в данном случае рассчитывается по формуле $\delta U_{\text{пр}} = \pm(1 + 200/U)\%$. Для измерительных приборов с дискретным цифровым отсчетом обычно аддитивная составляющая Δa определяется погрешностью дискретности, выбираемой из ряда 0,5; 1 или 2 единиц младшего разряда. Для некоторых приборов погрешность измерения нормируют более сложной формулой.

При использовании средств измерений в пределах рабочих условий, характеризующих предельными значениями параметров окружающей среды и мешающих внешних воздействий, имеют место как основная, так и дополнительные погрешности. Весьма часто дополнительные погрешности нормируют в долях основной. При нормировании погрешностей по двучленной формуле (1.13) иногда указывают нормальные и дополнительные значения отдельно для аддитивной и мультипликативной составляющих.

1.2.1. Закономерности проявления погрешностей

Предсказать результирующую погрешность в условиях эксплуатации на основании известных основной и дополнительных погрешностей бывает трудно: простое суммирование всех максимальных значений ведет к неоправданному завышению расчетной погрешности по сравнению с действительной.

По закономерностям проявления погрешности разделяют на:

- **систематические** Δ_c , проявляющиеся с определенной закономерностью и порождаемые существенными, необходимыми связями между факторами измерений (погрешность градуировки шкалы, температурная погрешность и т.д.);

- **случайные** Δ_n , которые при данных условиях измерений могут быть, а могут и не проявиться, величина и знак их заранее неизвестны и не могут быть предсказаны (дрейф нуля усилителя постоянного тока, влияние флуктуационных помех и т.д.);
- **промахи**, т.е. грубые искажения результатов измерения, явившиеся следствием неучтенных или неожиданных внешних или внутренних воздействий (импульсная помеха, мгновенное изменение параметров измеряемого объекта и т.д.), небрежности или низкой квалификации оператора; промахи отбрасываются как не заслуживающие доверия.

Систематические погрешности подразделяются на постоянные $\bar{\Delta}_c$ и переменные $\tilde{\Delta}_c$. Если одну и ту же величину измеряют несколько раз, то постоянная систематическая ошибка появляется в каждом приеме неизменной. Например, если данный генератор создает измерительный сигнал, форма которого отличается от идеальной и не изменяется в процессе измерений, возникает постоянная систематическая погрешность. Переменная же систематическая погрешность меняется от измерения к измерению, следуя определенному закону, который может быть выявлен в процессе многократных измерений.

Случайные погрешности обладают четырьмя основными свойствами [1.16–1.18]:

1. **Свойство ограниченности.** При данных условиях измерений случайная погрешность по абсолютной величине не может превзойти некоторого предела Δ_n пр, называемого предельной погрешностью:

$$|\Delta_n| \leq \Delta_n \text{ пр.} \quad (1.14)$$

2. **Свойство компенсации.** При данных условиях сумма случайных погрешностей измерений, деленная на их число, в случае неограниченного увеличения числа измерений стремится к нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} [\Delta_n] = 0, \quad (1.15)$$

где n — число суммируемых погрешностей¹

3. **Свойство независимости.** Если производятся две серии измерений с соответствующими случайными погрешностями:

$$\Delta'_{n1}, \Delta'_{n2}, \dots, \Delta'_{nm}, \quad \text{и} \quad \Delta''_{n1}, \Delta''_{n2}, \dots, \Delta''_{nm},$$

то сумма парных произведений с одинаковыми нижними индексами, деленная на число этих произведений, при неограниченном увеличении n стремится к нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} [\Delta'_n \Delta''_n] = 0. \quad (1.16)$$

¹В теории погрешностей широко используется символика, введенная известным математиком XIX века К.Ф. Гауссом [1.16]. Согласно этой символике квадратные скобки означают суммирование, например:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = \sum_{i=1}^n a_i = [a]; \quad a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n = \sum_{i=1}^n a_i b_i = [ab];$$

$$a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 = [a^2].$$

Если погрешности результатов измерений обладают этим свойством, то данные результаты измерений независимы.

4. **Свойство рассеивания.** Если ряд измерений проводится в одних и тех же условиях, то для их случайных погрешностей имеет место предел:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} [\Delta_n^2] = \sigma^2, \quad (1.17)$$

где σ — некоторая постоянная, зависящая от данных условий измерений, часто именуемая **среднеквадратическим отклонением**, или **стандартом**. Квадрат стандарта σ^2 называется **дисперсией**.

Кроме перечисленных четырех основных свойств случайных погрешностей измерений, следует указать на два дополнительных их свойства.

5. **Свойство симметричности.** В обширном ряду случайных погрешностей измерений, проведенных в одинаковых условиях, погрешности, равные по величине, но противоположные по знаку, встречаются примерно одинаковое число раз.
6. **Свойство унимодальности.** В том же ряду погрешностей измерений погрешности, большие по величине, встречаются реже, чем меньшие (то значение погрешности, которое встречается чаще, чем близкие к нему соседние по значению, называется модальным; если ряд погрешностей содержит одно модальное значение, его называют унимодальным).

Заметим, что существуют случайные погрешности измерений, не обладающие некоторыми из перечисленных свойств. Укажем также, что систематические погрешности, как и случайные, подчиняются свойству ограниченности, т.е.

$$|\Delta_c| \leq \Delta_{c \text{ пр}},$$

где $\Delta_{c \text{ пр}}$ — некоторая положительная величина, определяемая условиями измерений.

Как промахи в измерениях, так и полная погрешность результата измерения, содержащая систематическую и случайную части, порождаются суммарным воздействием элементарных погрешностей, которые можно характеризовать источником возникновения. В соответствии с тем или иным фактором измерений различают погрешности:

- 1) **за счет изменения объекта** в процессе измерений (например, ввиду большого объема качественных показателей канала передачи информации их измерение требует определенного времени, в течение которого эти показатели могут измениться);
- 2) **субъективные** (личные), возникающие вследствие ограниченности возможностей органов чувств оператора;
- 3) **инструментальные** (аппаратурные), связанные с конструкцией, схемой, состоянием приборов в процессе эксплуатации;
- 4) **методические** (теоретические), возникшие за счет использования конкретного метода измерения;
- 5) **внешние**, обусловленные влиянием внешней среды.

Относительно термина «методическая погрешность» необходимо отметить, что, особенно в теории цифровых приборов, его начали употреблять совсем в другом смысле, а именно для обозначения погрешности квантования, вызванной заложенным в принцип действия прибора методом, и не зависящей от разработчика

и изготовителя. Погрешность квантования в цифровых приборах действительно обусловлена самим методом цифрового представления информации и является неизбежной. Поэтому разработчик с удовольствием украшает ее наименование дополнением «методическая», стараясь тем самым подчеркнуть, что ее размер не зависит от его усилий. Тем не менее это принципиально неправомерно, и в паспорте СИ эта погрешность согласно [1.13], безусловно, должна указываться как инструментальная.

К методическим погрешностям относятся все погрешности, которые могут быть определены и количественно оценены с помощью формального описания (математической модели) измерительной процедуры. Количественная оценка погрешностей и их характеристик при этом выполняется на основе расчетов или имитационного моделирования.

На рис. 1.3 приведена классификация погрешностей измерения.



Рис. 1.3. Классификация погрешностей измерения

1.2.2. Оценки точностных характеристик средств измерений

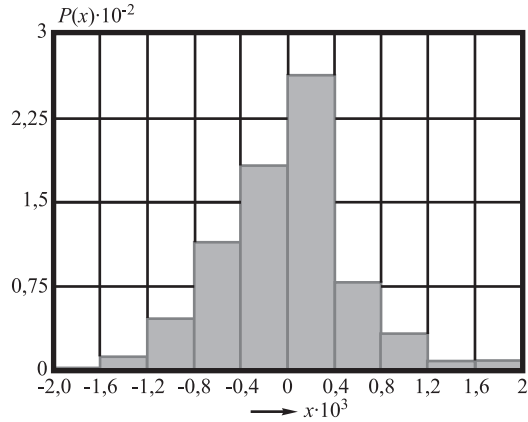
Для полной и объективной оценки точностных свойств средств измерения широко пользуются аппаратом теории вероятностей.

Пусть измерение величины X производили n раз и наблюдали при этом значения $X_1, X_2, \dots, X_n$. Абсолютная погрешность i -го измерения определяется разностью $\Delta_{X_i} = \Delta_X = X_i - X$. Одни и те же погрешности, если они имеют ряд дискретных значений, повторяются, и поэтому можно определить частоту их

появления, характеризуемую отношением числа одинаковых результатов m_i к общему числу измерений n . При достаточно большом n указанную частоту можно считать вероятностью появления дискретной погрешности при данных измерениях $P(\Delta_i) = m_i/n$. Очевидно, что $[P(\Delta)] = 1$.

В случае, когда производится большое число измерений и погрешности Δ_i могут принимать значения, сколь угодно мало отличающиеся друг от друга, целесообразно рассматривать вероятность появления погрешности на каком-то интервале $\delta\Delta$, так как частота появления той или иной конкретной погрешности теряет смысл. В этом случае закон распределения вероятностей характеризуется гистограммой (рис. 1.4), соответствующей погрешностям измеренных данных, приведенных на рис. 1.2, на которой вероятность $\delta P(\Delta_i)$ появления погрешностей в интервале $\Delta_i \leq \Delta \leq \Delta_i + \delta\Delta$ характеризуется площадью соответствующего прямоугольника.

Рис. 1.4. Гистограмма погрешностей измерений



Отношение вероятности появления погрешности в данном интервале $\delta P(\Delta_i)$ к величине самого интервала $\delta\Delta$ является средней плотностью распределения вероятности погрешности в этом интервале. При бесконечном увеличении числа измерений n интервал $\delta\Delta$ беспрестанно уменьшается и плотность распределения вероятности стремится к некоторому пределу:

$$w(\Delta) = \lim_{\delta\Delta} \frac{\delta P(\Delta_i)}{\delta\Delta} = \frac{dP}{d\Delta}. \quad (1.18)$$

Из этого соотношения следует, что между вероятностью появления погрешности в некотором интервале $\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2$ и плотностью распределения вероятностей погрешности в каждой данной точке X шкалы измерений $w(\Delta)$ существует интегральная связь:

$$P\{\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2\} = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} w(\Delta) d\Delta. \quad (1.19)$$

Очевидно, должно выполняться условие нормирования

$$\int_{-\infty}^{\infty} w(\Delta) d\Delta = 1. \quad (1.20)$$

Интегральная функция распределения погрешности Δ :

$$W(\Delta) = \int_{-\infty}^{\Delta} w(\Delta) d\Delta \quad (1.21)$$

характеризует вероятность того, что погрешность в данной точке шкалы X не превысит Δ (т.е. находится в пределах от $-\infty$ до Δ).

Наиболее часто на практике встречаются равномерный и нормальный (Гаусса) законы плотности распределения погрешностей, важно также распределение Лапласа. Для равномерного закона плотность вероятности определена формулой:

$$w(\Delta) = \begin{cases} 1/(b-a) & \text{при } a \leq \Delta \leq b; \\ 0 & \text{при } \Delta < a, \Delta > b. \end{cases} \quad (1.22)$$

На рис. 1.5, а приведен график плотности вероятности и график функции равномерного распределения при $a = -1/2$, $b = 1/2$.

Аналитическое выражение кривой нормального распределения называют формулой Гаусса или формулой ошибок:

$$w(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Delta - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (1.23)$$

На рис. 1.5, б даны графики плотности вероятности и функции нормального распределения (гауссиана).

Нормальный закон распределения случайной величины с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 1$ называется **стандартным**, или **нормированным**, а соответствующая нормальная кривая — **стандартной**, или **нормированной**.

Плотность распределения Лапласа (двухстороннего, или двойного экспоненциального распределения) описывается формулой:

$$w(\Delta) = \frac{\lambda}{2} \exp [-\lambda |\Delta - \mu|], \quad (1.24)$$

где $\lambda > 0$ — параметр масштаба, $-\infty < \mu < \infty$ — параметр сдвига.

На рис. 1.5, в показаны графики плотности вероятности распределения и функции Лапласа (интеграла вероятности) при $\mu = 0$ и $\sigma = \sqrt{2}/\lambda = 1$.

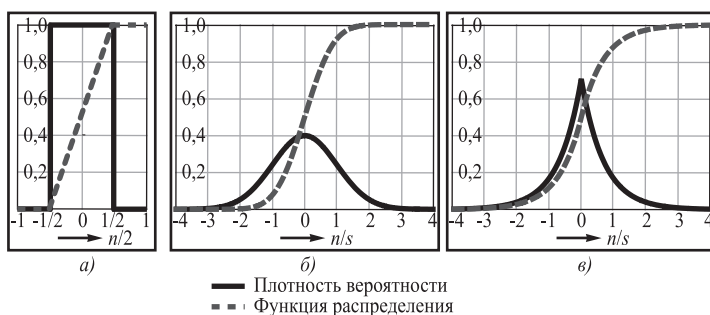


Рис. 1.5. Плотности вероятности и функции распределения при равномерном (а), гауссовом (б) и лапласовом (в) распределениях

Любой закон распределения характеризуется рядом числовых характеристик.

1. **Математическое ожидание** (первый начальный момент) — среднее (модальное) значение погрешности в данной точке X шкалы:

$$M(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta w(\Delta) d\Delta. \quad (1.25)$$

Если среднее значение погрешности не равно нулю, то погрешность имеет систематическую часть, причем

$$M(\Delta) = \Delta_c. \quad (1.26)$$

Для равновероятного распределения $\Delta_c = (a + b)/2$, а при нормальном и лапласовом распределениях $\Delta_c = \mu$.

2. **Дисперсия** (второй центральный момент)

$$D(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} [\Delta - M(\Delta)]^2 w(\Delta) d\Delta \quad (1.27)$$

характеризует степень разброса погрешностей относительно среднего значения $M(\Delta) = \Delta_c$. Это — среднее значение квадрата случайной составляющей погрешности Δ_n .

3. **Среднеквадратическое отклонение** (стандартное отклонение)

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{D(\Delta)} \quad (1.28)$$

характеризует среднеквадратичное значение случайной составляющей погрешности.

Для равновероятного закона распределения $\sigma(\Delta) = \frac{a-b}{2\sqrt{3}}$, а для нормального и лапласового законов распределения стандартные отклонения $\sigma(\Delta)$ соответственно равны: $\sigma(\Delta) = \sigma$ и $\sigma(\Delta) = \sqrt{2}/\lambda = \sigma$.

4. **Второй начальный момент**

$$\Psi(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 w(\Delta) d\Delta \quad (1.29)$$

определяет среднее значение квадрата полной погрешности (без разделения на систематическую и случайную ее составляющие).

5. **Среднеквадратическая полная погрешность**

$$\psi(\Delta) = \sqrt{\Psi(\Delta)} \quad (1.30)$$

также характеризует полную погрешность измерения в данной точке шкалы X . Для равновероятного закона распределения $\Psi(\Delta) = \sqrt{\frac{a^2+ab+b^2}{3}}$, а при нормальном и лапласовом распределениях эта величина равна

$$\Psi(\Delta) = \sqrt{\sigma^2 + m^2}.$$

6. **Доверительный интервал погрешности** в данной точке шкалы определяется из условия:

$$P \{ \Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2 \} = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} w(\Delta) d\Delta = \alpha, \quad (1.31)$$

где α — коэффициент надежности измерения.

Обычно границами интервала Δ_1 и Δ_2 выбирают величины, симметрично расположенные относительно среднего значения погрешности (систематической составляющей), т.е. $\Delta_1 = M(\Delta) - \Delta_{\text{пд}}$ и $\Delta_2 = M(\Delta) + \Delta_{\text{пд}}$, где $\Delta_{\text{пд}}$ — доверительная погрешность случайной составляющей. В этом случае, а также учитывая свойства компенсации и симметричности случайной погрешности, можно записать:

$$P\{|\Delta_n| \leq \Delta_{\text{пд}}\} = 2 \int_0^{\Delta_{\text{пд}}} w[\Delta - M(\Delta)] d\Delta = 2 \int_0^{\Delta_{\text{пд}}} w(\Delta_n) d\Delta_n = \alpha. \quad (1.32)$$

Применительно к равновероятному закону распределения понятие доверительной погрешности является малосодержательным, поскольку при вероятности α , близкой к 1,

$$\Delta_{\text{пд}} \approx (b - a)/2. \quad (1.33)$$

В случае нормального закона распределения доверительная погрешность может быть определена из соотношения

$$\alpha = 2W(\Delta_{\text{пд}}) - 1, \quad (1.34)$$

где $W(\Delta_{\text{пд}}) = \sqrt{\frac{2}{\pi\sigma^2}} \int_{-\frac{\Delta_{\text{пд}}}{\sigma}}^{\frac{\Delta_{\text{пд}}}{\sigma}} \exp\left[-\frac{\Delta_n^2}{2\sigma^2}\right] d\Delta_n$ — интегральная функция распределения для нормального закона.

Обозначив $\Delta_n/\sigma = t$ и $\Delta_{\text{пд}}/\sigma = k$, получим

$$2W(k\sigma) - 1 = 2\Phi(k) - 1 = F(k) = \alpha, \quad (1.35)$$

где $\Phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^k \exp\left[-t^2/2\right] dt$, $F(k) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^k \exp\left[-t^2/2\right] dt$ — табулированные функции.

Доверительная погрешность при нормальном распределении, как и в лапласовом, может быть выражена произведением стандартного отклонения на коэффициент k :

$$\Delta_{\text{пд}} = k\sigma. \quad (1.36)$$

В табл. 1.1 для нормального распределения приведены выраженные в процентах значения коэффициента надежности α и вероятности $(1 - \alpha)$ появления погрешностей, больших, чем $\Delta_{\text{пд}} = k\sigma$, а также количество n измерений (в среднем), при которых возможно появление хотя бы одной погрешности, большей, чем указанная величина $\Delta_{\text{пд}}$.

Таблица 1.1. Значения параметров надежности для нормального распределения

k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
α , %	38,3	68,3	86,64	95,45	98,76	99,68	99,953	99,9937
$(1 - \alpha)$, %	61,7	31,7	13,36	4,55	1,24	0,32	0,047	0,0063
n	1	3	8	22	81	371	2150	15 798

Теоретически погрешности с нормальным законом распределения плотности вероятностей не обладают свойством ограниченности.

Но практически, как видно из табл. 1.1, если принять $\Delta_{\text{пд}} = 2\sigma$, $\Delta_{\text{пд}} = 3\sigma$, $\Delta_{\text{пд}} = 4\sigma$, то погрешность измерения может превысить в среднем указанные значения один раз соответственно в 22, 371 или 15 798 измерениях.

Вопрос о том, в каких случаях какой доверительной вероятностью следует задаваться, относится к числу трудноразрешимых. При теоретических исследованиях закон распределения случайной погрешности наиболее часто считают

нормальным, а доверительную погрешность измерения выбирают равной 3σ . Однако убедительного обоснования этого правила «трех сигм», кроме того, что при n существенно более 20 становится справедливым гауссово приближение, не имеется. Некоторые авторы и официальные инструкции опираются на другие равенства: $\Delta_{\text{пд}} = 2\sigma$ или $\Delta_{\text{пд}} = 4\sigma$.

Если соотношение между предельной погрешностью и стандартным отклонением в данной точке шкалы записать в виде $\Delta_{\text{пд}} = \beta\sigma$, то очевидно, что коэффициент β характеризует вероятность появления погрешности, выходящей за поле допуска. Величина коэффициента β должна быть выбрана из тех соображений, чтобы при практических измерениях появление погрешности большей, чем $\beta\sigma$, было почти исключено. Если же это произойдет, то значение, соответствующее этой погрешности, следует считать промахом.

Одним из наиболее обоснованных и согласующихся с физическим смыслом является определение предельного значения случайной погрешности ее энтропийным значением. Под **энтропийным значением погрешности** введенной П.В. Новицким, понимают предельное значение некоторой условной погрешности с равновероятным законом распределения, вызывающее в среднем такую же потерю количества информации при измерении, как и погрешность с данным законом распределения вероятностей. В общем случае «энтропийная погрешность» определяется выражением:

$$\Delta_{\text{М}} = \frac{1}{2} \exp [H(X_0/X)], \quad (1.37)$$

где $H(X_0/X) = - \int_{-\infty}^{\infty} w(\Delta) \ln w(\Delta) d\Delta$ — условная энтропия в данной точке шкалы; X_0 и X — измеряемая величина и показание прибора соответственно.

Согласно определению энтропийное значение погрешности для равномерного закона распределения равно доверительной погрешности:

$$\Delta_{\text{э}} = (b - a)/2 \approx \Delta_{\text{пд}}, \quad (1.38)$$

что можно подтвердить путем вычислений с учетом соотношений (1.22) и (1.33).

Вычисление энтропийной погрешности для нормального и лапласового распределения приводит к следующим соотношениям:

$$\Delta_{\text{э}} = \sigma \sqrt{\pi e/2} \cong 2,07\sigma \quad \text{и} \quad (1.39)$$

$$\Delta_{\text{э}} = \sigma e \sqrt{2} \cong 1,92\sigma. \quad (1.40)$$

Исходя из полученного соотношения величины $\beta \approx 2,07$ для нормального закона распределения и $\beta \approx 1,92$ для закона распределения Лапласа соответствуют коэффициентам надежности $\alpha = 0,961548$ и $\alpha = 0,934$. Это означает, что погрешность может в среднем превысить указанное значение один раз в 26 и 15 измерениях соответственно.

Для полной ошибки измерения Δ можно записать следующие пределы:

$$\Delta_c - \Delta_{\text{э}} \leq \Delta \leq \Delta_c + \Delta_{\text{э}}, \quad (1.41)$$

где $\Delta_c = M(\Delta)$ — систематическая погрешность измерения, $\Delta_{\text{э}}$ — энтропийное значение случайной погрешности измерения.

Если эти пределы определены, то следует считать, что задача оценки точности данного результата измерения решена, так как по ним можно судить, каково возможное отклонение данного результата измерения от действительного значения измеренной величины. Иногда вместо соотношения (1.41) для суждения о

степени близости результата измерения к измеренной величине пользуются неравенством

$$|\Delta| \leq |\Delta_c| + \Delta_{\text{э}}. \quad (1.42)$$

Погрешность прямых измерений — при выполнении серии n измерений определяется по формуле:

$$\Delta_{\text{пи}} \leq ([\Delta_c] + \sqrt{[\Delta_n^2]})/n, \quad (1.43)$$

где $[\Delta_c] = \Delta_{c1} + \Delta_{c2} + \dots + \Delta_{cn}$ — арифметическая сумма всех n элементарных систематических погрешностей, $[\Delta_n^2] = \Delta_{n1}^2 + \Delta_{n2}^2 + \dots + \Delta_{nn}^2$ — сумма квадратов всех n элементарных случайных погрешностей.

До вычисления величины $\Delta_{\text{пд}}$ надо отслеживать и учитывать систематические погрешности, корректируя полученные результаты измерений, и устранять промахи (погрешности разброса), которые возникают вследствие различия измеренных значений при многократном повторении измерений одной и той же величины.

При оценке параметров результатов различных методов обработки информации зачастую используют другие законы распределения результатов измерений.

Так, случайная величина X , состоящая из суммы квадратов совместно независимых стандартных нормальных случайных величин,

$$\Delta_X = \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_k^2, \quad (1.44)$$

где $\Delta_i \sim N(0, 1)$ имеет **распределение хи-квадрат** (распределение Пирсона) с k степенями свободы.

Плотность вероятности и функция распределения хи-квадрат определяются соотношениями:

$$w_{\chi^2(k)}(\Delta_X) = \frac{(1/2)^{k/2}}{\Gamma(k/2)} \Delta_X^{k/2-1} e^{-\Delta_X/2}, \quad (1.45)$$

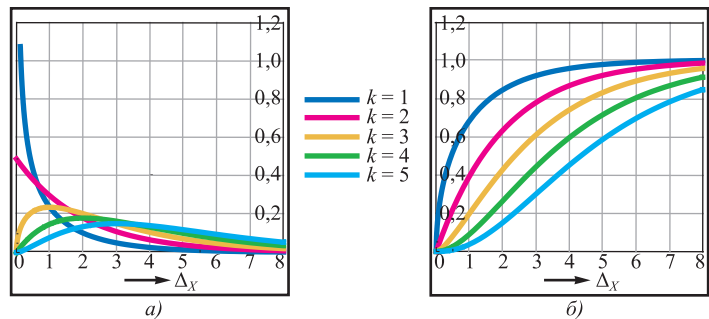
$$W_{\chi^2(k)}(\Delta_X) = \frac{\gamma(k/2, \Delta_X/2)}{\Gamma(k/2)}, \quad (1.46)$$

где $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ — гамма-функция, а $\gamma(a, x) = \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt$ — нижняя неполная гамма-функция.

Математическое ожидание и дисперсия распределения хи-квадрат соответственно равны k и $2k$.

На рис. 1.6 представлены графики плотностей вероятности и функций распределения хи-квадрат для нескольких значений степеней свободы k .

Рис. 1.6. Графики плотностей вероятностей (а) и функций распределения хи-квадрат (б)



Распределение Стьюдента используется в статистике для точечного оценивания, построения доверительных интервалов и тестирования гипотез, касающихся неизвестного среднего статистической выборки из нормального распределения. В частности, если $\Delta_1, \dots, \Delta_n$ — независимые случайные величины и $\Delta_i \sim N(\mu, \sigma^2)$, $i = 1, \dots, n$, то распределение случайной величины $\Delta_n = \frac{\bar{\Delta} - \mu}{\bar{\sigma}/\sqrt{n}}$, где $\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$ — выборочное среднее, а $\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2$ — несмещенная выборочная дисперсия, является распределением Стьюдента $t(n-1)$ с $(n-1)$ степенями свободы.

Распределение Стьюдента абсолютно непрерывно, имеет плотность и функцию распределения, определяемые следующими соотношениями:

$$w_{t(n)}(\Delta) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{\pi n} \Gamma(n/2)} \left(1 + \frac{\Delta^2}{n}\right)^{-(n+1)/2}, \quad (1.47)$$

$$W_{t(n)}(\Delta) = \frac{1}{2} + \frac{\Delta \Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{\pi n} \Gamma(n/2)} {}_2F_1(1/2, (n+1)/2, 3/2, -\Delta^2/n), \quad (1.48)$$

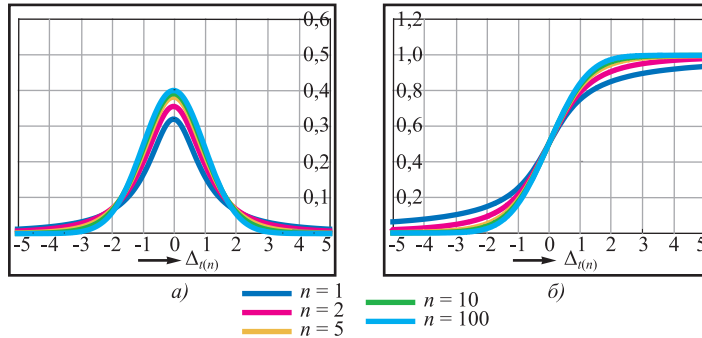
где ${}_2F_1(a, b, c, z) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\prod_{l=0}^{k-1} \frac{(a+l)(b+l)}{(1+l)(c+l)} \right] \frac{z^k}{k!}$ — гипергеометрическая функция (функция Гаусса), $\Gamma(x)$ — гамма-функция Эйлера.

Случайная величина распределения Стьюдента имеет математическое ожидание $\mu = 0$ при $n > 1$ и дисперсию $\sigma = n/(n-2)$ при $n > 2$.

На рис. 1.7 представлены графики плотностей вероятности и функций распределения Стьюдента для нескольких значений степеней свободы n .

Если при обработке измерительной информации используются две независимые случайные величины, имеющие распределение хи-квадрат $\Delta_i \sim \chi^2(d_i)$, где $d_i \in N$, $i = 1, 2$, то распределение случайной величины $\Delta_F(d_1, d_2) = \frac{\Delta_1/d_1}{\Delta_2/d_2}$ является **распределением Фишера** (Снедекора) со степенями свободы d_1 и d_2 . На использовании распределения Фишера основан F-критерий, применяемый, в частности, для проверки гипотезы равенства дисперсий двух совокупностей, в дисперсионном анализе, регрессионном анализе, многомерном статистическом анализе.

Рис. 1.7. Графики плотностей вероятностей (а) и функций распределения Стьюдента (б)



Распределение Фишера имеет плотность и функцию распределения, определяемые следующими соотношениями:

$$w_{F(d_1, d_2)}(\Delta) = \frac{\sqrt{\frac{(d_1 \Delta)^{d_1} d_2^{d_2}}{(d_1 \Delta + d_2)^{d_1 + d_2}}}}{\Delta B(d_1/2, d_2/2)}, \quad (1.49)$$

$$W_{F(d_1, d_2)}(\Delta) = I_{\frac{d_1 \Delta}{d_1 \Delta + d_2}}(d_1/2, d_2/2), \quad (1.50)$$

где $I_x(a, b) = Bx(a, b)/B(a, b)$ — регуляризованная неполная бета-функция, определяемая через полную и неполную бета-функции $B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1}(1-t)^{b-1}dt$, $B_x(a, b) = \int_0^x t^{a-1}(1-t)^{b-1}dt$.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, имеющей распределение Фишера, соответственно равны: $m = d_2/(d_2 - 2)$, если $d_2 > 2$; $\sigma = 2d_2^2(d_1 + d_2 - 2)/(d_1(d_2 - 2)^2(d_2 - 4))$ если $d_2 > 4$.

На рис. 1.8 представлены графики плотностей вероятности и функций распределения Фишера для ряда значений коэффициентов d_1 и d_2 .

Из-за наличия флуктуационных и импульсных помех и вследствие случайного характера сигнала оценка его реализаций или параметров, в большинстве случаев определяемых мгновенными значениями сигнала в характерных точках [1.22], вообще говоря, не совпадает с истинной реализацией, что приводит к ошибкам обработки [1.23–1.26].

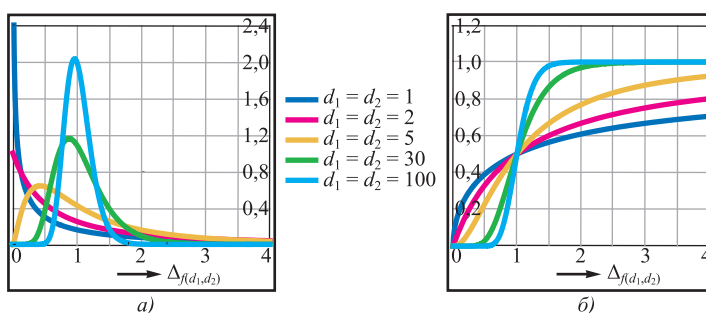


Рис. 1.8. Графики плотностей вероятности (а) и функций распределения Фишера (б)

1.2.3. Использование порядковых статистик в анализе результатов измерений

Using of order statistic for measurement results analysis

Для оценки параметров сигналов при минимальном влиянии различного рода мешающих факторов наиболее рациональным является использование статистических методов, позволяющих получить достаточно надежную информацию о параметрах измеряемого процесса на основании некоторого числа измерений (наблюдений) одной и той же величины $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Современные тенденции прикладной математической статистики характеризуются применением методов, основанных на использовании порядковых статистик. Упорядочение выбора от наименьшей $x_{(1)}$ до наибольшей $x_{(n)}$ не изменяет объема информации, однако часто позволяет выделить необходимую ее долю при сокращении вычислительных операций и уменьшении мешающих факторов за счет оптимального отбора данных при обработке выборочных значений [1.27–1.31].

Оптимальность обработки обычно определяют относительной эффективностью, выражаемой отношением дисперсии строго оптимальной линейной оценки к дисперсии используемой оценки данного параметра. Если при оценке параметра

α независимая выборка $x_1, x_2, \dots, x_n$ из распределения непрерывного типа с плотностью вероятности $f(x, \alpha)$, где α — оцениваемый параметр, заменяется новыми переменными $\hat{\alpha}, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}$, плотности вероятности которых дифференцируемы по параметру α , их производные ограничены, причем $\hat{\alpha} = \alpha(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — однозначная функция, не зависящая от α , непрерывная и имеющая частные производные, то оценка $\hat{\alpha}$ параметра α является регулярной и дисперсия этой оценки удовлетворяет неравенству [1.29]: $D(\hat{\alpha}) \geq \frac{1}{n} E \left[\frac{\partial \ln f(x, \alpha)}{\partial \alpha} \right]^2$. Знак равенства достигается при оптимальной оценке параметра α , при которой $D(\hat{\alpha}) \rightarrow \min$. Эффективность используемой оценки параметра α равна:

$$e(\hat{\alpha}) = \frac{1}{n} E \left[\frac{\partial \ln f(x, \alpha)}{\partial \alpha} \right]^2 ; \quad D(\hat{\alpha}) \leq 1, \quad (1.51)$$

где $E \left[\frac{\partial \ln f(x, \alpha)}{\partial \alpha} \right]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial \ln f(x, \alpha)}{\partial \alpha} \right]^2 f(x, \alpha) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{f(x, \alpha)} \left[\frac{\partial f(x, \alpha)}{\partial \alpha} \right]^2 dx$.

Если плотность вероятности величин $x_1, x_2, \dots, x_n$ имеет точки разрыва, расположение которых зависит от оцениваемого параметра (например, в случае равномерного распределения), то условия регулярности могут нарушаться и зачастую возможно найти несмещенные оценки «ненормально» высокой точности [1.28, 1.29, 1.32, 1.33].

Одним из важных стимулов использования порядковых статистик при оценке измеряемых параметров является большая практическая простота, не требующая длительных и громоздких вычислений, характерных для многих математико-статистических методов. Это свойство особенно ценно, поскольку таким образом при создании измерительной аппаратуры обеспечивается сокращение объема оперативной памяти и вычислительных операций при их простоте и высоком быстродействии оценок.

Особое место в использовании порядковых статистик занимает вопрос об использовании наблюдений, резко отличающихся от совокупности измеренных величин. С точки зрения теории порядковых статистик вопрос сводится к тому, насколько вероятно, что наименьшие и наибольшие наблюдения (одно или более) принадлежат к совокупности, соответствующей используемой гипотезе. Решение в данном случае — гораздо более строгое и объективное, чем применение правила «трех сигм». В этом случае оценка параметров осуществляется с использованием «цензурирования» наблюдений, когда в потенциальной выборке объема n известное число наблюдений с одной или с двух сторон отбрасываются. Цензурирование отличается от усечения, когда ограничивается не выборка, а генеральная совокупность, и число потерянных наблюдений неизвестно.

Дополнительное повышение точности и сокращение времени измерений дает использование результатов оценки параметров, произведенных в предыдущих измерениях, поскольку стабильность работы передающих средств достаточно высока.

В этом случае предварительно следует определить, являются ли полученные на N -м этапе измерений значения оцениваемых величин выборкой той же генеральной совокупности, что и выборки, полученные на предыдущих этапах. Применение такой оценки целесообразно в случае априорной стационарности процесса, когда оценка параметра может быть осуществлена по репрезентативной выборке без повторения измерения, и в том случае, когда подозревается нестационарность процесса и ее необходимо выявить для принятия решения о

дополнительной обработке измеряемого параметра. В такой постановке задача сводится к проверке гипотезы о равенстве среднего и его среднеквадратичного отклонения в разных выборках. Для ее решения может быть использовано множество различных процедур, сводящихся к тому, что по элементам сравниваемых выборок строится статистика на базе обоснованного и априори заданного распределения. В этом случае появляется возможность задать пороговую границу, относительно которой принимается решение о равенстве (или неравенстве) оцениваемых значений измеряемого параметра.

Порядковые статистики также находят широкое применение в построении множественных критериев и в одновременном оценивании посредством доверительных интервалов, в сравнении выборочных средних и дисперсий, сравнении группы средних с эталоном и т.д. [1.30, 1.34–1.36].

Рассмотрим кратко методы оптимальной оценки параметров с использованием порядковых статистик и некоторые вопросы сравнения результатов измерений [1.37–1.40].

Пусть имеется n независимых наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$ случайной величины с непрерывной плотностью вероятности $f(x)$, причем μ — их математическое ожидание, а σ — стандартное отклонение. Представим эти наблюдения в виде порядковой статистики $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ и пронормируем их в виде $u_{(i)} = (x_{(i)} - \mu)/\sigma$.

Если $E[u_{(i)}] = \alpha_i$, $D[u_{(i)}] = V_{ii}$ и $\text{Cov}[u_{(i)}, u_{(j)}] = V_{ij}$, то очевидно:

$$E[x_{(i)}] = \mu + \sigma\alpha_i, \quad D[x_{(i)}] = \sigma^2 V_{ii}, \quad \text{Cov}[x_{(i)}, x_{(j)}] = V_{ij}.$$

Величины α_i , V_{ii} и V_{ij} табулированы для ряда распределений [1.29, 1.31, 1.35].

Линейными оценками среднего значения и среднеквадратичного отклонения являются величины $\bar{\mu} = \sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}$, $\bar{\sigma} = \sum_{i=1}^n b_i x_{(i)}$, если

$$E(\bar{\mu}) = \mu \sum_{i=1}^n a_i + \sigma \sum_{i=1}^n a_i \alpha_i = \mu, \quad (1.52)$$

$$E(\bar{\sigma}) = \mu \sum_{i=1}^n b_i + \sigma \sum_{i=1}^n b_i \alpha_i = \sigma. \quad (1.53)$$

Очевидно, что при оптимальной оценке μ и σ $D(\bar{\mu}) \rightarrow \min$ и $D(\bar{\sigma}) \rightarrow \min$ соответственно и нахождение коэффициентов a_i и b_i сводится к решению систем линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^n a_j V_{ij} = A \quad \text{или} \quad \sum_{j=1}^n b_j V_{ij} = B, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (1.54)$$

где $A = \text{const}$ и $B = \text{const}$, определяемые равенствами (1.52) и (1.53) соответственно.

Для симметричных распределений соотношение (1.52) может быть записано в виде двух равенств:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n a_i \alpha_i = 0, \quad (1.55)$$

а соотношение (1.53) можно представить как:

$$\sum_{i=1}^n b_i = 0, \sum_{i=1}^n b_i \alpha_i = 1. \quad (1.56)$$

В этом случае коэффициенты A и B в уравнениях (1.54) можно определить в виде $A = A_1 + A_2 \alpha_i$ и $B = B_1 + B_2 \alpha_i$.

Учитывая, что случайные погрешности измерений параметров канала передачи информации в основном связаны с влиянием аддитивно сложенной с сигналом флуктуационной помехи, обычно предполагают, что функция распределения результатов независимых наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$ является нормальной.

В этом случае дисперсия любой регулярной оценки μ согласно соотношению (1.52) удовлетворяет неравенству $D(\bar{\mu}) \geq \sigma^2/n$.

Оптимальной оценкой величины μ является среднее $\bar{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i)$, поскольку $D(\bar{x}) \geq \sigma^2/n$.

На практике допущение о нормальности распределения результатов независимых измерений не всегда выполняется, что связано в основном с влиянием импульсных помех в канале передачи информации. Поэтому возникает вопрос: как построенная оценка будет вести себя, если имеет место «загрязнение» выборки или некоторое изменение ее априорного распределения?

Очевидно: указанные искажения распределения выборки прежде всего влияют на несколько наибольших и наименьших порядковых статистик и могут привести к промахам в измерениях. В этом плане интерес представляют оценки μ и σ по цензурированным выборкам, получение которых заключается в исключении r_1 наименьших и r_2 наибольших наблюдений. Расчет линейных оптимальных оценок в цензурированных выборках также сводится к решению линейных уравнений (1.52) при $r_1 + 1 \leq i \leq n - r_2$ и $a_1 = \dots = a_{r_1} = a_{n-r_2+1} = \dots = a_n = 0$ или $b_1 = \dots = b_{r_1} = b_{n-r_2+1} = \dots = b_n = 0$.

Практически чаще всего используют цензурирование при $r_1 = r_2 = r$. В случае малого объема выборки промахи измерений обычно исключаются с достаточной степенью точности в случае, если $r = 1$.

Для цензурированных наблюдений высокоэффективной линейной оценкой являются уинсоризованные средние (winsorized mean):

$$\bar{x}_y = \frac{1}{n} \left[(r+1) (x_{(r+1)} + x_{(n-r)}) + \sum_{i=r+2}^{n-r-1} x_{(i)} \right]. \quad (1.57)$$

Ее эффективность $e \geq 0,956$ для $n < 20$ и $r < 6$ при $n \geq 2r + 1$ и с ростом объема выборки асимптотически стремится к 1.

Другой удобной оценкой, робастной к аномальным наблюдениям, является медианная оценка:

$$\bar{x}_M = \begin{cases} x_{(k+1)}, & n = 2k + 1; \\ (x_{(k)} + x_{(k+1)}) / 2, & n = 2k. \end{cases}$$

Для нормального закона распределения эффективность этой оценки асимптотически сверху стремится к $e = 2/\pi = 0,6366$. Более эффективными являются «быстрые» двухточечные или четырехточечные оценки, приведенные в табл. 1.2, в которой также даны «быстрые» оценки среднеквадратичного отклонения (их

эффективность определяется по отношению к нижней грани дисперсии оценки σ для нормальной генеральной совокупности, равной $\min D(\bar{\sigma}) = \sigma^2/2n$.

Таблица 1.2. Быстрые двух- и четырехточечные оценки μ и σ

Оценки		Двухточечные	Эффектив- ность	Четырехточечные	Эффектив- ность
μ	1	$X_{[0,1167n]}$	0,654	$0,1942 \cdot X_{[0,0394n]} + 0,8058 \cdot X_{[0,2160n]}$	0,857
	2	$X_{[0,1274n]}$	0,683	$0,2828 \cdot X_{[0,0668n]} + 0,7172 \cdot X_{[0,2912n]}$	0,908
	3	$X_{[0,1525n]}$	0,729	$0,3836 \cdot X_{[0,1068n]} + 0,6164 \cdot X_{[0,3512n]}$	0,920
	4	$X_{[0,2702n]}$	0,810		
σ	1	$0,4875 \cdot W_{[0,1522n]}$	0,552	$0,2581 \cdot W_{[0,0668n]} + 0,2051 \cdot X_{[0,2912n]}$	0,735
	2	$0,4391 \cdot W_{[0,1274n]}$	0,594	$0,1787 \cdot W_{[0,0389n]} + 0,2353 \cdot X_{[0,2160n]}$	0,792
	3	$0,4160 \cdot W_{[0,1147n]}$	0,614	$0,1160 \cdot W_{[0,0230n]} + 0,2360 \cdot X_{[0,1271n]}$	0,864
	4	$0,3370 \cdot W_{[0,0694n]}$	0,65		

Примечание: $[\alpha n]$ — целая часть числа αn ; $X_{[\alpha n]} = (x_{([\alpha n])} + x_{(n+1-[\alpha n])})/2$;
 $W_{[\alpha n]} = x_{(n+1-[\alpha n])} - x_{([\alpha n])}$.

Основную информацию о среднеквадратичном отклонении результатов измерений несут крайние порядковые статистики, и отбрасывание экстремальных значений, обеспечивая устранение «загрязнения» выборки, снижает эффективность оценки этой величины. С этой точки зрения особый интерес имеет оценка

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{\pi}}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{[n/2]} (n-2i+1)W_{(i)}, \quad (1.58)$$

где $W_{(i)} = x_{(n+1-i)} - x_{(i)}$.

Она весьма эффективна ($e > 0,9779$) и в меньшей степени подвержена влиянию аномальных наблюдений, чем оптимальная линейная оценка.

1.2.4. Использование цикличности измерения параметров сигналов

Цикличность измерения параметров сигнала и качественных показателей канала его передачи является одним из возможных факторов существенного повышения точности и сокращения времени измерений. В случае если параметр за цикл измерения изменяется незначимо, что на практике встречается достаточно часто, результаты измерений, выполненных на предыдущих циклах, совместно с текущими результатами могут быть использованы для повышения точности, что позволяет одновременно существенно сократить время измерений. Кроме того, значимое изменение параметров, достоверно определенное по установленным критериям, может служить характеристикой резкого их изменения, по которой можно реализовать допусковый контроль канала передачи. Кратко рассмотрим критерии сравнения результатов оценок измеряемых величин, удобные для аппаратного экспресс-анализа.

Среди различных критериев особое место занимает t -критерий Стьюдента. Он наиболее эффективен при предположении о нормальности распределения исследуемых выборок и применяется для принятия решения о том, является ли значимой разность средних значений двух выборок. При произвольных среднеквадратичных отклонениях (σ_1) и (σ_2) в двух выборках объемов n_1 и n_2 для практических целей проверки гипотезы о том, что $\mu_1 = \mu_2$, пригодна статистика

$$\hat{t} = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2|/\sigma, \quad (1.59)$$

где $\bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_1^2/n_1 + \bar{\sigma}_2^2/n_2)^{1/2}$.

Гипотеза о равенстве математических ожиданий $\mu_1 = \mu_2$ принимается, если при заданном уровне значимости рассчитанная величина не превышает табличное значение $t_\alpha = t_\alpha(v, P)$, которое зависит от доверительной вероятности P , определяющей положительное решение о стационарности процесса, и числа v степеней свободы:

$$v = \frac{(\bar{\sigma}_1^2/n_1 + \bar{\sigma}_2^2/n_2)^2}{\frac{(\bar{\sigma}_1^2/n_1)^2}{n_1+1} + \frac{(\bar{\sigma}_2^2/n_2)^2}{n_2+1}} - 2. \quad (1.60)$$

При заданном уровне значимости α , т.е. $P(\mu_1 \neq \mu_2) > \alpha$, можно считать, если $\hat{t}$ не превышает табличное значение, то

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - t_\alpha \bar{\sigma} \leq \mu_1 - \mu_2 \leq (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) + t_\alpha \bar{\sigma}. \quad (1.61)$$

Этот критерий обладает удобными практическими особенностями, поскольку, с одной стороны, распределение Стьюдента относительно быстро сходится к нормальному (при $v > 30$), а с другой стороны — отклонение изучаемого процесса от нормального не приводит к большим ошибкам.

Другие критерии, более простые в вычислениях, основаны на использовании порядковых статистик. Для сравнения центров независимых рядов изменений равного объема используется статистика Лорда [1.37]:

$$\hat{u} = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| / W, \quad (1.62)$$

где $W = (W_1 - W_2)/2$ — среднее арифметическое размахов сравниваемых выборок.

Если $\hat{u}$ статистика достигает или превосходит табулированную границу, то разность средних значений значима на соответствующем уровне. Для оценки равенства средних значений широко применяются ранговые критерии, например, U -критерий Вилкоксона, Манна и Уитни [1.35]. Статистика этого критерия представляет собой сумму рангов, которые имеет одна из выборок в общем вариационном ряду, построенном из обеих сравниваемых выборок. Заметим, что если $x_{(i)}, \dots, x_{(i+k-1)}$ значений вариационного ряда равны по величине, то каждому из них присваивается ранг $r_i = \dots r_{i+k-1} = i + 1/k$. Искомая статистика определяется наименьшим числом из двух значений:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1, U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2, \quad (1.63)$$

где R_1 и R_2 — вычисленные суммы рангов первой и второй выборок объемом n_1 и n_2 соответственно. Гипотеза о равенстве μ_1 и μ_2 отвергается на заданном уровне значимости, если вычисленное U -значение меньше табулированной критической величины $U_{n_1, n_2, \alpha}$.

Один из наиболее простых непараметрических методов сравнения оценок среднего — упрощенный критерий Тьюки [1.30], основанный на оценке пересечений двух выборок, одна из которых содержит наибольшее, а другая — наименьшее значения. Если просуммировать количество элементов первой выборки, превышающих максимант второй, с количеством элементов второй выборки, меньших миниманта первой, то критические значения T -статистики при примерно равных объемах выборки составляют 7 для критерия на уровне значимости 0,05 и 10 — на уровне значимости 0,01 (двум равным значениям приписывают число 0,5). Этот критерий справедлив при $n_1 \leq n_2 \leq 3 + 4n_1/3$. Во всех других случаях рассчитанное значение T -статистики должно быть уменьшено на 1, если $3 + 4n_1/3 < n_2 \leq 2n_1$, и на целую часть числа $(n_2 - n_1 + 1)/n_1$, если $2n_1 \leq n_2$.

Из других подобных критериев, которые можно использовать при аппаратурной реализации методов измерений, следует упомянуть критерий серий Вальд–Вольфовица (критерий знаков относительно медианы), критерий инверсий [1.33], критерий нормальных меток и близкий к нему непараметрический критерий ван дер Вардена [1.30] однородности двух выборок, основанный на ранговой статистике, и др.

При выборе критериев автоматизированного экспресс-оценивания параметров в различных циклах измерения особое значение приобретают быстродействие алгоритмов, ограничения по точности анализа, объему памяти и др.

Например, в алгоритмах функционирования приборов анализа параметров ТВ измерительных сигналов [1.41–1.44] используется оценка унсоризованного среднего.

При проведении косвенных измерений погрешность оценки искомой величины, функционально связанной с физическими величинами $x_1, x_2, \dots, x_m$ формулой вида $Q = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, может быть определена по формуле:

$$\Delta_{\text{ки}} \leq \sqrt{\left(\frac{df}{dx_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{df}{dx_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dx_m} \Delta x_m\right)^2}, \quad (1.64)$$

где $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$ — независимые и случайные погрешности величин $x_1, x_2, \dots, x_m$, полученные прямыми измерениями, значения частных производных $\frac{df}{dx_1}, \frac{df}{dx_2}, \dots, \frac{df}{dx_m}$ смещение определяют чувствительность вклада физических величин $x_1, x_2, \dots, x_m$ в погрешность измерения величины Q .

Погрешность контроля — это событие, заключающееся в отнесении к i -му интервалу контролируемой величины X в действительности принадлежащей к k -му интервалу, причем $i \neq k$. Свойства погрешностей контроля и измерений аналогичны.

Литература к главе I

- 1.1 Кузнецов В.А., Исаев Л.К., Шайко И.А. Метрология. М.: Стандартинформ, 2005.
- 1.2 ГОСТ Р 8.596–2002. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
- 1.3 Дворкович В.П., Кривошеев М.И. Особенности измерения и контроля в цветном телевидении (учебное пособие). М.: Всесоюзный институт повышения квалификации работников телевидения и радиовещания, 1981.
- 1.4 Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений. М.: «Радио и связь», 1964 (1-е изд.). 592 с.; 1976 (2-е изд., перераб. и испр.). 1989 (3-е изд.).
- 1.5 Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / Под ред. Ю.Б. Зубарева и В.П. Дворковича 2-е изд., перераб. и доп. М.: НАТ, 1997.
- 1.6 Кривошеев М.И. Международная стандартизация цифрового телевизионного вещания. М.: НИИР, 2006.

- 1.7 *Зубарев Ю.Б., Кривошеев М.И., Красносельский И.Н.* Цифровое телевизионное вещание. Основы. Методы. Системы. М.: НИИР, 2001.
- 1.8 *Дворкович В.П., Чобану М.К.* Телевидение послезавтрашнего дня // Радиочастотный спектр. 2010. № 4.
- 1.9 *Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Цифровые видеоинформационные системы в России // Современная электроника. 2009. № 3.
- 1.10 *Чобану М.К., Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Эффективность современных цифровых систем вещания // Радиочастотный спектр. 2011. № 4.
- 1.11 *Кемниц Ю.В.* Теория ошибок измерений. М.: «Недра», 1967.
- 1.12 *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1991.
- 1.13 ГОСТ 22 261–94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
- 1.14 ГОСТ 8.401–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования.
- 1.15 ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
- 1.16 Обзор «История теории ошибок». Берлин, 2007 (Istoria Teorii Oshibok. Berlin, 2007).
- 1.17 *Тейлор. Дж.* Введение в теорию ошибок. М.: «Мир», 1985.
- 1.18 *Аксенова Е.Н.* Элементарные способы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений: Учебное пособие. М.: Изд. МИФИ, 2003.
- 1.19 Распределение хи-квадрат.
http://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_хи-квадрат.
- 1.20 Распределение Стьюдента.
http://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_Стьюдента.
- 1.21 Распределение Фишера.
http://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_Фишера.
- 1.22 ГОСТ-18471–83. Тракт передачи изображения вещательного телевидения. Звенья тракта и измерительные сигналы.
- 1.23 *Дворкович В.П.* Оптимальные методы измерения параметров телевизионного сигнала // Радиотехника. 1988. № 2.
- 1.24 *Дворкович В.П.* Анализ и разработка новых методов оценки качественных показателей телевизионного канала: Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 1989.

- 1.25 *Воинов В.Г., Никулин М.С.* Несмещенные оценки и их применение (Физико-математическая библиотека инженера). М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
- 1.26 *Губарев В.В.* Алгоритмы статистических измерений. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 1.27 *Дейвид Г.* Порядковые статистики. М.: Наука, 1979.
- 1.28 *Сархан А.Е., Гринберг Б.Г.* Введение в теорию порядковых статистик / Пер. с англ.; под ред А.Я. Боярского. М.: Статистика, 1970.
- 1.29 *Крамер Г.* Математические методы статистики / Пер с англ.; под ред. акад. А.П. Колмогорова (2-е изд., стереотипное). М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1975.
- 1.30 *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965 (1-е изд.), 1968 (2-е изд.), 1983 (3-е изд.).
- 1.31 *Оуэн Д.Б.* Сборник статистических таблиц / Пер. с англ. М.: ВЦ АН СССР, 1966 (1-е изд.), 1973 (2-е изд., испр.).
- 1.32 *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2003.
- 1.33 *Жовинский А.Н., Жовинский В.Н.* Инженерный экспресс-анализ случайных процессов. М.: Энергия, 1979.
- 1.34 *Кендалл М.Дж., Стюарт А.* Статистические выводы и связи / Пер. с англ.; под ред. А.Н. Колмогорова. М.: Наука, 1973.
- 1.35 *ван дер Варден Б.Л.* Математическая статистика / Пер. с нем. Л.Н. Большева; под ред. Н.В. Смирнова. М.: ИЛ, 1960.
- 1.36 *Гаек Я., Шидак З.* Теория ранговых тестов / Пер. с англ. Д.М. Чибисова; под ред. Л.Н. Большева. М.: Наука, 1971.
- 1.37 *Закс Л.* Статистическое оценивание / Пер. с нем. В.Н. Варыгина; под ред. Ю.П. Адлера и В.Г. Горского. М.: Статистика, 1976.
- 1.38 *Кенуй М.Г.* Быстрые статистические вычисления. Упрощенные методы оценивания и проверки / Пер. с англ.; под ред. А.Н. Колмогорова. М.: Наука, 1973.
- 1.39 *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ.; под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973.
- 1.40 *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965.
- 1.41 *Дворкович А.В.* Универсальный телевизионный измеритель — видеоанализатор компьютерный ВК-1/2 // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2001. № 2.



- 1.42 *Дворкович В.П., Дворкович А.В., Макаров Д.Г., Басий В.Т., Шлеев С.Е.* Видеоанализатор ВК-2 — прибор нового поколения измерений и контроля качественных показателей каналов передачи телевизионных сигналов // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 5.
- 1.43 Комплекс измерительный телевизионный КИ-ТВ: Руководство по эксплуатации. НЛУС.463925.001РЭ.
- 1.44 *Дворкович В.П., Басий В.Т., Макаров Д.Г., Шлеев С.Е.* Измерения в системах аналогового и цифрового телевизионного вещания // Радиочастотный спектр. 2009. № 4.