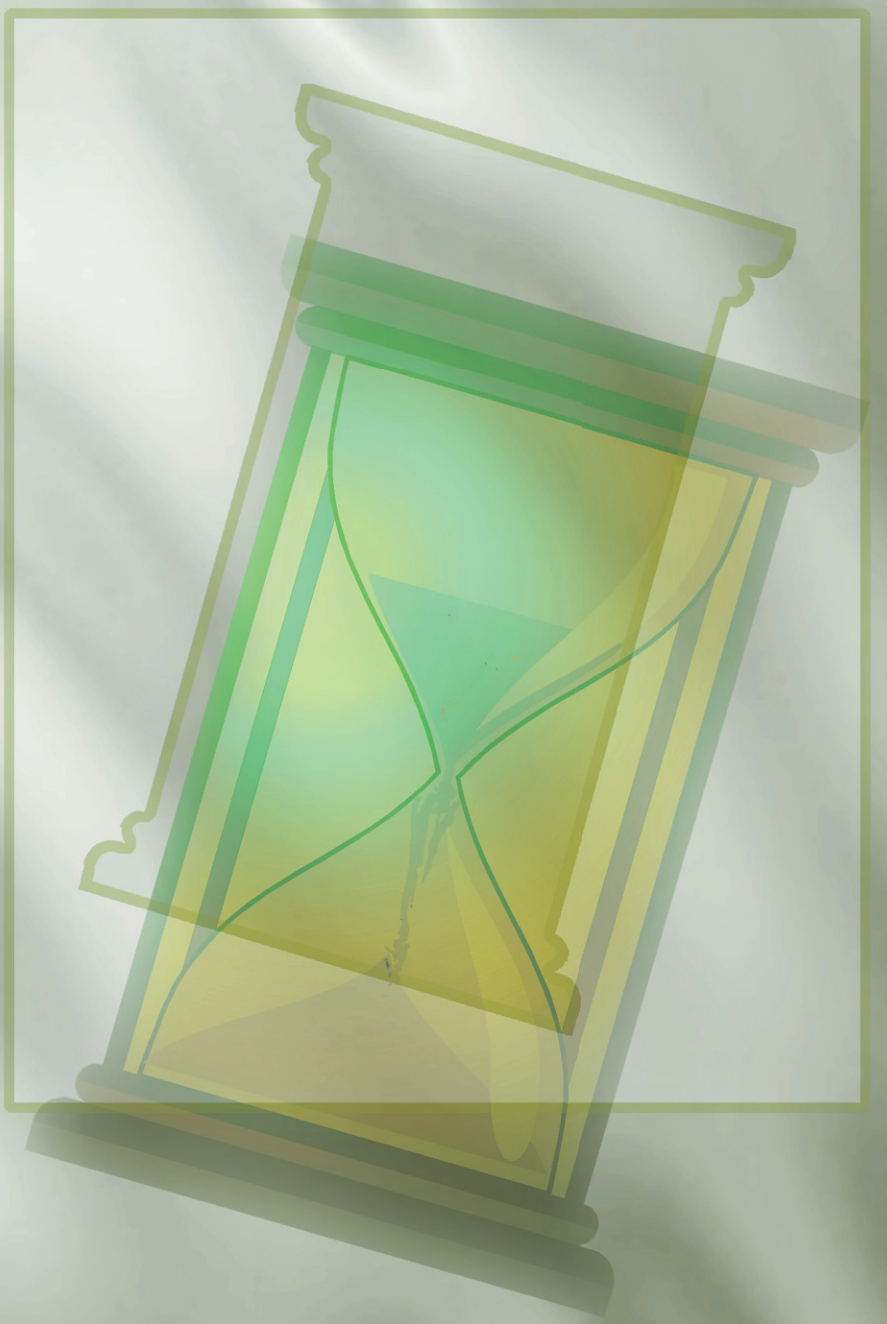
МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

СПРАВОЧНИК ПО ВЫБОРУ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИСТЕМ ТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ И ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ



1997 г.

Бюро Радиосвязи

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

СПРАВОЧНИК

ПО ВЫБОРУ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СИСТЕМ ТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ И ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ

1997 год

БЮРО РАДИОСВЯЗИ

© МСЭ 1997

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена или использована в какой бы то ни было форме или с помощью каких-либо средств, электронных или механических, включая изготовление фотокопий и микрофильмов, без письменного разрешения МСЭ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот Справочник по выбору и использованию систем точной частоты и точного времени разработан группой экспертов в области стандартных частот и сигналов точного времени из 7-й Исследовательской комиссии радиосвязи “Научные службы” под председательством г-на Р. Сиднора (Редактор, США) и г-на Дэвида В. Аллана (Помощник редактора, США).

Этот Справочник содержит 10 Глав, в которых описываются основные концепции, источники сигналов частоты и времени, методы измерения, характеристики различных стандартов частоты, опыт эксплуатации, проблемы и перспективы развития. Содержание включает в себя подробные объяснения и много ссылок, к которым можно обратиться за дополнительными деталями.

Техническое содержание этого Справочника предназначено для использования администрациями как развивающихся, так и развитых стран, а также Бюро радиосвязи. Справочник также будет полезен для инженеров научных и промышленных организаций.

Роберт В. Джонс

Директор, Бюро радиосвязи

Введение Председателя 7-й Исследовательской комиссии радиосвязи

Исследовательская комиссия радиосвязи по научным службам (ИК-7) была образована во время структурной реорганизации в 1990 году на Пленарной ассамблее МККР в г. Дюссельдорфе. В то время Исследовательская комиссия по космическим исследованиям и радиоастрономии (ИК-2) была объединена с Исследовательской комиссией по сигналам точного времени и стандартных частот (ИК-7) для образования новой 7-й Исследовательской комиссии по научным службам.

Большая часть деятельности ИК по научным службам связана с прогрессом в области использования спектра радиочастот для достижения научных целей. В этом отношении специалисты по точному времени и стандартным частотам в течение долгого времени работали с Международным союзом электросвязи со специальной целью — разработкой Рекомендаций по использованию спектра радиочастот для облегчения распространения эталонных сигналов точного времени и для стандартизации методов их распространения. Закономерным следствием этой деятельности явилась спецификация стандартов точной частоты и методов их реализации.

В то время как разработка Рекомендаций была и продолжает быть основным видом деятельности Исследовательской комиссии, стало ясно, что эксперты в Исследовательской комиссии, работающие над этими вопросами, могут предоставить основополагающую информацию своим коллегам, как профессионалам, так и непрофессионалам, которая связана с данными о точном времени и стандартных частотах при осуществлении различных методов связи. Эти методы включают в себя следующие аспекты: генерирование сигналов времени с целью официальной их передачи для всего мира, электросвязь, навигация (включая предотвращение столкновений), энергетические системы, определение и обзор местоположений, авиационное электронное оборудование, системы транспорта, исследование космоса, астрономия и астрометрия (особенно миллисекундные измерения пульсаров), мониторинг землетрясений и все лаборатории национальных стандартов.

Таким образом, было решено подготовить и издать этот Справочник, чтобы все пользователи этих стандартов смогли глубже разобраться в работе источников и систем точного времени и частоты для целей лучшего проектирования и применения этих мощных инструментов.

Как Председателю 7-й Исследовательской комиссии для меня является честью и приятной обязанностью представить этот Справочник сообществу пользователей сигналов точного времени и стандартных частот, для которых, я уверен, он будет являться неоценимым справочным средством в их работе.

Х.Г. Кимбол

Женева, 1996 год

Благодарности

Мы хотели бы поблагодарить следующие администрации и организации за их любезную поддержку и за участие их экспертов:

Францию, Германию (Федеративную Республику), Италию, Швейцарию (Конфедерацию), Соединенные Штаты Америки, Лаборатории Хьюлит-Паккард (США), Istituto Elettrotecnico Naczionale G. Ferrar (Италия), Лабораторию Jet Propulsion (США), Laboratoire de L'Horloge Atomique (Франция), Национальный Институт Стандартов и Технологий (США), Observatoire de Neuchatel (Швейцария), Observatoire de Paris (Франция), Physikalische-Technische Bundesanstalt (Германия), Polytechnico di Torino (Италия) и Международную палату мер и весов [Bureau international des poids et mesures (BIPM)],

и выразить благодарность за содействие, полезные советы и обсуждения следующим лицам:

Глава 1	Клод Одойн	Laboratoire de L'Horloge Atomique, Франция;
Глава 2A	Андреас Бауч	Physikalische-Technische Bundesanstalt, Германия;
Глава 2B	Роджер Билер	Национальный Институт Стандартов и Технологий, США;
Глава 3	Лорен-Гай Бернье	Observatoire de Neuchâtel, Швейцария;
Глава 4	Фрэд Уоллс	Национальный Институт Стандартов и Технологий, США;
Глава 5	Ричард Л. Сиднор	Jet Propulsion Laboratory, США;
Глава 6	Клодин Томас	Bureau international des poids et mesures, Франция;
Глава 7	Зигфридо Лескьютта	Polytechnic di Torino, Италия;
	Франко Кордара	Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferrar, Италия;
Глава 8	Мишель Гранвуд	Observatoire de Paris, Франция;
Глава 9	Леонард Катлер	Hewlett-Packard Laboratories, США;
Глава 10	Дональд Салливан	Национальный Институт Стандартов и Технологий, США;

а также поблагодарить г-на Р.Л. Сиднора и г-на Д.В. Аллана за их редакторскую работу.

Содержание

Предисловие iii

Введение Председателя 7-й Исследовательской комиссии радиосвязи iv

Благодарности v

Введение к Справочнику 1

Глоссарий 2

Глава 1
Введение и основные концепции

1.1 Исторический обзор 11
1.2 Основные принципы стандартов частоты 12
1.2.1 Кварцевые стандарты частоты 12
1.2.2 Атомные стандарты частоты 12
1.3 Основные метрологические концепции 15
1.3.1 Стабильность частоты 15
1.3.2 Точность 18
1.3.3 Воспроизводимость, способность к восстановлению показаний 19
Литература 20

Глава 2
Доступные источники времени и частоты

Обзор Главы 2 23

Часть A
Местные источники частоты и времени

2.1 Введение 24
2.2 Кварцевые стандарты частоты 24
2.2.1 Резонатор 24
2.2.2 Генератор 25
2.3 Стандарт частоты на базе рубидиевой газовой ячейки 25
2.4 Водородный мазер 27
2.5 Стандарт частоты на базе цезиевого пучка 29

Часть B
Управляющие эталоны

2.6 Введение 33
2.7 Факторы, которые необходимо учитывать при выборе и использовании альтернативных служб и методов распространения сигналов времени и частоты 33
2.8 Сравнение альтернативных источников и методов распространения для эталонов точного времени и частоты 34
2.9 Дополнительная информация, касающаяся различных альтернативных служб, систем и методов 34
Литература 46
Библиография 47

Глава 3
Описание: частотная область, временная область

3.1 Введение 51
3.2 Модель генератора 51
3.2.1 Векторная модель фазора и аналитический сигнал 51
3.2.2 Малошумящий генератор 51
3.2.3 Спектр малошумящего генератора 52
3.2.4 Генератор с высоким уровнем шума 53
3.2.5 Спектр генератора с высоким уровнем шума 53

3.2.6 Эффект умножения частоты 53
3.2.7 Демодуляция шумовых процессов 54
3.2.8 Стандартное определение шумовых процессов 54
3.2.9 Мультипликативный и аддитивный шум 55
3.2.10 Полиномиальная модель 56
3.3 Описание: определения и методы 57
3.3.1 Спектральная область 57
3.3.2 Временная область 58
3.3.3 Окружающая среда 74
3.4 Переход к следующей главе 74
3.5 Приложение: случайные процессы 75
3.5.1 Введение 75
3.5.2 Определение случайного процесса 75
3.5.3 Стационарные случайные процессы 75
3.5.4 Нестационарные случайные процессы 75
3.5.5 Автокорреляционная функция 75
3.5.6 Спектральная плотность мощности 75
3.5.7 Линейная фильтрация случайных процессов 76
Литература 77

Глава 4

Методы измерения (Метрология)

Введение 81
4.1 Прямые измерения времени (фазы) и частоты 90
4.1.1 Прямые измерения времени (фазы) 90
4.1.2 Прямые измерения частоты 91
4.2 Гетеродинные измерения частоты и фазы (времени) 92
4.2.1 Гетеродинные измерения фазы (времени) 94
4.2.2 Гетеродинные измерения частоты 94
4.2.3 Гетеродинные измерения шума ФМ 95
4.2.4 Системы измерения времени со сдвоенным смесителем 101
4.2.5 Системы измерения, основанные на импульсах привязки 102
4.2.6 Цифровые методы для измерений частоты и ФМ 104
4.2.7 Измерения при помощи трех источников 104
4.2.8 Системы измерения с взаимной корреляцией 104
4.3 Измерения частоты и ФМ шума одиночного генератора 105
4.3.1 Измерения частоты и ФМ шума с применением линии задержки 106
4.4 Измерения шума АМ 107
Ссылки 108

Глава 5

Характеристики различных стандартов частоты

5.1 Определения и обсуждение: критерии и применение 112
5.1.1 Описание случайных процессов 112
5.1.2 Систематические воздействия 112
5.2 Характеристика различных источников частоты 114
Литература 118

Глава 6

Шкалы времени

6.1 Введение 121
6.1.1 Универсальное Время 121
6.1.2 Эфемерное Время 121
6.1.3 Международное Атомное Время 122
6.1.4 Всемирное Координированное Время 123
6.2 Шкалы времени в общей теории относительности 124
6.2.1 Системы координат в общей системе относительности 124
6.2.2 Резолюция A4 IAU 1991 года 124
6.2.3 Международное Атомное Время 125

6.2.4 Другие шкалы координатного времени 125
6.3 Создание шкал времени 126
6.3.1 Ожидаемое качество 126
6.3.2 Данные отсчета времени 128
6.3.3 Алгоритм стабильности 133
6.3.4 Точность интервала в шкале времени 140
6.3.5 Примеры 140
6.4 Распространение шкал времени 142
6.5 Выводы 146
Ссылки 147

Глава 7
Использование источников частоты

7.1 Использование источников частоты в науке и технике 151
7.2 Метрология 151
7.2.1 Сравнение точности между стандартами времени и стандартами других основных величин 151
7.2.2 Связь между единицей времени и другими единицами 152
7.3 Фундаментальная и прикладная физика 153
7.3.1 g, Ускорение силы тяжести 153
7.3.2 GM, произведение гравитационной постоянной на массу Земли 153
7.3.3 Гравитационное поле Земли 154
7.3.4 Интерферометрия со сверхдлинной базой (VLBI) и квази-VLBI 154
7.4 Определение местоположения и навигация 154
7.4.1 Навигация по конусу 155
7.4.2 Навигация по окружности или сфере 156
7.4.3 Навигация по гиперболе 159
7.4.4 Гипербола, гиперболоид и их свойства 159
7.4.5 Требования к точности стандартов частоты, используемых в навигационных системах 160
7.5 Электросвязь 160
7.5.1 Аналоговые системы 161
7.5.2 Цифровые системы 161
7.6 Другие применения 162
7.6.1 Применения в автомобилях 163
7.6.2 Электросиловые системы и подача сжатого газа 163
7.6.3 Измерительная аппаратура 163
7.6.4 Доплеровский радар 165
Ссылки 165
Литература 165

Глава 8
Опыт эксплуатации, проблемы, ловушки

8.1 Средства измерения частоты и времени 167
8.1.1 Выбор эталона 167
8.1.2 Методы для использования при эксплуатации 168
8.2 Данные и примеры из практики эксплуатации 173
8.2.1 Стандарты частоты и времени 173
8.2.2 Примеры возникающих проблем 175
8.2.3 Сверка частоты и времени 175
8.2.4 Другие данные, системная организация, идеи и проблемы, связанные с обработкой 176
8.3 Выводы 177
Ссылки 178

Глава 9
Перспективы

9.1 Введение 180
9.2 Общий обзор 180
9.3 Устройства на газовых ячейках 180
9.4 Стандарты на цезиевых пучках 181
9.5 Водородные мазеры 182
9.6 Стандарты на ионных ловушках 183

9.7 Цезиевые источники 184
9.8 Кварцевые генераторы 184
9.9 Генераторы, стабилизированные по GPS 185
9.10 Стабилизированный генератор с охлажденным сапфировым резонатором 186
9.11 Оптические стандарты частоты 186
9.12 Заключение 186

Глава 10
Выводы

10.1 Общий обзор 188
10.2 Часы и генераторы 188
10.3 Методы измерения и их описание 189
10.4 Шкалы времени, согласование и распространение 190
10.5 Современное состояние 191

Введение к Справочнику

За последние несколько десятилетий атомные часы прошли путь от лабораторных разработок до их широкомасштабного использования. Улучшение технологии кварцевых генераторов и систем спутниковой передачи сигналов времени предоставило еще несколько десятилетий для целей усовершенствования атомных часов. Навигация, связь и энергетические системы, все они значительно выиграли от таких улучшений. Передача сигналов точного времени совершила переход от новой разработки до необходимости практического использования, а также много выгод наблюдается и от других применений. Одной из причин этого является то, что измерение частоты — это не только самое точное измерение, известное человеку, но, кроме того, частота является самой эффективной метрологической единицей с точки зрения расходов. Следовательно, многие применения зависят от основ передачи сигналов точного времени.

Этот Справочник подготовлен в качестве ответа этой быстро растущей и все более объединяющейся группе пользователей. Его цель, таким образом, предоставить помощь и руководство в работе как профессионалу, так и начинающему и будущему пользователю точных сигналов времени, чтобы наилучшим образом удовлетворить их требованиям. Справочник затрагивает вопросы, связанные с выбором источника и его надлежащим использованием.

Поскольку этот Справочник адресован гораздо более широкой аудитории, чем только группе специалистов, занимающихся вопросами времени и частоты, была сделана попытка объяснить используемую номенклатуру и символы. В начале приведен Глоссарий. Глава 3, характеризующая источники времени и частоты, написана с использованием терминологии техники связи. Справочник в целом отвечает стандартам ИИЭР по номенклатуре за исключением Главы 3, а в Главе 3 есть переводная таблица для того, чтобы те, кто обладает знаниями в технике связи, могли, в соответствии со своей компетенцией, узнать соответствующие обозначения в ИИЭР и наоборот. Глава 10, заключительная глава, связывает вместе самое основное в каждой из глав и, вероятно, хуже воспринимается, если ее читать первой, поскольку обеспечивает как хорошее начало, так и завершение этой работы.

Были приложены значительные усилия для поддержания общей последовательности и целостности в изложении Справочника. Главы 1 и 2 дополняют друг друга, обеспечивая описание физических основ и источников стандартов и систем времени и частоты. Глава 4 (которая большей частью является экспериментальной) написана на базе Главы 3 (которая большей частью является теоретической) и вместе они закладывают основу для характеризации систем эталонной частоты и точного времени. Используя материалы первых четырех глав, Глава 5 резюмирует их эксплуатационные характеристики, включая влияние окружающей среды. Глава 6 показывает возможности и важность групп часов, используя инструментарий, описанный в предыдущих главах, плюс некоторые очень важные концепции создания группы. Эта глава очень важна для согласованной работы центров (новых или старых), занимающихся отсчетом времени. В Главе 7 представлено множество существующих сейчас и некоторых ожидаемых применений. Глава 8, это “то, чего следует остерегаться”, написана таким образом, чтобы другие не повторяли прошлых ошибок и читатель мог учиться на опыте специалистов в этой области. Глава 9 очень полезна для проектировщика при составлении проектов на будущее. И снова, Глава 10 является очень важным обобщением каждой из глав, а также более подробно показывает, как пользоваться Справочником и как главы соотносятся друг с другом.

Авторы глав были выбраны из числа лучших в мире специалистов, работающих в этой области. Авторы и редакторы приложили свои усилия при написании Справочника в надежде, что он станет основным и полезным справочным пособием на многие годы.

Одно очень важное заключение, касающееся выбора и использования источников и систем точных сигналов частоты и времени, это то, что способность получать высокую точность при низкой стоимости была значительно повышена за последнее десятилетие. Это произошло, главным образом, благодаря использованию спутниковых методов — в основном GPS. При надлежащей конфигурации пара атомных часов и GPS приемник могут представлять собой очень точную и надежную систему для отсчета времени. Мы ожидаем, что по мере развития спутниковых методов источники и системы времени и частоты будут развиваться естественным образом. Наземные методы распространения времени и частоты, вероятно, будут продолжать терять свою значимость.

Глоссарий

1 Введение

Приведенный ниже список терминов является глоссарием для пользователей служб стандартных частот и сигналов времени. Глоссарий составлен из терминов, взятых из Рекомендации МСЭ-R TF.686, Международного Метрологического Словаря общих и базовых терминов (VIM), опубликованного ИСО, а также из других общепринятых терминов в области сигналов частоты и времени. Точные измерения времени часто зависят от релятивистских эффектов. Термины и определения, приведенные ниже, не всегда учитывают эти влияния и не внегда указывают на необходимость рассмотрения этих эффектов. Представлено два типа терминов: термины, обычно используемые в службах стандартных частот и сигналов времени, и термины более общего применения, которые имеют конкретное отношение к данной тематике. В отношении терминов последнего типа были предприняты попытки обеспечить их максимальное согласование с определениями Международного электротехнического словаря (IEV). Также приводятся эквиваленты терминов на английском, французском и испанском языках (термины выделены курсивом). Термины, взятые из Рекомендации МСЭ-R TF.626 не выделены, термины из Регламента радиосвязи МСЭ и публикаций ИСО помечены соответственно “РР” и “ИСО”. Дополнительные термины могут быть найдены в Technical Note 1297, 1994, “Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncerainty of NIST Mesuarment Results” Национального Института Стандартов и Технологий (NIST).

2 Определения

Определения на английском языке следуют в алфавитном порядке.

Точность; *Accuracy; Exactitude; Exactitud*

Степень соответствия измеряемой или вычисленной величины ее истинному значению (см. “неопределенность”).

(ИСО) Точность обычно характеризуется суммарной неопределенностью измеряемой величины.

Старение; *Ageing; Vieillissement; Envejecimiento*

Систематическое изменение частоты со временем из-за внутренних изменений в генераторе.

Примечание. — Это изменение частоты со временем, когда внешние факторы по отношению к генератору (окружающая среда, источник питания и т. д.) остаются неизменными.

Шкала атомного времени; *Atomic Time Scale; Échelle De Temps Atomique; Escala De Tiempo Atómico*

Шкала времени, основанная на явлении атомного или молекулярного резонанса.

Калибровка[*] ; *Calibratión; Étalonnage; Calibración*

Процесс определения и измерения отклонений в приборах и/или процедурах.

Примечание. — Во многих случаях, например в генераторе частоты, калибровка зависит от стабильности устройства и, следовательно, ее результат является функцией времени и времени усреднения.

(ИСО) Процесс определения и измерения расхождения между измеренным значением и значением эталонного стандарта, используемого в качестве объекта испытаний.

Часы; *Clock; Horloge; Reloj*

Устройство для измерения и/или отображения времени.

---

[*] Это определение отличается от определений Международного электротехнического словаря (IEV), но МСЭ-R придерживается мнения, что данное определение более подходит для службы стандартных частот и сигналов времени.

Разница показаний часов; *Clock time difference; Differénce entre temps d'horloge; Diferencia de tiempo de reloj*

Разница между показаниями двух часов в один и тот же момент времени.

Примечание. — Чтобы избежать путаницы в знаке, должны быть даны алгебраические величины с применением следующего условия. Для момента времени T эталонной шкалы времени: пусть a — показания шкалы времени A, и b — показания шкалы времени B; разница между двумя шкалами выражается как $A - B = a - b$ в момент времени T. То же условие используется, когда A и B являются часами.

Когерентность частоты; *Coherence of frequency; Coherence de fréquence; Coherencia de frequencia*

См. "когерентность фазы".

Когерентность фазы; *Cohérence de phase; Coherencia de fase*

Существует, если два периодических сигнала с частотами M и N сохраняют ту же разность фаз после M циклов первого сигнала и N циклов второго, где M/N является рациональным числом, которое получено умножением и/или делением одной и той же основной частоты.

Координированные часы; *Coordinated clock; Horloge coordonnée; Reloj coordinado*

Часы, синхронизированные в установленных пределах, с пространственно разнесенными эталонными часами. [См. также Отчет 439 (Дюссельдорф, 1990), рассматривающий концепцию координированного времени].

Координатное время; *Coordinate time; Temps-coordonnee; Tiempo-coordenada*

Концепция времени в специальной системе координат, действительная в области пространственного региона с изменяющимся гравитационным потенциалом.

Примечание. — Если шкала времени реализуется в соответствии с концепцией координатного времени, то она называется координатной шкалой времени.

Пример: TAI является координатной шкалой времени в земной системе отсчета, с секундой в системе СИ, как единицей шкалы во вращающемся геоиде.

Шкала координированного времени; *Coordinated time scale; Échelle de temps coordonnee; Escala de tiemmpo coordinada*

Шкала времени, синхронизированная в установленных пределах, с эталонной шкалой времени.

Всемирное координированное время, UTC; *Coordinated Universal Time (UTC); Temps universel coordonne; Tiempo Universal Coordinado*

Шкала времени, Международным бюро мер и весов (BIPM) и Международной службой вращения Земли (IERS), которая формирует основу координированного распространения стандартных частот и сигналов времени (см. Рекомендацию МСЭ-R TF.460).

Она точно соответствует по скорости TAI, но отличается от него на целое число секунд. Шкала UTC подстраивается путем добавления или удаления секунд (положительные или отрицательные дополнительные секунды), чтобы обеспечить приблизительное соответствие с UT1.

Дата; *Date; Date; Fecha*

Показания конкретной шкалы времени.

Примечание. — Дата обычно выражается в годах, месяцах, днях, минутах, секундах и долях секунды. Также "Юлианская дата" (ЮД) и "Измененная Юлианская дата" (ИЮД) являются полезными способами измерения даты. (см. "Юлианская дата" и " Измененная Юлианская дата").

Уход (подразумевается уход частоты); *Drift; Dérive; Deriva*

Систематическое изменение частоты генератора со временем.

Примечание. — Уход вызывается процессами старения и изменениями окружающей среды, а также другими, внешними по отношению к генератору факторами (см. старение).

DUT1; *DUT1; DUT1; DUT1*

Прогнозируемая величина разности UT1 — UTC при распространении сигналов времени. DUT1 может рассматриваться, как корректировочная величина, добавляемая к UTC для получения лучшего приближения к UT1. Величины DUT1 даны Международной службой вращения Земли (IERS) целым кратным числом десятых долей секунды (см. Всемирное время).

Ошибка* ; *Error; Erreur; Error*

Отклонение величины от ее предполагаемой правильной величины.

(ИСО) разность между измеренным и истинным значениями.

Частота* ; *Frequency; Fréquence; Frecuencia*

Если T — период повторяющегося явления, то частота $f = 1/T$. В системе единиц СИ период выражается в секундах, а частота — в герцах.

Разность частот: *Frequency difference; Diffeérence de fréquence; Diferencia de frecuencia*

Алгебраическая разность между двумя значениями частоты.

Уход частоты* ; *Frequency drift; Dérive de fréquence; Deriva de frecuencia*

См. “уход” и “старение”.

Нестабильность частоты; *Frequency instability; Instabilité de fréquence; Inestabilidad de frecuencia*

Спонтанное и/или вызванное окружающей средой изменение частоты за данный промежуток времени.

Примечание. — Обычно различают систематические эффекты, такие как уход частоты, и стохастические флуктуации частоты. Были разработаны специальные виды дисперсии для описания этих флуктуаций. Систематические нестабильности могут вызываться радиацией, давлением, температурой, влажностью и т. д. Обычно они зависят от полосы пропускания измерительной системы и/или времени выборки или времени интеграции. Случайные или стохастические нестабильности обычно характеризуются во временной и/или частотной областях (Рекомендация МСЭ-R TF.538).

Во многих контекстах термин “стабильность” используется вместо термина “нестабильность”. Такое использование приемлемо.

Смещение частоты; *Frequency offset; Décalage de fréquence; Separación de frecuencia*

Систематическая разность между полученным значением и номинальным значением частоты.

Сдвиг частоты; *Frequency shift; Déplacement de fréquence; Desplazamiento de frecuencia*

Преднамеренное изменение частоты.

Стабильность частоты; *Frequency stability; Stabilité de fréquence; Estabilidad de frecuencia*

См. “нестабильность частоты”.

Стандарт частоты; *Frequency standard; Étalon de fréquence; Patrón de frecuencia*

Генератор, колебания на выходе которого используются как стандарт частоты.

Примечание. — См. “Первичный стандарт частоты” и “вторичный стандарт частоты”.

Момент; *Instant; Instant; Instante*

Момент времени.

---

* Это определение отличается от определений Международного электротехнического словаря (IEV), но МСЭ-R придерживается мнения, что данное определение более подходит для службы стандартных частот и сигналов времени.

Международное атомное время; *International Atomic Time (TAI); Temps atomique international; Tiempo Atómico Internacional*

Шкала времени, установленная Международным бюро мер и весов (BIPM) на основе показаний атомных часов, функционирующих в нескольких учреждениях, согласующихся по определению секунды, единицы времени в системе СИ.

Юлианская дата; *Julian Date (JD); Date julienne (DJ); Fecha Juliana (FJ)*

Номер юлианского дня, за которым следует часть суток, прошедшая со времени предыдущего полудня (12 ч. 00 мин. UT).

Пример: Дата 1900 г. январь, 0,5 суток UT — соответствует ЮД 2 415 020,0.

Примечание. — Юлианская дата обычно относится к UT1, хотя если указывается, но может использоваться и в других случаях, если это так заявлено.

Номер юлианского дня; *Julian day number; Numéro de jour julien; Número de día juliano*

Номер определенного дня из непрерывного счета дней, начиная с 12:00 UT на 1 января 4713 г. до н. э., вводящего юлианский календарь (начало нулевого юлианского дня).

Пример: День, продолжающийся от 0,5 дня (UT) января 1900 г. до 1,5 дня UT января 1900 г. имеет номер 2 415 020.

Дополнительная секунда; ***Leap second; Seconde intercalaire; Segundo intercalar***

Преднамеренный временной сдвиг в одну секунду, используемый для подстройки времени UTC с целью обеспечения приблизительного соответствия со временем UT1. Введенная секунда называется положительной дополнительной секундой, а пропущенная секунда называется отрицательной дополнительной секундой (см. Рекомендацию МСЭ-R TF.460).

Измененная юлианская дата; *Modified Julian Date (MJD); Date julienne modifiée; Fecha Modificada del Calendario Juliano*

Юлианская дата менее 2 400 000,5 дней (см. Рекомендацию 457).

Измененный юлианский день; *Modified Julian Day*

Целая часть измененной юлианской даты.

Номинальное значение*; *Nominal value; Valeur nominale; Valor nominal*

Установленное или подразумеваемое значение, которое не зависит от любой неопределенности в его реализации.

Примечание. — В устройстве, которое реализует некоторую физическую величину, номинальное значение является установленным значением этой величины. Это — идеальное значение и, следовательно, не имеет допуска.

Нормализованное значение; *Normalized value; Valeur normée; Valor normalizado*

Отношение значения к номинальному значению.

Примечание 1. — Это определение может использоваться применительно к: частоте, отклонению частоты, разности частот, уходу частоты, частотному сдвигу и т. д.

Примечание 2. — Вместо термина “нормализованное” приемлем термин “относительное”, но термина “дробный” следует избегать.

Смещение*; *Offset; Décalage; Separación*

Систематическая разность между реализованным и номинальным значениями. (См. также “Нормированное смещение”.)

Фаза; *Phase; Phase; Fase*

Фаза — любое возможное и различимое состояние обычно периодического явления, аналитически описываемого с помощью функции времени (или пространства).

---

* Это определение отличается от определений Международного электротехнического словаря (IEV), но МСЭ-R придерживается мнения, что данное определение более подходит для службы стандартных частот и сигналов времени.

Фаза может определяться через время ее появления, прошедшее с определенного эталонного момента, которое правильно называется “фазовым временем” (часто сокращаемым до термина “фаза”). В частности, если рассматриваемое явление изменяется по синусоидальному закону, то фаза может определяться как по углу, так и по времени, измеренным от установленного эталона, зависящего от выбранной размерности эталонного периода (а именно 2π или T).

В службе стандартных частот и сигналов времени в основном рассматривается разность фазового времени, то есть разность времени между двумя определенными фазами одного и того же явления или двух различных явлений.

Фазовый сдвиг; *Phase shift; Déphasage; Desplazamiento de fase*

Преднамеренное изменение фазы в сравнении с эталоном.

Девиация фазы; *Phase deviation; Décalage de phase; Desviación de fase*

Отклонение фазы от эталона.

Точность; *Precision; Précision; Precisión*

Степень взаимной согласованности в серии отдельных измерений; часто, но не обязательно, выражается с помощью стандартного отклонения.

Первичный стандарт частоты; *Primary frequency standard; Étalon primaire de fréquence; Patrón primario de frecuencia*

Стандарт частоты, частота которого соответствует принятому определению секунды, а установленная точность достигается без внешней калибровки устройства.

Примечание. — Секунда определяется следующим образом:

> “длительность 9 192 631 770 периодов радиации, соответствующая переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133" (XIII Генеральная конференция мер и весов, 1967 г.).

Первичные часы; *Primary clock; Horloge primaire; Reloj primario*

Эталон времени, работающий без внешней калибровки (см. “эталон времени”).

Истинное время; *Proper time; Temps propre; Tiempo propio*

Местное время, показываемое идеальными часами, с учетом релятивистских эффектов (см. Отчет 439).

Примечание. — Это время отличается от координатного времени, которое подразумевает использование теории и вычислений.

Если шкала времени реализуется в соответствии с концепцией истинного времени, то такая шкала называется шкалой истинного времени.

Примеры:

a) для истинного времени: секунда определяется в истинном времени атома цезия;

b) для шкалы истинного времени: шкала времени, созданная в лаборатории и не передаваемая за пределы этой лаборатории.

Повторяемость; *Repeatability; Répétabilité*

(ИСО) Близость результатов последовательных измерений, проведенных при неизменных условиях измерений:

a) в отношении отдельного устройства, когда определенные параметры независимо подстраиваются при оговоренных условиях использования — стандартное отклонение величин, измеренных с помощью данного устройства. Более подходящее название: повторяемость показаний одного и того же устройства с применением дополнительной подстройки, способность к восстановлению показаний;

b) в отношении отдельного устройства, неоднократно включаемого в работу без дополнительной подстройки — стандартное отклонение величин, измеренных с помощью данного устройства. Более подходящее название: повторяемость показаний одного и того же устройства без дополнительной подстройки;

c) в отношении независимых устройств одной конструкции — стандартное отклонение величин, измеренных с помощью данных устройств. Более подходящее название: повторяемость показаний различных устройств одной конструкции, используемых в одинаковых условиях.

Воспроизводимость; *Reproducibility; Reproductibilité; Reproductibilidad*

a) В отношении группы независимых устройств одной конструкции — способность этих устройств воспроизводить одни и те же показания.

b) В отношении отдельного устройства, неоднократно включаемого в работу без подстройки — способность воспроизводить одно и то же показание.

Примечание. — Обычно мерой воспроизводимости является стандартное отклонение.

Способность к восстановлению показаний*; *Resettability; Fidélité; Reposicionabilidad*

Это — способность устройства воспроизводить одно и то же показание, когда определенные параметры независимо подстраиваются при оговоренных условиях использования. Этот термин следует использовать вместо термина "повторяемость", который считается неподходящим по отношению к генераторам частоты.

Примечание. — Обычной мерой способности к восстановлению показаний является стандартное отклонение.

Вторичный стандарт частоты; *Secondary frequency standard; Étalon secondaire de fréquence; Patrón secundario de frecuencia*

Стандарт частоты, требующий внешней калибровки.

Стандартная частота; *Standard frequency; Fréquence étalon; Frecuencia patrón*

Частота с известным соотношением со стандартом частоты.

Примечание 1. — Термин "стандартная частота" часто используется для обозначения сигнала, частота которого является стандартной частотой.

Примечание 2. — Термин "стандартная частота" часто используется для частоты из ряда согласованных в МСЭ-R величин, т. е. 1 МГц, 5 МГц и т. д.

Станция стандартных частот и сигналов времени; *Standard frequency and time-signal station; Station de fréquence étalon et/ou signaux horaires; Estación de frecuencias patrón y/o de señales horarias*

Станция, излучающая сигналы стандартных частот и/или сигналы времени.

(RR) Станция, работающая в службе стандартных частот и сигналов времени.

Излучение стандартной частоты; *Standard- frequency emission; Émission de fréquences étalon; Emisión de frecuencias patrón*

Излучение, распространяющее эталонную частоту в регулярные интервалы времени с заданной точностью частоты.

Примечание. — В Рекомендации МСЭ-R TF.460 рекомендуется нормализованное отклонение частоты менее 1×10^{-10}.

Служба стандартных частот и сигналов времени; *Standard Frequency and Time Signal Service; Service des fréquences étalon et des signaux horaires; Servicio de frecuencias patrón de señales horarias*

(PP) Служба радиосвязи для научных, технических и других целей, обеспечивающая передачу определенных частот, сигналов времени, или тех и других, установленной высокой точности, предназначенных для всеобщего приема.

Спутниковая служба стандартных частот и сигналов времени; *Standard Frequency and Time Signal — Satellite Service*; *Service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite; Servicio de frecuencias patrón de señales horarias por satélite*

(PP) Служба радиосвязи, использующая космические станции, установленные на спутниках Земли, для тех же целей, что и служба стандартных частот и сигналов времени.

Излучение стандартных сигналов времени; *Standard-time-signal emission; Émission de signaux horaires; Emisión de señales horarias*

Излучение последовательности сигналов времени в регулярные интервалы с установленной точностью.

---

* Это определение отличается от определений Международного электротехнического словаря (IEV), но МСЭ-R придерживается мнения, что данное определение более подходит для службы стандартных частот и сигналов времени.

Примечание. — В Рекомендация МСЭ-R TF.460 рекомендуется излучать стандартные сигналы времени с точностью в пределах 1 мс с привязкой к UTC, и эти сигналы должны содержать информацию DUT1 в виде специального кода.

Синхронизм; *Synchronism; Synchronisme; Sincronismo*

См. “Синхронизированные шкалы времени”.

Время; *Time; Temps; Tiempo*

Примечание. — В английском языке термин “время” используется для обозначения момента времени (времени суток) или как мера определения временного интервала.

Сравнение времени; *Time comparison; Comparaison de temps; Comparación de tiempos*

Определение разницы между шкалами времени.

Код времени; *Time code; Code horaire; Código horario*

Формат информации, используемый для передачи информации о времени.

Временнóй интервал; *Time interval; Intervalle de temps; Intervalo de tiempo*

Промежуток времени между двумя моментами.

Маркер времени; *Time marker; Repère de temps; Marca de tiempo*

Эталонный сигнал, дающий возможность определения дат по шкале времени.

Шкала времени; *Time scale; Échelle de temps; Escala de tiempo*

Система однозначного размещения событий в определенном порядке.

Разница между шкалами времени; *Time scale difference; Différence entre échelles de temps; Diferencia entre escalas de tiempo*

Разница между показаниями двух шкал времени в один и тот же момент.

Примечание. — Во избежание путаницы в знаке должны быть даны алгебраические величины согласно следующему условию. Для момента времени T эталонной шкалы времени: пусть a — показания шкалы времени A, и b — показания шкалы времени B; разница между двумя шкалами выражается как $A - B = a - b$ в момент времени T. То же условие действует и в случае, когда A и B являются часами.

Синхронизированные шкалы времени; *Time scales in synchronism; Échelles de temps en synchronisme; Escalas de tiempo en sincronismo*

Две шкалы времени являются синхронизированными, когда они в любой конкретный момент времени определяют одну и ту же дату.

Примечание. — Если две шкалы времени создаются в территориально разнесенных местах, то следует учитывать время распространения сигналов времени и релятивистские эффекты, включая эталонную систему отсчета (см. Отчет 439).

Показание шкалы времени; *Time scale reading; Lecture d’une échelle de temps; Lectura de una escala de tiempo*

Значение, считанное по шкале времени в определенный момент.

Примечание. — Показание шкалы времени должно определяться с использованием названия шкалы времени (см. Рекомендацию МСЭ-R TF.536).

Единица шкалы времени; *Time scale unit; Unité d’une échelle de temps; Unidad de escala de tiempo*

Определяющий основной временнóй интервал на шкале времени.

Примечание. — Это понятие следует отличать от реализованной единицы шкалы времени.

Спутниковая служба сигналов времени; *Time -signal satellite service; Service des signaux horaires par satellite; Servicio de señales horarias por satélite*

Служба радиосвязи, использующая спутники Земли для тех же целей, что и служба сигналов времени.

Стандарт времени; *Time standard; Étalon de temps; Patrón de tiempo*

a) Устройство, используемое для реализации единицы времени.

b) Непрерывно работающее устройство, используемое для реализации шкалы времени в соответствии с определением секунды и соответствующим образом выбранным началом отсчета.

(ИСО) Непрерывно работающее устройство, используемое для реализации шкалы времени.

Такт; *Time step; Saut de temps; Salto de tiempo*

Разрыв непрерывности в шкале времени в некоторый момент.

Примечание. — Такт положителен (+), если показание шкалы времени увеличивается, и отрицателен (–), если показание уменьшается в данный момент.

Неопределенность; *Uncertainty; Icertitude; Inceridumbre*

Пределы доверительного интервала измеренной или вычисленной величины.

Примечание. — Должна быть определена вероятность пределов доверительного интервала, предпочтительно при значении одна сигма.

(ИСО) Параметр, относящийся к результатам измерения, характеризующий дисперсию величин, которые связаны с измеряемой величиной в разумных пределах.

Часто можно различать две составляющих, случайную составляющую и составляющую, возникающую из-за систематических эффектов.

Случайная неопределенность часто выражается стандартным отклонением или множеством стандартных отклонений для повторяющихся измерений

Составляющая, возникающая из-за систематических эффектов, как правило, оценивается на основании всей имеющейся информации о соответствующих параметрах.

Всемирное время (UT); *Universal Time (UT); Temps universel; Tiempo Universal*

Всемирное время (UT) — общее обозначение шкал времени, основанных на вращении Земли. В тех применениях, в которых точность в несколько десятых долей секунды не может быть допущена, необходимо определить разновидность всемирного времени, например UT1, которая непосредственно связана с вращением Земли (см. Рекомендацию МСЭ-R TF.460).

Всемирное координированное время; *Universal Time Coordinated (UTC); Temps universel coordonné; Tiempo universal coordinado*

См. “Координированное всемирное время”, которое является эквивалентным выражением.

Глава 1
Введение и основные концепции

Содержание

1.1 Исторический обзор 11
1.2 Основные принципы стандартов частоты 12
1.2.1 Кварцевые стандарты частоты 12
1.2.2 Атомные стандарты частоты 12
1.2.2.1 Спектроскопические свойства, вызывающие интерес 12
1.2.2.2 Пассивные и активные атомные стандарты частоты 12
1.3 Основные метрологические концепции 13
1.3.1 Стабильность частоты 15
1.3.1.1 Определение 15
1.3.1.2 Кварцевые генераторы 15
1.3.1.2.1 Случайные флуктуации частоты 15
1.3.1.2.2 Систематические воздействия 16
1.3.1.3 Атомные стандарты частоты 16
1.3.1.3.1 Кратковременная стабильность частоты 16
1.3.1.3.2 Средневременная стабильность частоты 16
1.3.2 Точность 18
1.3.2.1 Остаточные смещения частоты 18
1.3.2.2 Определение 18
1.3.2.3 Первичные и вторичные стандарты частоты 18
1.3.3 Воспроизводимость, способность к восстановлению показаний 19

Литература 20

1.1 Исторический обзор

Кварцевые генераторы были первыми стандартами частоты и времени, которые использовали преимущества развития электронной технологии. Они основывались на открытии пьезоэлектричества П. Кюри в 1880 г. (Нобелевская премия 1903 г.) и изобретении первого электронного усилителя (триод) Ли де Форестом в 1907 г. Такие генераторы начали использовать в системах связи и в метрологических лабораториях времени и частоты между 1920 и 1930 гг. Большей частью они использовались во время Второй мировой войны и с того времени много усилий было затрачено на улучшение конструкции резонатора, оптимизацию характеристик соответствующей электронной схемы и понимание физической природы кратковременных нестабильностей частоты, а также чувствительности к внешним факторам и процессам старения [Besson, 1977; Filler и Vig, 1993; Gerber и Ballato, 1985; Vig, 1991; Walls и др., 1992; Walls и Ggagnepain, 1992]. В рамках данного Справочника, высококачественные кварцевые генераторы используются как вторичные стандарты частоты и времени. Кроме того, они применяются в большинстве атомных стандартов частоты, где их частота контролируется атомным резонансом и где они являются источником выходных сигналов.

Идея использования резонансных свойств ансамбля изолированных атомов (т. е. в виде пара) для создания стандарта частоты и часов, принадлежит И.И. Раби, 1939 г. (Нобелевская премия 1944 г.). Первые атомные часы были созданы в Национальном Бюро Стандартов (NBS) в 1948—1949 гг. с использованием микроволновой линии поглощения аммиака. Наиболее важные открытия, которые определили структуру действующих в настоящее время атомных стандартных частот на основе цезия, рубидия и водорода, следующие: a) метод магнитного резонанса двух разделенных полей и водородный мазер, открытые Н.Ф. Рамсеем, соответственно в 1950 и 1960 гг. (Нобелевская премия 1989 г.); b) оптическая накачка, выполненная А. Кастлером в 1950 г. (Нобелевская премия 1966 г.); и c) эффект мазера в аммиачном мазере, зарегистрированный С.Г. Таунсом, Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым в 1955 г. (Нобелевская премия 1964 г.). В продолжение исследований В. Пауля и Г.Дж. Дехмелта (Нобелевская премия 1989 г.) [Wineland и др., 1990] проводятся научные исследования по разработке атомных стандартов частоты, которые основаны на резонансе ионов, находящихся в электронной ловушке.

Первый стандарт частоты на пучке атомов цезия был создан в NBS в начале 50-х годов и первые атомные часы на основе цезия начали действовать в Национальной Физической Лаборатории (NPL) (Англия) в июне 1955 г. [Essen и Parry, 1957]. Первые коммерческие приборы появились в 1958 г. Вскоре, в начале 60-х годов, также началось производство рубидиевых стандартов частоты и водородных мазеров.

Прибор NPL на пучке атомов цезия использовался в 1958 г. для измерения расстояния между линиями сверхтонкой невозбужденной структуры атома цезия, находящегося в основном состоянии, в терминах определяемой на то время эфемеридной секунды. Этот результат использован в современном определении единицы времени, которое было принято в 1967 г. на 13-й Конференции мер и весов (Thirteen Conférence Générale des Poids et Mesure): "*Секунда — продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения , соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133*" [BIPM, 1991].

Лабораторные цезиевые стандарты частоты были изготовлены в больших лабораториях, работающих в области частоты и времени, например в Канаде, Китае, во Франции, в Германии, Японии, России и Соединенных Штатах Америки, с целью как можно точнее определить секунду. На момент написания, лучшая точность, достигнутая на некоторых из этих первичных стандартов частоты, составляет около $1 \rightarrow 2 \times 10^{-14}$ [Bauch и др., 1988; Dorenwendt и др., 1990; Lee и др., 1995].

Со времени их появления, стабильность частоты и надежность изготовленных атомных стандартов частоты, использующих резонанс в атомах цезия, рубидия или водорода, были значительно улучшены. Более того, их габариты уменьшены.

Прогресс в разработке лабораторных первичных стандартов частоты и полевых устройств является результатом лучшего понимания, заложенной в них физики, природы нестабильностей частоты и остаточных смещений частоты. Конечно, прогресс в технологии электронных цепей, которые необходимы для исследования атомного перехода и для управления кварцевого генератора также внес свой вклад в их развитие. Обзор основных принципов и свойств атомных стандартов частоты дается в следующих работах: [Hellwig, 1985; Vanier и Audoin, 1989; Busca и др., 1990; Cutler, 1990; Vessot, 1990; Lewis, 1991; Audoin и др., 1992; Mattison, 1992; и Riley, 1992].

В настоящее время исследования направлены на применение оптической накачки в цезиевых стандартах частоты [Audoin, 1992], использование методов лазерного охлаждения ионов [Wineland и др., 1990; Prestage и др., 1994], лазерное охлаждение в стандартах частоты, использующих источник атомов цезия [Clairon и др., 1995; Gibble и Chu, 1993] и на развитие криогенного водородного мазера [Vessot и др., 1990].

1.2 Основные принципы стандартов частоты

В этой главе приведен краткий обзор по принципам работы имеющихся стандартов частоты, а также основные метрологические концепции для их описания, включая стабильность и точность. Более подробное описание приборов, включая характеристики их работы, приведены в Части А Главы 2.

1.2.1 Кварцевые стандарты частоты

Кварцевым стандартом частоты является электронный генератор, в котором элементом, определяющим частоту, является резонатор, изготовленный из кристалла кварца. Резонансная частота, в основном, определяется макроскопическими свойствами вещества основы. Она поэтому зависит от всех внешних воздействий, которые изменяют размеры и свойства материала и, на практике, не может быть определена из фундаментальных свойств отдельных атомов. Поэтому их частоту необходимо калибровать по отношению к более точному источнику частоты. Высокоточные кварцевые устройства широко используются в метрологических лабораториях частоты и времени как вторичные стандарты частоты. Более того, выходной сигнал большинства атомных стандартов частоты снимается с кварцевого генератора, управляемого напряжением (КГУН), причем их частота контролируется атомным резонансом.

1.2.2 Атомные стандарты частоты

В отличие от кварцевых генераторов, эталонная частота в атомных стандартах частоты в основном определяется внутренними свойствами атомов специально выбранных элементов, другими словами, фундаментальными константами, полученными из основных взаимодействий между элементарными частицами.

При нашем сегодняшнем уровне знаний физики и астрономии, мы можем допустить, что свойства атомов фиксированы и не зависят от пространства и времени (в рамках известных релятивистских эффектов). Поэтому можно создать и распространить оборудование, которое доставит одну и ту же частоту в несколько различных мест при условии, что в данном элементе наблюдается заданный переход и принимая во внимание релятивистские эффекты (например, связанные с высотой). После этого эталонная частота становится доступной в пределах какой-либо местности и в реальном времени. Она остается постоянной с течением времени и равной эталонной частоте других атомных стандартов частоты, находящихся в различных местах на Земле в непосредственной близости (в рамках неопределенностей, указанных в Главе 2, Части А и Главе 5). На практике мы почти всегда имеем дело с тремя типами стандартов, в которых используются свойства следующих элементов: водород (водородный мазер), рубидий (рубидиевый стандарт частоты на газовой ячейке) и цезий (стандарт частоты на атомном пучке цезия). Они будут рассмотрены позднее, в то время как будущие разработки рассматриваются в Главе 9.

1.2.2.1 Спектроскопические свойства, вызывающие интерес

Рассмотрим атом данного элемента. Он имеет квантовые уровни точно определенной энергии. Пусть E_1 и E_2 будут энергии двух из этих уровней, при этом $E_2 > E_1$. Переход между этими двумя уровнями может произойти при воздействии электромагнитного излучения частоты ν_0. Сохранение энергии определяет значение ν_0. Это приводит к соотношению Бора:

$$h\nu_0 = E_2 - E_1, \tag{1.1}$$

где h — постоянная Планка. Поэтому может наблюдаться резонанс. Этот резонанс имеет ширину $\Delta\nu$, которая дается отношением неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta\nu\Delta t \geq 1. \tag{1.2}$$

Для переходов, рассматриваемых здесь, Δt — практическая продолжительность их наблюдения. Она ограничивается различными физическими явлениями или процессами, такими как время пролета, релаксация и т. д., и она

имеет диапазон от примерно 1 мс в рубидиевом элементе и в канале с атомным пучком цезия до 1 с в водородном мазере. При данных величинах ν_0 (см. таблицу 1.1) и ширине линии, определяемой этими процессами, добротность атомной линии $\nu_0/\Delta\nu$ обычно находится в пределах между 10^7 и 10^9.

ТАБЛИЦА 1.1

Частота перехода на сверхтонком уровне водорода, рубидия 87 и цезия

Атом	Атомная масса	Частота перехода (Гц) на сверхтонком уровне
H	1	1 420 405 751,770 +/–0,003
Rb	87	6 384 682 612,8 +/–0,5
Cs	133	9 192 631 770*

* (по определению секунды)

В атомных стандартах частоты, интересующие нас два уровня определяются магнитным взаимодействием внутри атома. Оно происходит между магнитным моментом непарного электрона, атома щелочного или подобного щелочному элемента, находящегося в основном состоянии, и магнитным моментом ядра. Это называется взаимодействием на сверхтонком уровне. Это взаимодействие слабое и оно приводит к малой величине $E_2 — E_1$. Следовательно, резонансная частота ν_0 лежит в микроволновом диапазоне частот, как указано в таблице 1.1. Как следствие, которое используется на практике, может быть создана эффективная, небольшая и надежная электронная система, которая способна управлять частотой связанного с ней кварцевого генератора.

Другим неприятным следствием малости величины $E_2 — E_1$ является то, что мы имеем фактически $E_2 — E_1 << kT$, где kT — тепловая энергия. Поэтому, при тепловом равновесии, эти два энергетических уровня всегда заполняются в равной степени. Отсюда следует, что это тепловое равновесие должно быть разрушено для того, чтобы можно было наблюдать либо изменение в атомных свойствах, либо обмен заметного количества энергии, когда имеет место атомный переход. Применяются два различных метода, чтобы преодолеть тепловое равновесие. Первый имеет отношение к тому факту, что эффективный магнитный момент атома имеет противоположные значения, когда атом находится на одном или другом из двух энергетических уровней, которые мы рассматриваем. В результате отклонение атомов в пучке, проходящем в неоднородном и интенсивном магнитном поле, зависит от их внутреннего состояния и они могут разделяться [Gerlach и Stern, 1924; Gerlach, 1925]. Этот метод отбора по состоянию используется в стандартах частоты на атомном пучке цезия и в водородных мазерах. Другой метод основан на оптической накачке [Kastler, 1950]. Кроме взаимодействия сверхтонких уровней 1 и 2 в основном состоянии, атомы имеют возбужденные уровни гораздо большей энергии, такие как уровень 3, показанный на рис. 1.1. Оптическое излучение, имеющее соответствующую длину волны, может, например, перевести атомы с энергетического уровня 2 на уровень 3. Самопроизвольное возвращение на уровни 1 и 2 происходит за очень короткий промежуток времени, < 50 нс. Итоговый результат такой оптической накачки состоит в том, что заселенность одного из энергетических уровней основного состояния (здесь уровень 1) увеличивается за счет другого уровня (уровень 2 в данном примере). В этом заключается принцип подготовки энергетического состояния атомов, в имеющемся стандарте частоты на рубидии и в накачиваемых оптически стандартах частоты на атомном пучке цезия, которые в настоящее время разрабатываются.

1.2.2.2 Пассивные и активные атомные стандарты частоты

Стандарты частоты на рубидиевом элементе и на атомном пучке цезия должны питаться зондирующим микроволновым сигналом для того, чтобы получать необходимую информацию о резонансной частоте атома. Они ведут себя как резонатор и называются пассивными стандартами частоты. Как отклик резонатора, мы получаем отличительный резонансный сигнал I_S, который накладывается на общий сигнал I_t. I_S и I_t являются критериями числа частиц, вносящих вклад в сигнал и в фон, соответственно. Водородные мазеры небольших размеров с компактным резонатором, но увеличенными потерями, могут быть задействованы подобным же образом. Электронная система, которая обнаруживает резонансную частоту и управляет частотой 5 или 10 МГц кварцевого генератора, показана схематически на рис. 1.2. Зондирующий микроволновой сигнал синтезируется из сигнала управляемого напряжением кварцевого генератора, а частотная модуляция налагается. Это создает модуляцию амплитуды ответного сигнала прибора. Он обрабатывается посредством синхронного детектирования для того, чтобы выделить сигнал погрешности, который применяется для контроля управляемого напряжением кварцевого генератора.

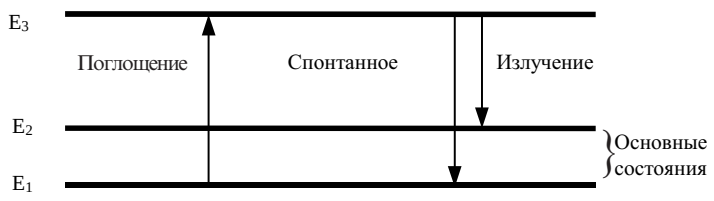


РИСУНОК 1.1

Принцип оптической накачки

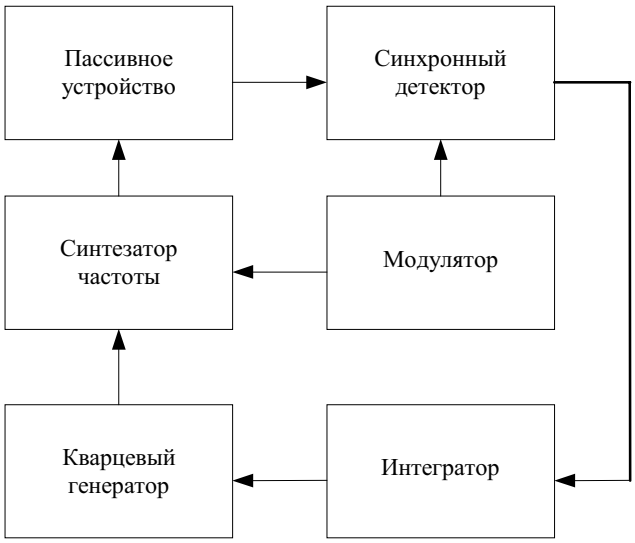


РИСУНОК 1.2

Блок схема управления частотой кварцевого генератора в пассивном стандарте частоты

Водородный мазер, имеющий полноразмерный незагруженный резонатор, генерирует колебание. В этом случае он называется активным стандартом частоты. Электронная система работает по принципам гетеродинных приемников и фазовой автоподстройки частоты, как показано на рис. 1.3. Данная схема синхронизирует фазу кварцевого генератора на частотах 5, 10 или 1000 МГц по колебаниям мазера. Водородный мазер малого размера может активно эксплуатироваться при условии, что добротность резонатора улучшается электронным способом.

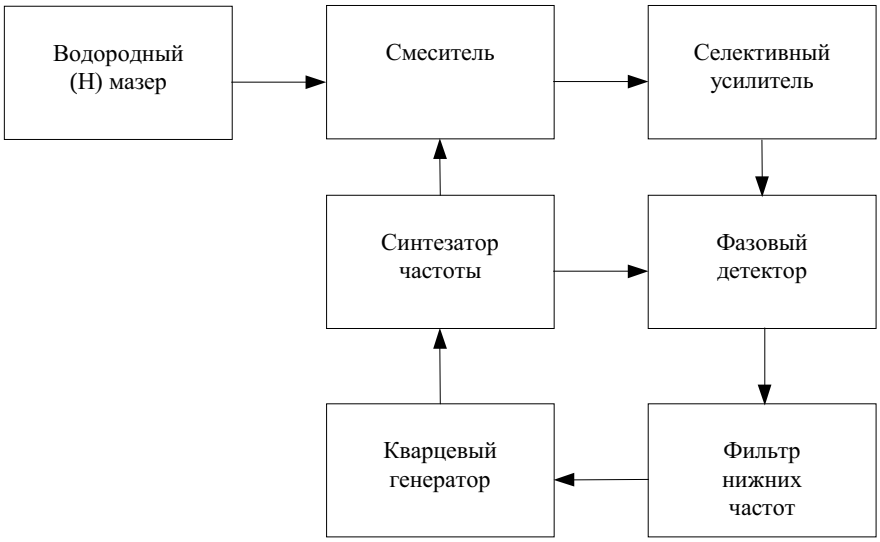


РИСУНОК 1.3

Блок схема регулировки фазы кварцевого генератора H-мазером

В обоих случаях, пассивном и активном, выходные сигналы атомных стандартов частоты образуются кварцевым генератором.

1.3 Основные метрологические концепции

1.3.1 Стабильность частоты

В этом разделе кратко рассматривается физическая природа происхождения случайных флуктуаций частоты или сдвига частоты. Типичные численные значения даются в Главе 2, Часть A и Главе 5. Критерии измерения стабильности обсуждаются в Главе 4. В этом разделе для критериев измерения стабильности частоты, разработанных в Главах 3 и 4, мы выводим теоретические величины, основанные на физических процессах в генераторе.

1.3.1.1 Определение

Термин “стабильность частоты” обычно употребляется вместо термина “нестабильность частоты”. Это самопроизвольное и/или вызываемое окружающей средой изменение частоты в пределах данного интервала времени (см. Глоссарий). Обычно различают стохастические флуктуации частоты и систематические явления, такие как сдвиги частоты. Систематическая нестабильность может вызываться воздействиями окружающей среды. Стабильность частоты зависит от полосы пропускания системы измерения и/или от времени выборки, или от времени интеграции. Случайные или стохастические нестабильности характеризуются либо во временнóй области, либо в частотной, либо в обеих областях.

1.3.1.2 Кварцевые генераторы

1.3.1.2.1 Случайные флуктуации частоты

Когда частота близка к несущей частоте, т. е. при частотах Фурье меньше, чем приблизительно половина полосы пропускания резонатора, $\nu_0/2Q$, кварцевые генераторы производят мерцающий шум частоты, который создается в кварцевом резонаторе [Walls и др., 1992] и в цепи контура обратной связи. В таком случае спектральная плотность мощности фазового шума (СПМ) изменяется как f^{-3}. Этот шум определяет стабильность частоты для отрезков времени выборки между 1 и 10^3 с. В этом диапазоне, критерий стабильности частоты во временной области, $\sigma_y(\tau)$ (см. Главу 4), остается постоянным. Типичное значение для 5 МГц режима кварцевого генератора является $\sigma_y(\tau) = 8 \times 10^{-14} \rightarrow 3 \times 10^{-13}$.

На частотах Фурье, превышающих $\nu_0/2Q$, генератор возбуждается мерцающим фазовым шумом, пока он не станет меньше, чем белый фазовый шум. Мерцающий фазовый шум (СПМ изменяется как f^{-1}) является результатом обработки мерцающего шума частоты в контуре обратной связи генератора [Leeson, 1966; Sauvage, 1977].

На частотах Фурье, превышающих приблизительно 10^2 Гц, для кварцевых генераторов на 5 МГц фазовый шум является белым шумом. Он является результатом добавки шума в выходной цепи усилителя. СПМ фазового шума в интервале полосы пропускания выходного каскада задается формулой:

$$S_\phi(f) \approx \frac{FkT}{P}, \tag{1.3}$$

где k — постоянная Больцмана , T — термодинамическая температура , P — мощность, создаваемая в колебательном контуре и F — коэффициент шума выходного усилителя.

1.3.1.2.2 Систематические воздействия

Для отрезков времени выборки, превышающих $\approx 10^3$ с в случае кварцевого генератора на 5 МГц, стабильность частоты ухудшается из-за эффектов старения [Walls и Gagnepain, 1992; Filler и Vig, 1993]. Они создают медленное изменение частоты порядка 10^{-11} в день. Эти эффекты старения вызваны изменением свойств электронных компонентов, ослаблением напряжений и диффузией примесей в кристалле кварца и т. д. Более того, частота кварцевого генератора подвергается воздействию изменений внешних условий, таких как напряжение питания, температура, влажность, давление и вибрации (см. Главу 5).

1.3.1.3 Атомные стандарты частоты

Мы будем также различать кратковременную и средневременную стабильность частоты, которые определяются случайными процессами, и долговременную стабильность, которая зависит от систематических воздействий.

1.3.1.3.1 Кратковременная стабильность частоты

В обеих категориях атомных стандартов частоты, активной и пассивной, кратковременная стабильность — это стабильность кварцевого генератора. Она важна при значениях времени выборки τ, меньших, чем постоянная времени замкнутой системы автоматического управления, которая обычно составляет ≈ 1 с.

1.3.1.3.2 Средневременная стабильность частоты

Для значений τ, превышающих постоянную времени замкнутой системы автоматического управления (≈ 1 с), вплоть до предельного значения, которое зависит от рассматриваемого атомного стандарта частоты (≈ 1 день для цезия, $\approx 10^4$ с для водорода, $\approx 10^3$ с для рубидия), стабильность частоты определяется добротностью атомного резонанса и наблюдаемым соотношением сигнал/шум.

1.3.1.3.2.1 Средневременная стабильность частоты в пассивных стандартах частоты

Стабильность частоты непосредственно связана с точностью измерения экстремумов кривой атомного резонанса. Можно показать, что критерий $\sigma_y(\tau)$ стабильности частоты во временной области задается выражением [Vanier и Audoin, 1989]:

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{Q\dfrac{S}{N(\tau)}}, \tag{1.4}$$

где $S/N(\tau)$ — отношение амплитуды сигнала к шуму для времени выборки τ и добротности Q линии атома.

В стандартах частоты на рубидиевом элементе и на атомном пучке цезия, шум — это дробный шум потока обнаруженных частиц, атомов или фотонов, соответственно. Мы имеем :

$$\frac{S}{N(\tau)} \approx \frac{I_s}{I_t^{1/2}} \tau^{1/2}, \tag{1.5}$$

где I_s — поток частиц, определяющий амплитуду линии, и I_t — общий поток детектируемых частиц. Тогда мы получим :

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{I_t^{1/2}}{QI_s} \tau^{-1/2}. \tag{1.6}$$

Стабильность частоты изменяется как $\tau^{-1/2}$; это связано с фактом, что шум возбуждающей частоты является белым шумом (случайным и некоррелированным).

В стандарте частоты на рубидиевом элементе, мы обычно имеем $I_s << I_t$. В стандарте частоты на атомном пучке цезия, I_s всегда равно I_t и уравнение (1.6) дает:

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{QI_s^{1/2}} \tau^{-1/2}. \tag{1.7}$$

В пассивном водородном мазере мы имеем :

$$\frac{S}{N(\tau)} \approx K\left(\frac{P}{kT}\right)^{1/2} \tau^{1/2}, \tag{1.8}$$

где kT — тепловая энергия шума в моде резонатора и P — мощность, подводимая атомами в резонатор. K — постоянная, превышающая единицу, которая зависит от рабочих параметров. В этом случае мы имеем:

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{K}{Q}\left(\frac{kT}{P}\right)^{1/2} \tau^{-1/2}. \tag{1.9}$$

1.3.1.3.2.2 Средневременная стабильность частоты в активных стандартах частоты

Во всех типах генераторов схематически различают шум частоты, генерируемый в цепи, поддерживающей колебания, и шум частоты, добавляемый к колебанию в последующих усилительных цепях.

Шум, создаваемый в петле обратной связи генератора, является белым частотным шумом (в кварцевом генераторе такой белый шум частоты обычно маскируется мерцающим шумом). Соответствующий критерий стабильности частоты во временной области определяется как [Cutler и Searle, 1966; Vanier и Audoin, 1989]:

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{Q}\left(\frac{kT}{2P}\right)^{1/2} \tau^{-1/2}. \tag{1.10}$$

В активных водородных мазерах этот белый частотный шум преобладает в случае измерения стабильности частоты при τ, находящемся в диапазоне от ≈20 до 10^4 с.

Шум, добавляемый в выходных цепях усиления, является белым фазовым шумом, как показано в уравнении (1.3). Мы имеем:

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{1}{\nu_0}\left(\frac{3FkTf_h}{2\pi\ P}\right)^{1/2} \tau^{-1}, \tag{1.11}$$

где f_h — шумовая полоса пропускания оборудования, используемого для измерения стабильности частоты. В настоящее время этот белый фазовый шум является преобладающим для τ, лежащем в диапазоне от ≈1 до 10 с.

1.3.1.3.2.3 Долговременная стабильность частоты

Для τ больше, чем $\approx$1 день для цезия, $\approx 10^4$ с для водорода и $\approx 10^3$ с для рубидия, критерий стабильности частоты $\sigma_y(\tau)$ прекращает падение, когда τ увеличивается. Он даже становится увеличивающейся функцией от времени выборки τ.

Не существует теории, которая бы устанавливала связь между долговременными изменениями частоты и фундаментальными физическими эффектами, такими как дробный шум или тепловой шум. Напротив, они являются результатом медленного изменения ряда смещений частоты, описанных в Главе 2, Часть А, которые воздействуют на идеализированную резонансную частоту, определяемую из уравнения (1.1). Большинство из этих смещений частоты зависят от того, каким образом происходит наблюдение за энергетическим переходом атома, и, таким образом, от конструкции и типа стандарта частоты. Их изменение определяется эффектами старения и колебаниями условий окружающей среды [De Marchi, 1987; Audoin и др., 1992; Mattison, 1992; Riley, 1992]. Скорость старения и чувствительность к внешним воздействиям прямо зависят от сделанного конструктивного выбора. В Главе 5 эти явления рассмотрены более детально.

1.3.2 Точность

1.3.2.1 Остаточные смещения частоты

Хотя атомные стандарты частоты проектируются таким образом, чтобы как можно лучше соответствовать требованиям по идеальным условиям для изолированных атомов и всему остальному, в настоящее время практически нельзя избежать небольших смещений частоты. Неопределенность нашего знания о величине этих частотных смещений является фактором, обусловливающим точность атомных стандартов частоты. Физическая природа некоторых из этих смещений частоты является общей для всех видов стандартов частоты, например, это эффект Допплера второго порядка, благодаря тепловому движению атомов. Другие характерны для данного вида, например, буферное газовое смещение частоты и световое смещение в рубидиевом элементе, которые рассматриваются в соответствующем разделе Главы 2, часть А.

1.3.2.2 Определение

В общем, точность — это степень соответствия измеряемой или рассчитываемой величины ее истинному значению (см. Глоссарий). Она выражается, как совокупная нормализованная неопределенность величины, понимаемая относительно того, что дается в определении. Обычно эта неопределенность имеет две различные составляющие. В случае атомных стандартов частоты, одна относится к случайным возмущениям, которые воздействуют на измерение остаточных смещений частоты (например, благодаря измерению приложенного магнитного поля). Другая является систематической составляющей, которая связана с отсутствием знаний о некоторых эксплуатационных параметрах (например, неоднородность магнитного поля). Эти две составляющие должны объединяться с осторожностью [BIPM, 1992].

1.3.2.3 Первичные и вторичные стандарты частоты

Лабораторные стандарты частоты на атомном пучке цезия созданы с целью реализации с наибольшей точностью определения секунды. Фактически они являются первичными стандартами частоты. Их точность является нормализованной неопределенностью измеряемой или оцениваемой разности частот между реализуемым значением частоты перехода на сверхтонкий уровень и частотой невозмущенного перехода, которая дана в таблице 1. Наилучшая достигнутая точность к 1994 году — около 1×10^{-14}. В случае стандарта частоты, подобного водородному мазеру, где значение частоты невозмущенного перехода на сверхтонкий уровень ν_H известно с очень малой нормализованной неопределенностью, порядка 2×10^{12}, можно рассмотреть концепцию точности, так же как и в случае со стандартом частоты на атомном пучке цезия. Точность водородного мазера характеризует степень, с которой выходная частота может быть соотнесена со значением частоты невозмущенного перехода атома водорода на сверхтонкий уровень. Это означает, что нормализованная неопределенность частоты, генерируемой водородным мазером, является комбинацией его точности и неопределенности со значением частоты невозмущенного перехода атома водорода на сверхтонкий уровень.

Точность стандартов частоты на рубидиевом элементе очень низка из-за различных эффектов, описываемых ниже. Выходная частота должна калиброваться по более точному атомному стандарту частоты. Таким образом, рубидиевый стандарт частоты используется в качестве вторичного стандарта частоты.

Точность кварцевых генераторов составляет примерно 10^{-6} без калибровки. Из-за этого кварцевые генераторы почти всегда калибруются по стандартной частоте и используются в качестве вторичных стандартов частоты.

1.3.3 Воспроизводимость, способность к восстановлению показаний

Концепция воспроизводимости имеет два аспекта (см. Глоссарий):

a) в отношении группы независимых устройств одной и той же конструкции — способность этих устройств производить одну и ту же величину.

b) в отношении отдельного устройства, неоднократно включаемого в работу без подстройки — способность производить одну и ту же величину.

Способность к восстановлению показаний (см. Глоссарий) — это способность устройства производить одну и ту же величину, когда заданные параметры подстраиваются независимо при заявленных условиях использования.

Стоит упомянуть, что значение точности данного атомного стандарта частоты (например, 3×10^{-12}) является верхней границей его воспроизводимости и способности к восстановлению показаний (например, 5×10^{-13}), а также его долговременной стабильности частоты (например, 2×10^{-12} в течение срока жизни прибора).

Литература

AUDOIN C. [1992] Caesium Beam Frequency Standards: Classical and Optically Pumped. *Metrologia,* Vol. 29, 113-134.

AUDOIN C., DIMARCQ N., GIORDANO V. and VIENNET J. [1992] Physical Origin of the Frequency Shifts in Cæsium Beam Frequency Standards: Related Environmental Sensitivity. *IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,* Vol. 39, 412-421.

BAUCH A., DE BOER, H., FISCHER B., HEINDORFF T. and SCHRÖDER R. [1988] Long term Performance of the PTB's Primary Clock CS2. Proc. 2nd European Frequency and Time Forum, Neuchâtel, 425-435.

BESSON R.J. [1977] A New Electrodeless Resonator Design. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, N.J., USA, 147-152.

BIPM [1991] "Le Système International d'Unités", Sèvres, France.

BIPM [June 1992] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Sèvres, France. ISO Document ISO/TAG 4/ WG3.

BUSCA G., THOMANN P., BERNIER L.G., WILLEMIN P. and SCHWEDA H. [1990] The Classical Microwave Frequency Standards. Proc. 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI). Applications and Planning Meeting, Vienna, VA, USA, 9-17.

CLAIRON A., LAURENT P., SANTARELLI G., GHEZALI S., LEA S.N. and BAHOURA M. [1995] A Cesium Fountain Frequency Standard: Preliminary Results. *IEEE Trans. Instr. and Meas.,* Vol. 44, 128-132

CUTLER L.S. [1990] The Status of Cæsium Beam Frequency Standards. Proc. 22nd Annual Precise Time and Time Interval, (PTTI), Applications and Planning Meeting, Vienna, VA, USA, 19-27.

CUTLER L.S. and SEARLE C.L. [1966] Some Aspects of the Theory and the Measurement of Frequency Fluctuations in Frequency Standards. *Proc. IEEE,* Vol. 54, 136-154.

DE MARCHI A. [1987] New Insights into Causes and Cures of Frequency Instabilities (Drift and Long Term Noise) in Cæsium Beam Frequency Standards. Proc. 41st Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, USA, 53-58.

DORENWENDT K., FISCHER B. and HEINDORFF T. [1990] The PTB's Primary Time and Frequency Standards. Performance and Uncertainty. *Physica Scripta,* Vol. 41, 712-716.

ESSEN L. and PARRY J.V.L. [1957] The Caesium Resonator as a Standard of Frequency and Time. *Philosophical Transactions of the Royal Society,* Vol. 250, 45-69.

FILLER R.L. and VIG J.R. [1957] Long-Term Aging of Oscillators. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,* Vol. 42, 387-393.

GERBER E.A. and BALLATO A. (Editors). [1985] Precision Frequency Control, 2 volumes, Academic Press, Orlando, Florida, USA.

GERLACH W. and STERN O. [1924] Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Annalen der Physik,* Vol. 74, 673-699.

GERLACH W. [1925] Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld II. Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten normaler Atome unter magnetischer Kraftwirkung. *Annalen der Physik,* Vol. 76, 163-197.

GIBBLE K. and CHU S. [1993] Laser-Cooled Cs Frequency Standard and a Measurement of the Frequency Shift due to Ultracold Collisions. *Phys. Rev. Lett.,* Vol. 70, 1771-1774.

HELLWIG H. [1985] Microwave Frequency and Time Standards Precision Frequency Control, Volume 2, Gerber E.A. and Ballato A. (Editors). Academic Press, Orlando, Florida, USA.

KASTLER A. [1950] Quelques suggestions concernant la production optique et la déetection optique d'une inégalité de population des niveaux de quantification spatiale des atomes. Applications à 1"expérience de Stern et Gerlach et à la résonance magnétique. *Journal de Physique et le Radium,* Vol. 11, 255-265.

LEE W.D., SHIRLEY J.H., LOWE J.P. and DRULLINGER R.E. [1995] The accuracy evaluation of NIST-7. *IEEE Trans. on Instr. and Meas.,* Vol. 44, 120-124.

LEESON D.B. [1966] A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. *Proc. IEEE,* Vol. 54, 329-330.

LEWIS L.L. [1991] An Introduction to Frequency Standards. *Proc. IEEE,* Vol. 79, 927-935.

MATTISON E.M. [1992] Physics of Systematic Frequency Variations in Hydrogen Masers. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,* Vol. 39, 250-255.

PRESTAGE J.D., TJOELKER R.L., DICK G.J. and MALEKI L. [1994] Progress report on the linear ion trap extended (LITE), CPEM Conference Digest, 27 June - 1 July 1994.

RILEY W.J. [1992] The Physics of Environmental Sensitivity of Rubidium Gas Cell Atomic Frequency Standards. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,* Vol. 39, 232-240.

SAUVAGE G. [1992] Phase Noise in Oscillators: A Mathematical Analysis of Leeson's Model. *IEEE Trans. on Instr. and Meas.,* Vol. 26, 408-410.

VANIER J. and AUDOIN C. [1989] The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards, 2 volumes, Institute of Physics Publishing, Bristol.

VESSOT R.F.C. [1990] State of the Art and Future Direction for the Atomic Hydrogen Maser. Proc. 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Vienna, VA, USA, 29-51.

VESSOT R.F.C., MATTISON E.M., WALSWORTH R.L. and SILVERA I.F. [1990] Future Prospects for the Cold Hydrogen Maser. Proc. 4th European Forum on Time and Frequency, Neuchâtel, Switzerland, 277-281.

VIG J.R. [1991] Quartz Crystal Resonators and Oscillators for Frequency Control and Timing Applications. A Tutorial. Available from US Army Electronics Technology and Devices Laboratory. Fort Monmouth, N.J. USA.

WALLS F.L. and GAGNEPAIN J.J. [1992] Environmental Sensitivities of Quartz Crystal Oscillators. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,* Vol. 39, 241-249.

WALLS F.L., HANDEL P.H., BESSON R. and GAGNEPAIN J.J. [1992] A New Model of 1/f Noise in BAW Quartz Resonators. Proc. IEEE Frequency Control Symposium, Hershey, Pennsylvania, USA, 327-333.

WINELAND D.J., ITANO W.M., BERGQUIST J.C., BOLLINGER J.J., HEINZEN D.J., MANNEY C.H., MOORE F.L., RAIZEN M.G. and WEIMER C.S., [1990] Trapped-Ion Frequency Standards. Proc. 22nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Vienna, VA, USA, 53-60.

Глава 2
Доступные источники времени и частоты

Содержание

Обзор Главы 2 23

Часть А
Местные источники частоты и времени

2.1 Введение 24

2.2 Кварцевые стандарты частоты 24

2.2.1 Резонатор 24

2.2.2 Генератор 25

2.3 Стандарт частоты на базе рубидиевой газовой ячейки 25

2.4 Водородный мазер 27

2.5 Стандарт частоты на базе цезиевого пучка 29

Часть В
Управляющие эталоны

2.6 Введение 33

2.7 Факторы, которые необходимо учитывать при выборе и использовании альтернативных служб и методов распространения сигналов времени и частоты 33

2.8 Сравнение альтернативных источников и методов распространения для эталонов точного времени и частоты 34

2.9 Дополнительная информация, касающаяся использования различных альтернативных служб, систем и методов. 34

Литература 46

Библиография 47

Обзор Главы 2

Если Глава 1 излагает физические основы и принципы работы прецизионных стандартов частоты, то Глава 2 касается источников сигналов времени и частоты. В этой главе пользователь познакомится с различными способами получения источников сигналов времени и частоты с учетом условий окружающей среды и местных ограничений и возможностей. Глава разделена на две части. Часть А касается независимых источников сигналов времени и частоты, т. е. здесь более подробно будут описаны имеющиеся стандарты частоты. Часть В касается сигналов времени и частоты, которые могут быть получены от источников излучения как наземных, так и спутниковых. Сюда, разумеется, входит и ознакомление с соответствующими методами передачи сигналов времени и частоты.

В общем случае источники, описываемые в Части А, являются источниками частоты. Ни один из них не способен, по своей сути, передавать во внешнюю среду UTC при использовании в качестве портативных часов, что более не является наилучшим способом получения UTC. Часть В приводит источники сигналов времени (включая UTC). Они, в общем случае, не являются такими же хорошими источниками частоты, как источники, приведенные в Части А. В связи с этим полезно иметь в виду то, что источники из Части А связаны с фундаментальной физикой, из которой мы определяем частоту (секунду СИ). В противоположность этому, время, которое является интегралом от частоты, имеет в качестве постоянной интеграции искусственное число, введенное по согласованию с международными стандартами или определенное пользователем. Отсюда мы получаем UTC, UTC(k) и некоторые другие самосогласованные шкалы времени.

При системном подходе, соединяя лучшее из Частей А и В, можно получить пользу из обеих, т. е. источники частоты, обладающие полной точностью секунды СИ и оптимальной оценкой UTC. Эта концепция будет затронута в Части В.

Может создаться впечатление, что Часть А частично повторяет материал Главы 1, но здесь ставится цель помочь пользователю в решении, какой из предложенных источников может полнее удовлетворить его требования и запросы.

Часть А
Местные источники частоты и времени

2.1 Введение

Стандарты точного времени и частоты, основанные на механических резонансах кварца и явлениях атомного резонанса, широко используются в научных и технических применениях, включая сети данных, системы электросвязи, навигацию, метрологию, системы всемирного времени, научные исследования, такие как астрономия и спектроскопия. В Главе 1 уже объяснялись основные принципы этих устройств и дана терминология для описания их характеристик. Здесь же каждое устройство описывается в отдельном разделе более подробно (для полного описания см. также [Vanier и Audoin, 1989]). Понимание физики процессов поможет пользователю лучше понять, как тот или иной стандарт может работать в данной окружающей среде. Приведены таблицы, в которых содержатся соответствующие технические данные. Указаны наиболее жесткие ограничения характеристик, связанные с влиянием окружающей среды, которые обсуждаются отдельно в Главе 5.

2.2 Кварцевые стандарты частоты

2.2.1 Резонатор

Резонатор сделан из пластины кварца. Различного вида механические деформации (сжатие, растяжение, сдвиг) могут распространяться в объеме вещества и создавать резонанс, когда акустические волны данного вида удовлетворяют граничным условиям.

Механические свойства пластины могут использоваться в электрической схеме благодаря пьезоэлектрическому эффекту, который связывает электрические поля и механические смещения в нецентросимметричных кристаллах, таких как кварц. Этот материал очень удобный. Его можно выращивать в больших количествах, при низкой стоимости, со значительной химической чистотой и высоким совершенством кристаллической решетки. Он обладает также и низкими электрическими потерями.

На рис. 2.1а показана электрическая схема пьезоэлектрического резонатора. В применениях для метрологии сигналов времени и частоты резонансная частота ν_0 обычно составляет от 5 до 10 МГц. В других применениях она может достигать 1 ГГц. Добротность Q меняется обратно пропорционально резонансной частоте. Обычно $Q = \frac{K}{\nu_0}$, где $K \approx 10^{13}$ Гц.

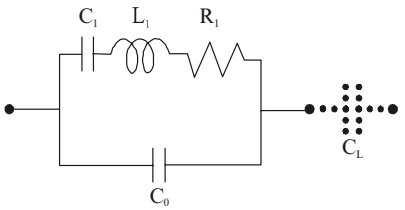


РИСУНОК 2.1а
Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического резонатора

В целом конструкция резонатора на кварцевом кристалле имеет целью свести к минимуму возмущающее воздействие на активную часть кристалла за счет факторов окружающей среды. Например, ориентация пластины по отношению к кристаллографическим осям, т. е. срез кристалла, выбирается так, чтобы как можно больше снизить влияние температуры и давления на частоту колебаний. В усовершенствованных конструкциях резонатора (конструкция BVA, [Besson, 1977]) электроды не накладываются на грани колеблющейся пластины, как это чаще всего делалось ранее. Теперь электроды размещаются на дополнительных пластинах, на расстоянии несколько микронов от активной. Этим устраняется инерционная нагрузка на основную пластину со стороны электродов, а также

исключается какое-либо высвобождение напряжений и смещение вещества на границе раздела между кварцем и металлом.

2.2.2 Генератор

Резонатор включается в контур обратной связи, как это схематически показано на рис. 2.1b. В установившемся состоянии сдвиг фазы замкнутого контура равен 0 или π и амплитуда колебаний постоянна. Для данного фазового возмущения соответствующее дробное изменение частоты пропорционально $1/Q_L$, где Q_L добротность нагруженного резонатора в схеме. Обычно Q_L составляет примерно 10^6 на частоте 5 МГц. Дополнительный конденсатор C_L дает возможность регулировать частоту генератора. Обычно этот конденсатор состоит из 2-х конденсаторов, включенных параллельно: постоянного и переменного (варактора). Последний, вместе с внешним источником постоянного напряжения, используется для плавной настройки. Во всех высококачественных кварцевых стандартах частоты резонатор и другие элементы, чувствительные к температуре, размещаются в контролируемом термостате, температура которого поддерживается как можно ближе к точке, в которой частота резонатора не зависит от температуры.

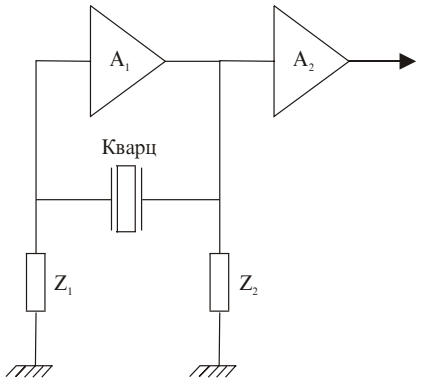


РИСУНОК 2.1b

Схематичное изображение кварцевого генератора

2.3 Стандарт частоты на базе рубидиевой газовой ячейки

В стандарте частоты на базе рубидиевой газовой ячейки (сокращенно: Rb-стандарт) для выбора состояния и определения временного перехода используется метод оптической накачки. Свет от лампы (наполненной изотопом ^{87}Rb) проходит через фильтрующую ячейку (называемую фильтром сверхтонкой структуры), которая содержит пары изотопа ^{85}Rb, перед тем, как он возбуждает атомы ^{87}Rb в ячейке, заполненной буферным газом внутри сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора, как показано на рис. 2.2. Буферный газ, представляющий собой смесь инертных газов, характеризующихся упругими столкновениями с атомами Rb, увеличивает время взаимодействия, T, атомов с СВЧ полем, заключенным в резонаторе, за счет снижения количества неупругих столкновений атомов со стенами камеры.

Воздействие ячейки изотопного фильтра изменяет спектр света, разрешая оптическую накачку только атомам ^{87}Rb, находящимся на низком уровне сверхтонкой структуры (E_1 на рис. 1.1 и рис. 2.2). При этом уровень E_1 очищается и ячейка становится прозрачной. Если к атомам применить микроволновое излучение с ν_o = 6,834 ГГц, то низкий уровень сверхтонкой структуры E_1 опять заселяется и снова начинается оптическое поглощение. При резонансе $\nu_p = \nu_o$ сигнал на фотодетекторе показывает минимум, как это видно из рис. 2.2. Ширина спектра при резонансе обычно составляет 500 Гц благодаря пределам по T, обусловленным как буферным газом, так и остаточными столкновениями со стенками. Сигнал при ν_p синтезируется кварцевым генератором, управляемым напряжением (КГУН) и модулируется. При помощи синхронного детектирования получается напряжение управляющего сигнала, U_R,

которое используется для управления КГУН. Центральная частота линии резонанса значительно отклоняется от значения ν_o невозбужденных атомов ^{87}Rb. Сдвиги частоты обусловлены присутствием магнитных полей, столкновениями с буферным газом и одновременным взаимодействием атомов с оптическим и микроволновым излучением. Общий сдвиг может достигать около 10^{-9} в относительных единицах, при этом состав газа и интенсивность света в самом начале устанавливают так, чтобы получить оптимальные рабочие характеристики с минимальной чувствительностью к окружающей среде. Последние два эффекта, однако, сами по себе не стабильны во времени, так как лампа стареет (меняется спектр и интенсивность) и несколько меняется со временем состав смеси газа в фильтровой ячейке и в самой резонансной ячейке благодаря диффузии и уходу газа. Если во внешней среде присутствует гелий, то он может диффундировать в камеру фильтра, значительно изменяя характеристики устройства. Оба эти эффекта также зависят от температуры окружающей среды, а также от температурных градиентов.

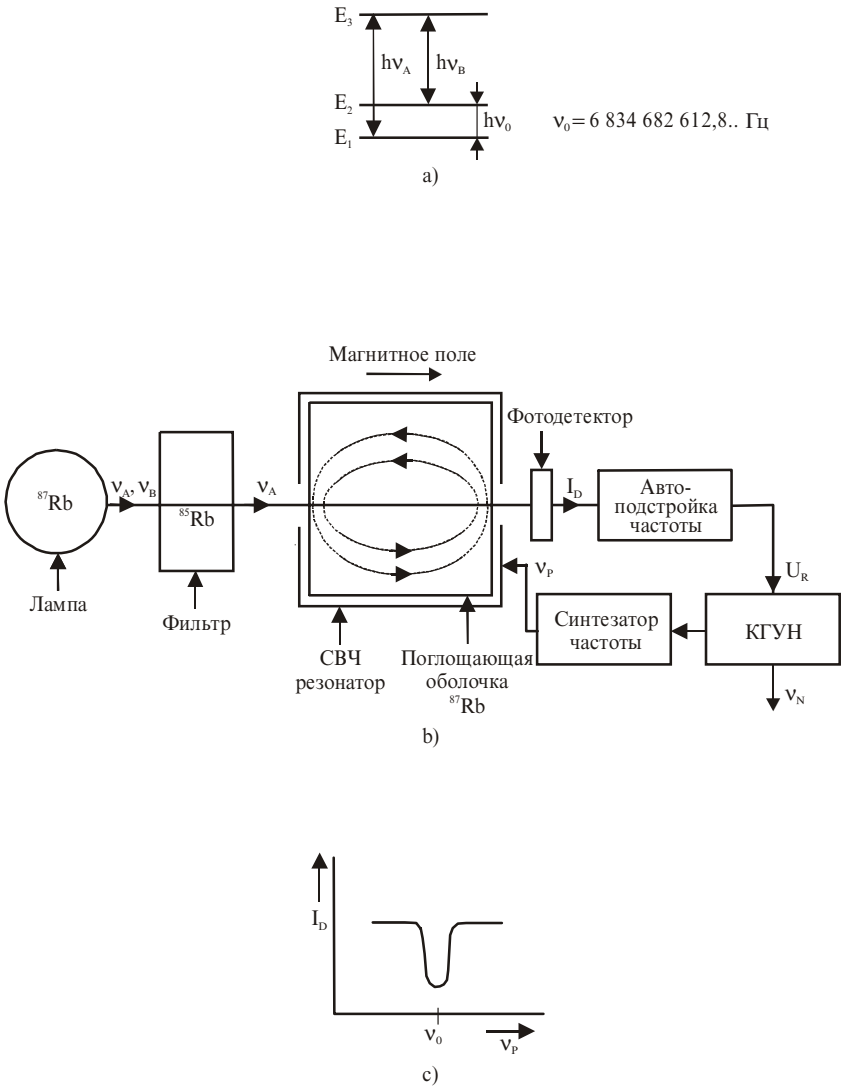


РИСУНОК 2.2

a) Энергетические уровни ^{87}Rb;
b) Рубидиевый стандарт, схематическое представление;
c) Зависимость сигнала детектора Id от частоты ν_p СВЧ излучения

Так как основная физическая точность рубидиевого стандарта составляет лишь около 10^{-9}, то эти стандарты имеют тенденцию к большей чувствительности к окружающей среде, чем стандарты на базе цезия и водорода. Rb-стандарт не может оцениваться в качестве первичного стандарта частоты (автокалибровка), а наоборот, сам должен быть

откалиброван по известному эталону частоты. При калибровке на заводе или в метрологической лаборатории Rb-стандарты могут иметь уровень точности $1 \cdot 10^{-11}$. Тем не менее, присущая им кратковременная стабильность часто может быть лучше, чем у цезиевых стандартов из-за отношения сигнал/шум. При отсутствии вибрации и переменных магнитных полей эта хорошая кратковременная стабильность обычно не ухудшается при неблагоприятных условиях окружающей среды.

Имеются Rb-стандарты с различными уровнями качества, которые, в основном, зависят от размера устройств и сложности контроля рабочих параметров. В таблице 2.1 сравниваются приборы малого модульного размера (объем менее 10^{-3} м^3), в данном случае — фильтр сверхтонкой структуры, который часто интегрируется в резонансную ячейку, содержащую натуральный рубидий — и приборы инструментального размера (типичный объем 10^{-2} м^3), а также приведены возможности рубидиевых стандартов, используемых в спутниках систем GPS (Глобальной Системы определения местоположения), которые оборудованы специальным контролем температуры. Они, тем не менее, не доступны для широкого применения.

ТАБЛИЦА 2.1

Рабочие параметры стандартов частоты на рубидиевых газовых ячейках

	Модульный (небольшой размер)	Инструментальный размер	Глобальная Система определения
Точность	1×10^{-9}	1×10^{-10}	1×10^{-9}
Нестабильность частоты, ($\sigma_y(\tau=1$ с))	$(2–5) \times 10^{-11}$	$(3–7) \times 10^{-12}$	3×10^{-12}
Мин. уровень мерцания ($\sigma_{y,\,min}$)	5×10^{-13}	2×10^{-13}	3×10^{-14}
Флуктуации частоты (в основном из-за старения, в месяц)	4×10^{-11}	1×10^{-11}	2×10^{-12}
Температура (на К)	3×10^{-12}	1×10^{-12}	1×10^{-13}
Магнитное поле (на 10^{-4} Т)	2×10^{-11}	5×10^{-12}	2×10^{-12} (10^{-4} Т=1 Гаусс)

2.4 Водородный мазер

Схема водородного мазера приведена на рис. 2.3. Атомарный водород образуется при радиочастотном разряде из молекулярного водорода. Пучок атомарного водорода выходит из отверстия и проходит стадию разделения в магнитном поле гексапольного или квадрупольного магнита. Атомы водорода в верхнем энергетическом состоянии E_2 направляются в накопительную колбу, внутренняя поверхность которой покрыта тефлоном (товарное название фирмы Дюпон). Колба находится в высокодобротном микроволновом резонаторе, настроенном на частоту атомного резонанса 1420 МГц (см. таблицу 1.1). Когда атомы упруго сталкиваются друг с другом внутри колбы, они переходят с уровня E_2 на E_1. При этом они выделяют энергию посредством индуцированного излучения, вызванного СВЧ полем, которое создают сами же атомы. Тефлоновое покрытие обеспечивает почти упругие столкновения со стенкой и, таким образом, среднее время взаимодействия атомов с СВЧ полем составляет примерно одну секунду несмотря на то, что при этом происходит почти 10^5 столкновений со стенкой колбы [Kleppner и др. 1962; Kleppner и др. 1965]. Магнитный экран защищает область взаимодействия от влияния внешних магнитных полей и в этой области создается однородное поле от 0,1 до 1 мкТ. Насосы используются для откачки устройства и поддержания давления на уровне менее 10^{-5} Па, несмотря на постоянный поток водорода.

В ***активном*** водородном мазере излучение, испускаемое самими атомами, используется для управления кварцевой частотой, но при этом количество энергии, создаваемое атомами, чрезвычайно мало. Поэтому разрабатывается специальная электроника для улавливания этого сигнала этого квантового перехода в диапазоне L. Часть этого излучения, порядка 10^{-13}—10^{-14} Вт, улавливается полостью резонатора и направляется в малошумящий СВЧ приемник. Здесь сигнал смешивается с сигналом на кратной частоте КГУН (например, 1400 МГц) и КГУН синхронизируется по фазе с излучением атомов.

Причиной нестабильности частоты мазера за короткие периоды усреднения является нестабильность несинхронизируемого КГУН, тепловой шум резонатора, аддитивный внешний шум. Несмотря на сложность, при наличии необходимой электроники полученное отличное отношение сигнал/шум обеспечивает наилучшую кратковременную стабильность любого доступного коммерческого стандарта частоты (см. таблицу 2.2).

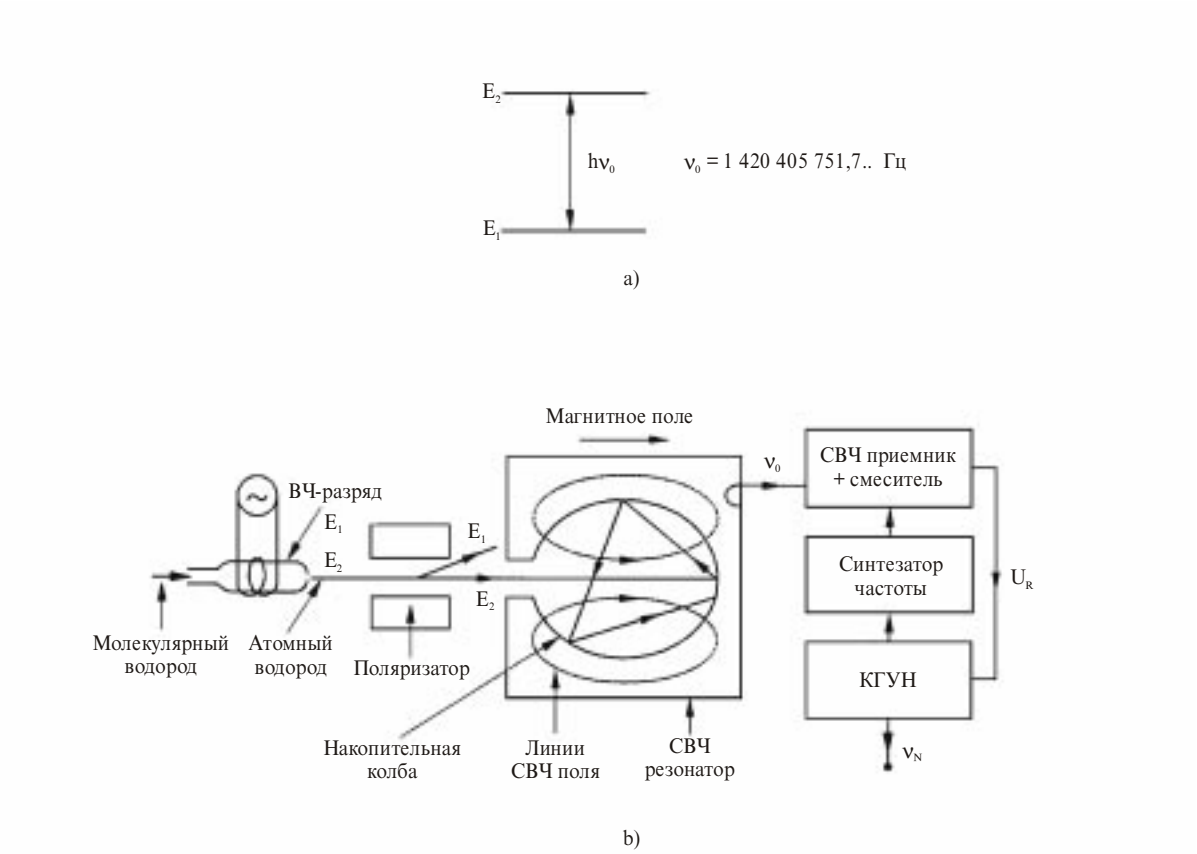


РИСУНОК 2.3

Водородный мазер

a) энергетические уровни атома водорода
b) схематическое представление

ТАБЛИЦА 2.2

Характеристики активного и пассивного водородного мазера

	Активный	Пассивный
Точность	10^{-12}	10^{-12}
($\sigma_y(\tau$=1 сек))	2×10^{-13}	2×10^{-13}
Мин. уровень мерцания	$1\times10^{-14} \rightarrow 5\times10^{-16}$	1×10^{-14}
$\sigma_y(\tau$=1 месяц) с автоподстройкой без автоподстройки	 3×10^{-15} 3×10^{-13}	 1×10^{-14} не используется
Температура (на К)	1×10^{-14}	1×10^{-14}
Магнитное поле (на 10^{-4} Т) (10^{-4} Т = 1 Гаусс)	3×10^{-14}	1×10^{-14}

Долговременная стабильность частоты в большой степени определяется стабильностью резонатора: “затягивание” частоты резонатора оказывает довольно сильное влияние в активных устройствах, в частности, из-за высокой ве-

личины добротности Q резонатора. Активный мазер поэтому традиционно рассматривался как прибор, полезный, в основном, для тех применений, где необходимы его сверхвысокие кратко- и средневременные эксплуатационные характеристики, например, для земных станций, оснащенных интерферометром со сверхдлинной базой (VLBT). На протяжении ряда лет, однако, было исследовано несколько методов "автоподстройки" резонатора в мазере и они сейчас внедрены в некоторые коммерческие устройства. Некоторые из мазеров показали частоту, отклоняющуюся всего на 10^{-16} в день из-за старения, по сравнению с первичными цезиевыми часами [Demidov и др, 1992; Owings и др., 1992]. Остаточный сдвиг, возможно, обусловлен старением тефлонового покрытия колбы, чем вызывается изменение частоты на несколько единиц $\times 10^{-12}$ из-за "смещения стенки" (обусловленного столкновениями атомов с резонатором). Из-за эффектов "затягивания частоты" в резонаторе и "смещения стенки" наилучшая точность определения частоты невозмущенного перехода атомов водорода составляет около 2×10^{-12}. Несмотря на очень малую величину, сдвиг частоты за длительные периоды времени все еще является проблемой для большинства мазеров.

Из-за сильного влияния резонансной частоты полости резонатора, определяемой механически, на выходную частоту мазера, эти приборы обычно чувствительны к механическим ударам и изменениям окружающей температуры. Единственная возможность достигнуть упомянутой выше долговременной стабильности существует только тогда, когда область взаимодействия окружена очень эффективным температурным экраном. Обычно активный мазер занимает объем 0,5 м^3, весит 80 кг и может стоить в 5—20 раз больше, чем цезиевые часы.

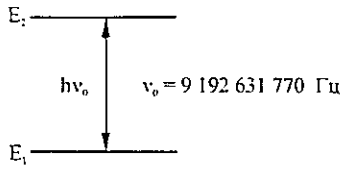
В пассивном мазере объем резонатора и, соответственно, весь образец можно сделать меньшим, чем в активном. Поскольку он работает с правильно нагруженным резонатором более низкой добротности Q, то невозможно возникновение автоколебаний. Вместо этого, к резонатору прикладывается зондирующее СВЧ поле и атомный резонанс обнаруживается с использованием СВЧ приемника. Обработка сигнала похожа на обработку в цезиевых часах. Кратковременная стабильность на порядок хуже, чем у активного мазера при $\tau = 1$ с и улучшается только при $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1/2}$. При $\tau = 1000$ с активный мазер обычно более чем в 10 раз стабильнее, чем пассивный мазер. Однако, из-за следящей системы резонатора, пассивный резонатор, в общем-то, менее чувствителен к окружающей среде.

2.5 Стандарт частоты на базе цезиевого пучка

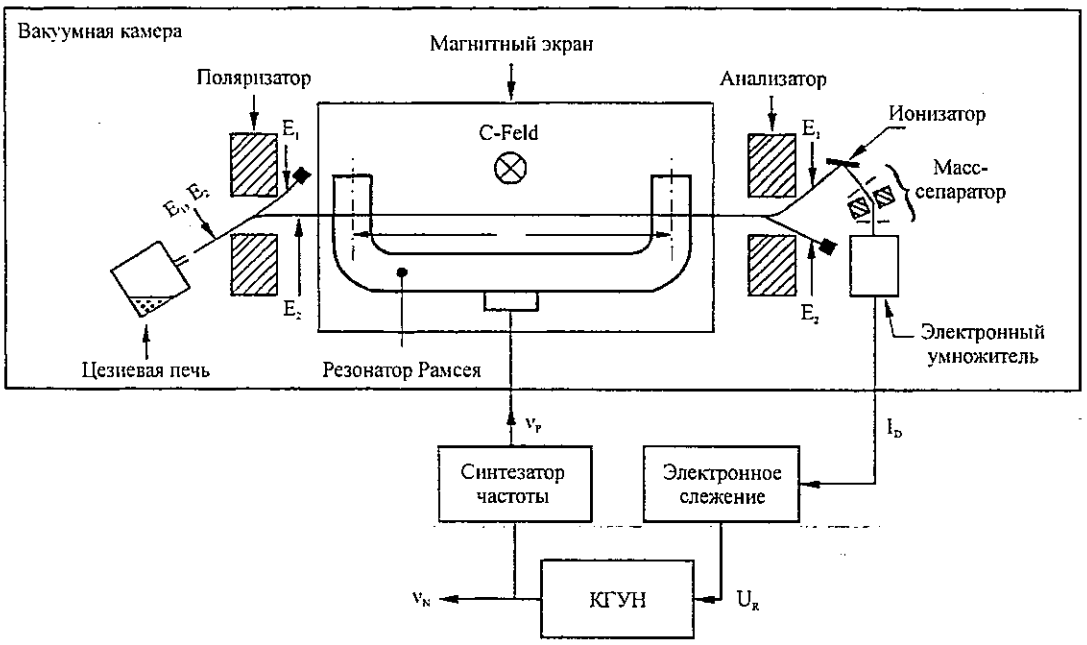
Стандарт частоты на базе цезиевого пучка (сокращенно — цезиевые часы) показан схематично на рис. 2.4. Пучок атомарного цезия испускается из печи, содержащей несколько грамм цезия ^{133}Cs. Луч проходит сквозь магнит выбора состояний, называемый поляризатором, который отклоняет в нужном направлении только атомы на энергетическом уровне E_2. В полости СВЧ-резонатора с двумя плечами атомы дважды облучаются импульсами СВЧ поля, согласно методу двух колебательных полей Рамсея, который был опубликован в 50-е годы [Ramsey, 1950; Ramsey, 1990].

Когда выполняется условие резонанса (1.1), атомы переходят в состояние с уровнем E_1. Магнит анализатора отклоняет только эти атомы к детектору с поверхностной ионизацией (за счет накаленного провода), который ионизирует атомы цезия на своей поверхности. В промышленно изготовленных цезиевых часах ионы ускоряются в масс-спектрометре и направляются на первый диод электронного умножителя. В некоторых лабораторных устройствах ток ионов в несколько пикоампер измеряется непосредственно. Выходной сигнал I_D в обоих случаях пропорционален числу ионов, отклоненных магнитом анализатора. Резонансная характеристика проявляется в выходном сигнале I_D, когда частота ν_p зондирующего поля СВЧ приближается к значению ν_o. Ширина ее линии — несколько сотен герц в промышленно изготовленных часах и менее 100 герц в лабораторных стандартах, причем ее значение определяется временем T пролета атомов через резонатор длиной L (см. рис. 2.4) согласно (1.2). КГУН управляется тем же образом, как и в Rb-стандарте. Значение ν_o невозмущенных атомов цезия зафиксировано на 9 192 631 770 Гц в определении секунды.

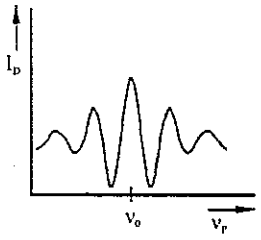
Как указывалось ранее, концепция точности стандарта частоты может применяться ко всем трем типам стандартов. Тем не менее, что касается вопроса, до какой степени СИ секунда может быть реализована цезиевыми часами, то по-видимому, целесообразно определить в этом случае различные величины смещения частоты, которые необходимо будет принимать во внимание. Они были рассмотрены подробно [De Marchi, 1987; De Marchi и др. 1987; Vanier и Audoin, 1989]. Вкратце, наиболее значительные из них относятся к:



a) Энергетические уровни ^{133}Cs (см. рис.2.2)



b) Цезиевые часы, схематичное представление



c) Зависимость сигнала детектора I_D от частоты СВЧ излучения

РИСУНОК 2.4

Цезиевые часы

i) существованию дополнительных энергетических уровней, очень близких к уровням E_1 и E_2, которые здесь рассматриваются в упрощенной модели. Водород и щелочные атомы требуют применения статического магнитного поля для отделения ряда вырожденных в иных отношениях подуровней. Это поле сдвигает резонансную частоту в квадратичной степени. Его величина — компромисс между двумя противоположными требованиями. Оно должно быть как можно меньше, чтобы ограничить чувствительность частоты перехода к его флуктуации. Но оно должно быть и достаточно большим, чтобы избежать, насколько возможно, перекрытия соседних переходов.

Напри-мер, в стандартах частоты на базе пучка цезия значение этого поля выбирается около 7 мкТ (Тесла). При этом соответствующее смещение частоты близко к 2 Гц, т. е. 2×10^{-10} от частоты перехода. Соответствующее относительное изменение величины этого поля на 5×10^{-4} ведет к относительному изменению частоты перехода 1×10^{-13}. Это приводит к необходимости использования: a) эффективных магнитных экранов для значительного ослабления окружающего магнитного поля и его флуктуаций, и b) стабильного источника тока для питания катушек, создающих магнитное поле. Такое же заключение относится и к другим атомным стандартам частоты. Величина этого статического поля может быть измерена путем зондирования более чувствительных переходов, частота которых зависит линейно от его величины.

ii) движению атомов. Оно ведет к возможному остаточному эффекту Доплера 1-го порядка и неизбежному релятивистскому эффекту Доплера 2-го порядка. При этом соответствующее смещение нормализованной частоты составляют, например, около 1×10^{-13} для стандарта частоты на пучке цезия.

iii) искажению волновой функции атома. Столкновения между щелочными и щелочно-подобными атомами, а также столкновения с буферным газом или стенками контейнера, возмущают энергетические уровни и вызывают сдвиг частоты. Аналогично, столкновения со стенками полости возмущают взаимодействие сверхтонкой структуры атомов и также дают сдвиг частоты. Эти эффекты незначительны в стандартах частоты на базе пучка цезия. Сдвиг частоты составляет: порядка 10^{-11} для водородного мазера и 10^{-9} в стандарте частоты с рубидиевой ячейкой.

iv) выбору состояния. Сдвиг частоты происходит, когда атомы подвергаются постороннему излучению. Это приводит, например, к слабому сдвигу, который характерен для стандарта частоты на рубидиевой ячейке.

v) взаимодействию с зондирующим СВЧ полем. Как результат такого взаимодействия, возникает необходимость в достаточно точной настройке СВЧ резонатора. Иначе возникает затягивание частоты резонатора. Оно обычно менее 1×10^{-13}. Правильно выбранная амплитуда СВЧ может значительно уменьшить затягивающий эффект резонатора.

vi) процессу зондирования. В цезиевых и рубидиевых стандартах частоты измеряемая резонансная частота чувствительна к качеству частотно-модулированного сигнала, который необходим для зондирования перехода. Более того, в цезиевых и рубидиевых стандартах частоты некоторые смещения частоты зависят от амплитуды СВЧ поля.

Лабораторные устройства, которые рассматриваются как первичные цезиевые часы или стандарты частоты, были разработаны в некоторых институтах и специально проектировались для облегчения определения всех систематических смещений частоты [Guinot и Azoubib, 1989]. Эти часы эксплуатируются с целью реализации секунды с наивысшей возможной точностью. Они определяют частоту Международного Атомного Времени (TAI) (см. Главу 6).

Нестабильность частоты цезиевых часов при коротких значениях времени усреднения определяется дробным шумом атомного пучка, а при длительных периодах усреднения — путем контроля рабочих параметров. По физической природе цезиевые часы менее чувствительны к окружающей среде, чем рубидиевые стандарты. Тем не менее, выход цезиевых стандартов может быть искажен неблагоприятными магнитными полями, температурой и ее градиентами. Если, например, цезиевый стандарт перевернуть вверх дном, то его частота изменится — возможно в большей мере из-за температурных градиентов, чем из-за магнитного поля Земли или сил притяжения.

За последние несколько лет появились новые взгляды на суть основных физических процессов, лежащих в основе работы цезиевых часов. [Bauch и др., 1988; De Marchi и др., 1984; Cutler и др., 1991; Bauch и Schroder, 1993]. Эти разработки возможно оказали влияние на технические характеристики новейших промышленно изготавливаемых моделей. За последние несколько лет наибольший прорыв произошел в производстве промышленного цезиевого стандарта, который гораздо менее чувствителен к изменениям окружающей среды. Это улучшение в долговременной стабильности почти на порядок произошло в результате исследования физики перехода и использования его уникальной нелинейности в сочетании с цифровыми методами электронного регулирования.

Исследования возможности отказаться от магнитов выбора состояний и возможности использования вместо них оптической накачки для выбора состояний и обнаружения атомов некоторое время продолжались [Audoin, 1992]. Осуществимость этого метода была продемонстрирована и использована для первичных часов [De Clercq и др., 1993; Drullinger и др, 1993] и в макетной версии компактных цезиевых часов [Petit и др., 1992], хотя до сих пор не создано ни одного устройства промышленного изготовления.

Изготовленные промышленностью часы весят около 25 кг и входят в стандартные 19-дюймовые стойки (существуют также и модульные версии). Они могут питаться одновременно как переменным, так и постоянным током при потребляемой мощности около 50 Вт. Первичные лабораторные часы или стандарты частоты не предназначены для перемещения и не продаются. В таблице 2.3 показаны характеристики стандартных цезиевых часов промышленного изготовления, цезиевых часов высокого качества, новых цезиевых часов с цифровым управлением, а также данные лабораторных первичных цезиевых часов, работающих в национальных лабораториях стандартов (постоянные условия окружающей среды) [Bauch и др., 1988; Drullinger и др., 1993].

ТАБЛИЦА 2.3

Характеристики цезиевых часов

Единица	Стандартные	Высококачественные	С цифровым управлением	Первичные лабораторные
Точность	7×10^{-12}	7×10^{-12}	1×10^{-12}	1×10^{-14}
($\sigma_y(\tau=100$ с))	3×10^{-12}	$<10^{-12}$	$<10^{-12}$	$<10^{-13}$
Мин. уровень мерцания ($\sigma_{y,min}$)	1×10^{-13}	3×10^{-14}	5×10^{-15}	3×10^{-15} *
$\sigma_y(\tau=1$ месяц)	1×10^{-13}	3×10^{-14}	5×10^{-15}	+
Температура (на К)	1×10^{-13}	1×10^{-13}	$<10^{-15}$	1×10^{-15} *
Магнитное поле (на 10^{-4} Т)	1×10^{-12}	1×10^{-13}	$<10^{-14}$	+

+ не применяется для первичных часов; * оценочные данные (для измерений нужен источник с очень высокой точностью, который в настоящее время недоступен).

Часть B
Управляющие эталоны

2.6 Введение

Ученые, инженеры и другие пользователи, работающие с оборудованием времени и частоты, часто нуждаются в синхронизации местных сигналов времени или частот с принятыми национальными или международными стандартами. В других случаях важно сравнить местные сигналы с эталонными стандартами для определения каких-либо различий. Так как Международный союз электросвязи (МСЭ) и другие научные и технические организации рекомендовали Универсальное Координированное Время (UTC) в качестве приемлемого международного эталона времени и частоты для большинства применений, то для персонала, работающего с таким оборудованием, важно знать о различных источниках точного UTC и средствах получения к ним удобного доступа.

Хотя BIPM отвечает за создание, поддержание, координацию, общее наблюдение за системой UTC, пользователи по всему миру в общем имеют доступ к локальным приближенным значениям UTC через различные национальные службы распространения сигналов времени-и-частоты, которые координируются с целью тесного согласования с международной шкалой времени UTC. Рекомендация МСЭ-R TF.685 требует, чтобы различные местные шкалы времени UTC(k) удерживались по-возможности в пределах 1 мс от UTC. Однако, как это будет показано далее более подробно, методы распространения, используемые для передачи UTC от национальных центров времени-и-частоты пользователям, часто вносят погрешности, которые гораздо больше, чем это значение. Таким образом, уровень точности, необходимый на стороне пользователя, является одним из наиболее важных факторов при выборе источника эталонных сигналов времени-и-частоты из имеющегося набора альтернатив.

Современные тенденции распространения сигналов времени-и-частоты включают использование наземного и спутникового радиовещания в различных частотных диапазонах, телефонных линий общего пользования, одновременный обмен сигналами времени-и-частоты через спутниковые ретрансляторы, передача сигнала через крупномасштабные синхронизированные цифровые сети связи, линии с использованием оптических волокон, коаксиальных кабелей или СВЧ систем. Различные радиослужбы и методы распространения используют как специальные полосы частот, распределенные МСЭ для службы стандартных частот и сигналов времени (и их расширение на спутниковые службы), так и другие частоты, распределенные различным службам радиосвязи. В качестве примера последнего подхода служба радиоопределения ведет различные наземные и спутниковые передачи, управление которыми должно быть точно привязано по отношению ко времени и/или частоте. Такие передачи для целей радионавигации также очень полезны для распространения сигналов времени-и-частоты без выдвижения дополнительных требований к имеющимся распределениям частот.

МСЭ распределил для распространения сигналов времени-и-частоты следующие конкретные частоты: 20,0± 0,5 кГц; 2,5 ± 0,005 МГц; 5,0 ± 0,005 МГц; 10,0 ± 0,005 МГц; 15,0 ± 0,01 МГц; 20,0 ± 0,01 МГц; 25,0 ± 0,01 МГц. Регламент радиосвязи МСЭ также включает язык, который разрешает использовать конкретные участки в диапазоне 14—90 кГц спектра для передачи сигналов времени-и-частоты. Кроме того, несколько других частот было распределено для спутниковой службы стандартных частот и сигналов времени, но они никогда не использовались для этой цели (с 1995 г).

2.7 Факторы, которые необходимо учитывать при выборе и использовании альтернативных служб и методов распространения сигналов времени и частоты

Начиная с самых ранних радиопередач сигналов стандартных частот в 20-е годы, в мире разработано много различных методов и служб распространения сигналов времени-и-частоты. Это многообразие различных источников стандартных эталонных сигналов отражает, помимо прочего, большое разнообразие применений сигналов времени-и-частоты, широкий диапазон необходимых значений точности, глобальный характер обслуживаемой зоны охвата, различия в относительной важности эталонов времени по сравнению с эталонами частоты, а также колебания уровня опытности пользователей и стоимости оборудования. Сегодня пользователи во многих регионах мира могут получить доступ к ВЧ передачам от некоторых из более чем 20 национальных служб, использующие как распределенные полосы частот, так и другие ВЧ частоты; к ряду служб низких частот (НЧ) и очень низких частот (ОНЧ) службам, включая как специальные передачи сигналов времени-и-частоты, так и радионавигационные передачи, такие как Loran-C и Omega; несколько спутниковых радиопередач с использованием метеорологических (GOES), радионавигационных (Transit, GPS, ГЛОНАСС), телевизионных и других многоцелевых спутников (INSAT).

Для пользователей, нуждающихся в современной точности времени, UTC легкодоступно из международных компьютерных сетей (например, ИНТЕРНЕТ) и из телефонных служб общего пользования, особенно в Европе и Северной Америке.

При выборе для заданного применения одного или нескольких доступных источников сигналов времени UTC или частоты пользователю необходимо учитывать разные факторы и их относительную важность. Они включают: наличие каждой службы в конкретном географическом месторасположении пользователя; требуется ли применение эталонов "времени" или "частоты" или обоих; требуемая точность; необходимость постоянного наличия эталона, периодического или от случая к случаю; относительная важность автоматической работы; расходы пользователя на оборудование и эксплуатацию. Так как ни один из источников UTC не является оптимальным во всех этих отношениях, то должен быть найден компромисс при анализе этих факторов и имеющихся служб для данной ситуации. Для оказания помощи в выборе наилучшей альтернативы последующие разделы представляют сводную информацию в виде таблиц и затем дают описательную информацию о каждой альтернативе, включая краткий комментарий по их практическому использованию.

2.8 Сравнение альтернативных источников и методов распространения для эталонов точного времени и частоты

Таблица 2.4 представляет собой сводную сравнительную информацию о различных источниках эталонных сигналов точного времени-и-частоты по отношению к ряду факторов, которые важны при оптимальном выборе для каждой конкретной ситуации. Для полноты таблица включает не только прямые источники сигналов UTC и частоты, но и ряд систем и методов, которые полезны для распространения и сравнения сигналов точного времени и частоты. Информация в таблице 2.4 основана на согласованных взглядах экспертов в области времени-и-частоты, участвующих в работе 7-й Исследовательской комиссии МСЭ-R с середины 1993 г. Так как некоторые из этих служб, систем и методов распространения быстро развиваются, то потенциальные пользователи должны иметь осведомленность о будущих разработках. Необходимо отметить, что достижение указанных рабочих уровней точности часто требует тщательной калибровки задержек из-за приемного оборудования. Это особенно важно для максимальных заявленных значений точности.

Службы, системы и методы, указанные в таблице 2.4, представляют широкий диапазон характеристик точности от 10 мс до 1 нс для времени и от 10^{-6} до 10^{-15} для частоты. Более высокие результаты возможны в пределах небольших географических регионов при использовании оптико-волоконных линий, как это указано в таблице. Как можно ожидать, расходы пользователя также охватывают широкий диапазон и имеют тенденцию к увеличению с увеличением возможностей точности.

2.9 Дополнительная информация, касающаяся использования различных альтернативных служб, систем и методов

Таблица 2.5 представляет дополнительную информацию по каждому из альтернативных источников для эталонных сигналов точного времени-и-частоты. Эта информация призвана помочь потенциальному пользователю в практическом использовании этих источников. Колонка с основной информацией описывает систему или метод, его доступность и некоторые из наиболее важных преимуществ и недостатков. В колонке "Комментарии" приводятся краткие комментарии по практическому использованию, включая тип необходимого оборудования, способ применения и другие практические соображения.

В колонке "Ссылки и литература" дается дополнительная информация по методам передачи сигналов времени-и-частоты. Литература в этой области очень обширная, так что указанные ссылки отобраны так, чтобы были представлены доступные публикации. Акцент сделан на последние публикации, которые подтверждают приведенные в таблице данные, вместе с несколькими более ранними публикациями, которые предоставляют дополнительную основополагающую информацию по каждому конкретному пункту.

ТАБЛИЦА 2.4

Характеристики некоторых потенциальных источников и методов распространения информации об эталонах точного времени и частоты

Вид	Типичная возможная точность передачи времени	Типичная возможная точность передачи частоты	Зона охвата	Доступность	Простота применения	Приблизительные относительные затраты пользователя ($ США, 1995 г.)	Пример системы	Комментарии (1995 г.)
ВЧ вещательные передачи	1—10 мс	10^{-6} — 10^{-8} (за 1 день)	Глобальная	Постоянная, но зависит от оператора и местоположения	Зависит от требований к точности	От 50 до 5 000	Много служб по всему миру. См. Рекомендацию МСЭ-R TF.768	Точность зависит от длины трасы, времени дня, калибровки приемника и т. д.
НЧ вещательные передачи	1 мс	10^{-10} — 10^{-11}	Региональная	Постоянная	Автоматическая	3 000—5 000	См. Рекомендацию МСЭ-R TF.768	Зависит от расстояния от источника и распространения в течение суток (высоты ионосферы).
НЧ навигация (импульсный режим)	1 мкс	10^{-12}	Региональная	Постоянная	Автоматическая	12 000	Loran C	Охват северного полушария. Стабильность и точность основаны на приеме земной волны.
ОНЧ вещательной передачи	10 мс	10^{-11} (за 1 день)	Глобальная	Постоянная	Автоматическая	4 000	Omega	Разрешающая способность несущей может обеспечить лучшую точность времени.
Телевизионные вещательные передачи	10 нс одновременное наблюдение за общим источником	10^{-12} —10^{-13} (за 1 день)	Локальная	Зависит от расписания передач	Автоматическая	5 000		Для отсчета времени необходима калибровка.
Навигационный спутник, вещательные передачи	20—500 нс (См. Примечания в таблице 2)	10^{-10} —10^{-13}	Глобальная	Постоянная	Автоматическая	от 3 000 до 15 000	GPS и ГЛОНАСС	Необходимо усреднение за сутки, чтобы удовлетворить конкретным возможностям передачи частот. На сегодняшний день наилучшие системы вещания доступны с приемниками промышленного изготовления.
Навигационный спутник, одновременное наблюдение за общим источником	5—20 нс	10^{-13} —10^{-15} (за 1—50 дней)	Межконтинентальная	Постоянная (рассчитывается по факту)	Автоматический сбор данных. Требуется последующая обработка.	10 000 до 20 000 на станцию	GPS и ГЛОНАСС	Наиболее точный метод, широко используется имеющийся сегодня для приемников промышленного изготовления (1995) метод синхронизации времени для базовых линий менее 8000 км.

ТАБЛИЦА 2.4

Характеристики некоторых потенциальных источников и методов распространения информации об эталонах точного времени и частоты (продолжение)

Вид	Типичная возможная точность передачи времени	Типичная возможная точность передачи частоты	Зона охвата	Доступность	Простота применения	Приблизительные относительные затраты пользователя ($ США, 1995 г.)	Пример системы	Комментарии (1995 г.)
Метеорологический спутник, вещательные передачи	100 мкс	Не рекомендуется для передачи частоты	Региональная (зона обслуживания спутника)	Постоянная	Автоматическая	от 4 000 до 5 000	Геостационарный спутник по исследованию Земли GOES	Может отсутствовать во время затенения спутника.
Геостационарный спутник, вещательные передачи	20 мкс	5×10^{-10}	Региональная (зона обслуживания спутника)	Постоянная	Автоматическая	4 000	Международный спутник INSAT	Точность ограничивается зоной обслуживания спутника. Может быть недоступным при затенении спутника.
Спутниковое ТВ	0,5—10 мкс	10^{-10} — 10^{-11}	Зона обслуживания спутника	Зависит от расписания передач	Автоматический сбор данных	7 000	Спутники DBS — Непосредственное спутниковое вещание	Без поправки на положение спутника.
	10—100 нс	10^{-12} — 10^{-13}	Региональная (зона обслуживания спутника)	Зависит от расписания вещания	Требуется последующая обработка данных	7 000	Спутники DBS	С поправкой на движение спутника.
Спутник связи, двусторонняя связь	1—10 нс	10^{-14} — 10^{-15}	Региональная (зона обслуживания спутника)	Постоянная (по расписанию)	Сбор данных может быть автоматическим (зависит от спутника) Требуется последующая обработка	50 000 на станцию	Существуют сети в Северной Америке и Европе	В настоящее время наиболее точный эксплуатационный метод.
Телефонный код времени	1—10 мс	10^{-8} (за 1 день)	Дальность действия телефонного вызова	Постоянная	Автоматическая	100	Европа и Северная Америка	Телефонная линия должна проходить по одной и той же трассе в обоих направлениях. Предполагается наличие компьютера и программного обеспечения.

ТАБЛИЦА 2.4

Характеристики некоторых потенциальных источников и методов распространения информации об эталонах точного времени и частоты (продолжение)

Вид	Типичная возможная точность передачи времени	Типичная возможная точность передачи частоты	Зона охвата	Доступность	Простота применения	Приблизительные относительные затраты пользователя ($ США, 1995 г.)	Пример системы	Комментарии (1995 г.)
Волоконно-оптический кабель	10—50 пс	10^{-16} — 10^{-17}	Локальная, менее 50 км	Постоянная	Автоматическая	Передатчик и приемник $ 30 000 за комплект + расходы за кабель и подземную установку	Предназначен для передачи частоты	Кабель должен быть стабилизирован по температуре (1,5 м под землей).
	100 нс	10^{-13} — 10^{-14} (за 1 день)	Большие расстояния, 2000 км	Постоянная	Автоматическая	Нет сведений. Это оборудование — часть специфической системы связи	Сеть синхронной цифровой иерархии (СЦИ)	Часть цифровой системы связи.
Линия СВЧ	1—10 нс	10^{-14} — 10^{-15}	Локальная	Постоянная	Автоматическая	50 000—75 000		Чувствительна к атмосферным условиям и к явлениям многолучевости. Должна быть двусторонней для достижения указанной точности и стабильности.
Коаксиальный кабель	1—10 нс	10^{-14} до 10^{-15}	Локальная	Постоянная	Автоматическая	5—30 на метр		Чувствительна к температуре, коэффициенту стоячей волны напряжения, влажности, барометрическому давлению.

ТАБЛИЦА 2.5

Дополнительная информация по практическому использованию различных альтернативных источников сигналов времени-и-частоты

Система/метод	Основная информация	Комментарии по оборудованию и использованию
ВЧ вещательные передачи	Существуют примерно 13 станций в мире, вещающих на одной или нескольких распределенных ВЧ частотах. Ряд других станций действуют на других ВЧ частотах. Типичные услуги включают: стандартные частоты, сигналы времени, интервалы времени, коды времени, речевое объявление времени, информация о времени UTC. Эти услуги обеспечивают удобный, легкодоступный источник UTC при современном уровне точности/ Хотя ВЧ сигналы могут приниматься на больших расстояниях, эффекты распространения могут ограничить точность и стабильность приема. Многочисленные станции, действующие на тех же распределенных частотах, могут вызвать взаимные помехи в некоторых зонах. Условия приема часто очень изменчивы в зависимости от сезона, времени дня, солнечной активности, атмосферных условий и т.д. Некоторые ВЧ службы закрываются в пользу других альтернатив. Рекомендация МСЭ-R TF.768 содержит полный перечень ВЧ услуг, включая детали содержания и формата передач.	Имеются недорогие приемники и антенны. Разнесенные приемники используют несколько ВЧ частот, чтобы частично компенсировать эффекты распространения. Часто используются простые короткие или длинные проволочные вибраторные антенны. Информация о разработках других антенн можно найти в радиолюбительских справочниках. Прием, как правило, лучше на более низких частотах (менее 10 МГц) в ночное время и на более высоких частотах (более 10 МГц) в дневное время. Прием может быть прерывистым из-за нарушений при распространении и/или из-за помех. Оптимальный прием обычно в дневное или ночное время, когда ионосфера наиболее стабильна. Речевое объявление времени обеспечивает точность в несколько десятых секунды. Для лучшей точности – до примерно 1 мс – могут потребоваться специальные методы и аппаратура измерений, такие как осциллографы и электронные счетчики. Калибровка времени задержки приемника также необходима для лучшей точности. Точность при измерении частоты ограничивается движением ионосферы до около 1×10^{-7}. Часто используются методы частоты биений совместно с осциллографами и /или счетчиками. Измерения частоты могут также выводиться из ежедневных измерений различий во времени. Расчет времени задержки на трассе сигнала усложняется неопределенностями в числе "скачков" сигнала между станцией и пользователем и высотой отражающего слоя в любой точке с учетом времени. Единичные скачки могут обычно допускаться для расстояний менее 1600 км.
НЧ вещательные передачи	Эта категория включает вещательные передачи в диапазоне НЧ (30–300 кГц), которые являются полезным источником сигналов времени или частоты, но исключает вещательные передачи навигационной системы, такой как Loran-C. Эти вещательные передачи разделяются на 2 вида: (1) специальные службы распространения сигналов времени-и-частоты, такие как DCF77, HBG, WWVB, JJF2; и (2) станции, действующие в системе службы звукового радиовещания, которые имеют стабилизированные несущие и/или дополнительную фазовую или амплитудную модуляцию, которая обеспечивает кодированную информацию о времени. Специальные службы в основном используют частоты в диапазоне 40–80 кГц. Многие из этих служб НЧ вещательных передач предоставляют пользователям самую полную информацию о времени года в кодированном виде и они широко используются во многих применениях, связанных с хранением времени. Возможна точность отсчета времени менее 1 мс. При использовании в качестве стандарта частоты, НЧ вещательные передатчики, включая стабилизированные звуковые радиовещательные передачи, предлагают точность калибровки менее, чем 1×10^{-11}, при усреднении за 1 день. Надежные зоны охвата для различных передач составляют от нескольких сотен км до 3000 км.	Имеются в наличии относительно недорогие промышленно изготовленные приемники и антенны в регионах, обслуживаемых соответствующими вещательными передачами. Промышленно изготавливаемые приемники – автономны и обеспечивают разнообразные выходные сигналы, которые часто могут указываться пользователем. Более усовершенствованные приемники с фазовым слежением позволяют потребителям установить прямое отслеживание частоты от выбранных источников UTC. Типичные антенны для этих вещательных передач – логопроволочные (например, 50–100 м), штыревые (например, 3 м), рамочные антенны, которые помогают в распознавании помех, и небольшие антенны с ферритовой петлей. Условия приема изменяются от мощности передатчика, месторасположения пользователя, иногда от сезона и времени дня. При больших расстояниях между передатчиком и пользователем избегайте производить измерения, если происходит восход или закат солнца в любой точке этого пути. Калибровки частоты местных генераторов могут выполняться постоянно путем контроля разности фазы между местным генератором и принимаемой передачей. Однако, нужная надлежащая оценка записей результирующей фазы требует определенного операторского мастерства и опыта в интерпретации и учета различных фазовых сдвигов и возможных "проскальзываний цикла". Может наблюдаться вредная помеха между ионосферной волной первого скачка и земной волной, что вызовет резкое падение напряженности принимаемого поля на определенных расстояниях от передатчика. Для НЧ вещательных передач при 60 кГц это расстояние равно примерно 1200 км.

ТАБЛИЦА 2.5

Дополнительная информация по практическому использованию различных альтернативных источников сигналов времени-и-частоты (продолжение)

Система/метод	Основная информация	Комментарии по оборудованию и использованию
НЧ вещательные передачи (продолжение)	Более подробная информация о доступных вещательных передачах для использования при передаче сигналов времени и частоты – см. Рекомендацию МСЭ-R TF.768.	
Навигационные НЧ вещательные передачи (импульсные)	Примерно 65 станций Loran-C, разбросанных по Северному полушарию, постоянно посылают навигационные сигналы большой мощности на частоте 100 кГц. Эти станции организованы в цепочки из 4–5 станций. Каждая цепь передает группы точно управляемых импульсов через определенный единый Интервал повтора Группы. Так как навигационные сигналы синхронизируются и совпадение частот генераторов контролируется атомными стандартами, а сами сигналы тщательно контролируются и управляются, то они могут быть очень полезны как эталоны времени-и-частоты. Передачи Loran-C не содержат полной информации о времени дня и не являются прямым источником времени UTC. Однако, если часы пользователя, изначально установлены на UTC какими-то другими способами, система Loran-C может использоваться для поддержания местных часов в рамках нескольких микросекунд от UTC в течение длительных периодов времени. Калибровка частоты с использованием Loran-C может обеспечить точность 1×10^{-12} при усреднении за 1 сутки или больше. Хотя для навигации необходим, по крайней мере, прием от 3 различных станций, измерения времени-и-частоты требуют приема только от 1 станции.	В продаже имеются специальные приемники и антенны сигналов времени Loran-C. Более дорогие модели принимают и отслеживают сигналы Loran-C автоматически. Неавтоматические приемники требуют значительного операторского опыта и квалификации для оптимального выполнения отсчета времени. При использовании системы Loran-C для привязки местных часов к UTC выходной импульс 1 Гц от приемника может синхронизироваться с UTC с использованием таблиц "Время совпадения", опубликованных Обсерваторией Военно-морского флота США. Эти таблицы указывают конкретные периоды времени, когда начало принимаемого сигнала Loran-C совпадает с секундой UTC. Некоторые приемники времени в системе Loran-C могут выполнять эту синхронизацию автоматически. При больших расстояниях от станции сигнал ионосферной волны Loran-C иногда может использоваться для отсчета времени на уровне 50–100 мс, даже когда первичный сигнал земной волны не может использоваться. Сезонные эффекты распространения сигналов Loran-C могут вызвать изменения в отсчете времени в несколько микросекунд. На этом уровне также должны учитываться задержки сигнала приемником. Калибровки частоты местного генератора могут выполняться путем регистрации разности фаз между Loran-C и местной системой или ежедневными измерениями разности фазы с использованием счетчика. При 24-часовом усреднении возможна точность порядка 1×10^{-12}. Разработка очень дешевых по стоимости приемников Loran-C (ниже $ 1000) для навигации создает некоторые возможности для их адаптации к применениям в области времени-и-частоты при условии, что имеется необходимый технический опыт.
ОНЧ вещательные передачи	Существует ряд вещательных станций, действующих в диапазоне 10–30 кГц, которые применяются для отсчета времени-и-частоты. Это вещательные станции, предназначенные в первую очередь для связи на большие расстояния или навигации, но которые точно стабилизированы по частоте и времени путем стандартизации по нескольким атомным стандартам. Распространение радиоволн относительно стабильно на очень большие расстояния (тысячи километров), что может позволить приемникам со слежением по фазе поддерживать фазу в пределах нескольких микросекунд на протяжении длительных периодов времени. ОНЧ вещательные передачи обычно не содержат полной информации о времени UTC и пригодны, в первую очередь, в качестве эталонов частоты.	Типовое оборудование – приемники со слежением за фазой, рамочные антенны, устройства записи карт. Для лучшего результата необходимо калибровать задержку приемного тракта. В приемниках с использованием кодирования с минимальным сдвигом (MSK) для передачи необходимо восстановить связанную по фазе несущую посредством смешивания и умножения соответствующей волны. Для дальнейшей информации – см. примечание 10 к таблице 2 в Рекомендации МСЭ-R TF.768 Станции Omega расположены в США (Северная Дакота и Гавайи), Японии, Аргентине, Франции (Реюньон), Либерии, Норвегии и Австралии. Так как каждая станция передает несколько частот последовательно, то использование одной из навигационных частот Omega для калибровки требует, чтобы используемый коммутатор включал и выключал в соответствующее время приемник фазового слежения для приема только конкретной частоты.