

**К. Одуан, Б. Гино**

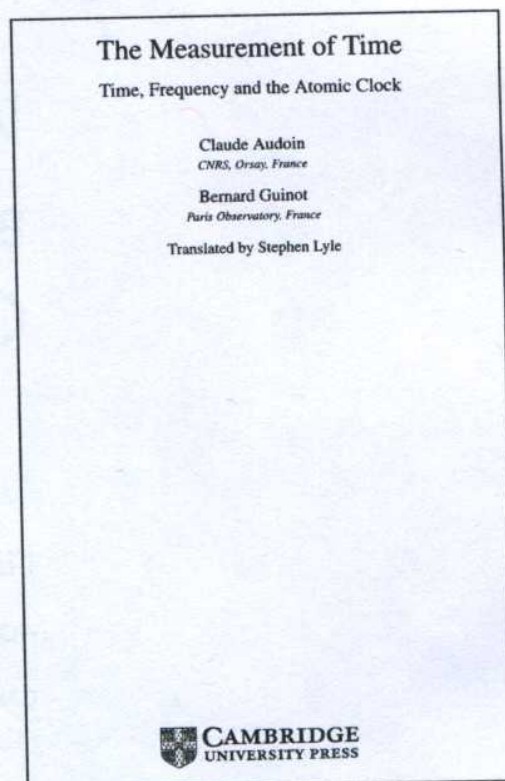
**Измерение времени. Основы GPS**

**Москва:**

**Техносфера, 2002. — 400 с.**

Первое за последние 50 лет всеобъемлющее издание по физике и метрологии времени. Точность атомных часов и атомной шкалы авторы рассматривают в контексте фундаментальных физических исследований, а также в применении к таким техническим системам, как глобальные системы навигации и позиционирования.

Книга станет настольной для метрологов, астрономов, инженеров-разработчиков высокоточных время-частотных приборов и систем, послужит учебным пособием и справочником для специалистов в таких областях, как геофизика, атомная физика, навигация и телекоммуникации. Русское издание дополнено обширным разделом по физико-техническим основам и алгоритмам глобальной навигационной системы GPS, что позволяет рассматривать эту часть книги как первое учебное пособие по данной тематике в стране.



«Les fondements de la mesure du temps»  
by Claude AUDOIN & Bernard GUINOT  
© Masson, Paris 1998  
© 2002, ЗАО «РИЦ «Техносфера»  
перевод на русский язык, оригинал-макет,  
оформление

**ISBN 5-94836-006-7**



# Оглавление

<b>Глава 1.</b>	
<b>Введение .....</b>	<b>12</b>
<b>Глава 2.</b>	
<b>Принципы измерения времени .....</b>	<b>18</b>
2.1. Введение .....	18
2.2. Время и воспроизводимость: понятие длительности .....	19
2.2.1. Хаос .....	19
2.2.2. Измерение времени через измерение других величин .....	20
2.2.3. Локальная природа явлений .....	20
2.2.4. Разное старение? .....	21
2.2.5. Воспроизводимость и измерительные эталоны .....	22
2.3. Время, эволюция и шкалы времени .....	22
2.4. Два способа измерения времени .....	24
2.4.1. Использование воспроизводимости .....	25
2.4.2. Использование динамической модели .....	27
<b>Глава 3.</b>	
<b>Измерение времени и теоретические модели .....</b>	<b>30</b>
3.1. Классическая модель и абсолютное время .....	31
3.2. Специальная теория относительности .....	33
3.2.1. Физика в инерциальных системах .....	33
3.2.2. Лоренцевское преобразование и инвариантность интервала .....	36
3.2.3. Время в специальной теории относительности .....	37
3.2.4. Область применения специальной теории относительности .....	38
3.3. Общая теория относительности .....	39
3.3.1. Обзор .....	39
3.3.2. Пост-ньютоновское приближение .....	42
3.4. Выводы и заключение .....	52
<b>Глава 4.</b>	
<b>Эволюция измерений времени .....</b>	<b>54</b>
4.1. Дата, календарь и час .....	54
4.2. Измерение времени, основанное на смене дня и ночи .....	56
4.2.1. Среднее солнечное время .....	56
4.2.2. Шкалы всемирного времени и часовые пояса .....	57



4.2.3. К реализации Всемирного Времени .....	59
4.2.4. Определение секунды до 1960 г: секунда среднего солнечного времени .....	62
4.3. Время, основанное на динамике Солнечной Системы: эфемеридное время .....	63
4.3.1. Первые сомнения в равномерности вращения Земли .....	63
4.3.2. Принятие неравномерности вращения Земли .....	63
4.3.3. Определение секунды с 1960 по 1967 гг.: эфемеридная секунда .....	66
4.3.4. Эфемеридное время: шкала сохраненная для астрономов .....	68
4.4. Измерение атомного времени .....	68
4.4.1. Атомные стандарты частоты и определение атомной секунды (1967 г.) .....	68
4.4.2. От Всемирного Времени к Международному Атомному Времени .....	74
4.5. Всемирное координированное время .....	79
4.6. Финальные заметки .....	82
<b>Глава 5.</b>	
<b>Время и часы .....</b>	<b>84</b>
5.1. Введение .....	84
5.2. Нестабильность частоты и времени .....	86
5.2.1. Определения .....	86
5.2.2. Условные обозначения .....	87
5.2.3. Измерения во временной области .....	88
5.2.4. Измерения в спектральной области .....	91
5.2.5. Моделирование частотных и временных флуктуаций .....	91
5.2.6. Характеристики нестабильности частоты .....	93
5.2.7. Характеристики нестабильности времени .....	101
5.2.8. Определение вклада от каждого генератора .....	102
5.3. Механические осцилляторы .....	103
5.4. Пьезоэлектрические осцилляторы .....	103
5.4.1. Резонаторы .....	104
5.4.2. Осцилляторы .....	106
5.4.3. Характерные величины .....	107
5.5. Атомные стандарты времени и частоты. Представление о точности .....	107
5.6. Сличения времени и частоты .....	109
5.6.1. Общие наблюдения .....	109
5.6.2. Соотношение между частотой и приращением собственного времени .....	110

5.6.3. Сличения времени .....	111
5.6.4. Сличение частоты .....	125
<b>Глава 6.</b>	
<b>Атомные стандарты частоты .....</b>	<b>132</b>
6.1. Спектроскопические основы атомных стандартов частоты .....	132
6.1.1. Инвариантность и универсальность атомных свойств .....	132
6.1.2. Спектральные свойства щелочных атомов .....	133
6.1.3. Правила отбора .....	139
6.1.4. Ширина резонанса .....	141
6.2. Стадии работы атомных часов .....	142
6.2.1. Наблюдение в очень разреженных средах .....	142
6.2.2. Подготовка и детектирование атомных состояний .....	142
6.2.3. Устранение эффекта Доплера .....	146
6.2.4. Взаимодействие между атомами и электромагнитным полем .....	149
6.2.5. Соответствующие электронные системы .....	149
6.3. Реализация приближения изолированного атома в покое .....	150
6.4. Цезиевые пучковые часы .....	153
6.4.1. Цезиевые часы с магнитным отклонением пучка .....	154
6.4.2. Цезиевые пучковые часы с оптической накачкой .....	187
6.4.3. Цезиевые часы с лазерным охлаждением .....	195
6.4.4. Рубидиевые часы с лазерным охлаждением .....	209
6.5. Водородные мазеры .....	210
6.5.1. Основные принципы работы водородного лазера .....	211
6.5.2. Условия генерации .....	213
6.5.3. Активный водородный генератор .....	217
6.5.4. Пассивный водородный лазер .....	227
6.5.5. Метрологические свойства водородного лазера .....	232
6.5.6. Криогенный водородный лазер .....	235
6.6. Часы на рубидиевой ячейке .....	237
6.6.1. Описание .....	237
6.6.2. Принцип действия .....	239
6.6.3. Электроника .....	240
6.6.4. Метрологические свойства часов с рубидиевой ячейкой .....	241
6.6.5. Современные исследования и перспективы .....	243
6.7. Часы на удержанных ионах .....	243
6.7.1. Удержание ионов в радиочастотной ловушке .....	244
6.7.2. Удержание облака ионов .....	249
6.7.3. Описание стандарта частоты на облаке ионов ртути .....	251
6.7.4. Метрологические свойства стандартов частоты на облаке холодных ионов ртути .....	254

6.7.5. Стандарт частоты на ионах иттербия .....	256
6.7.6. Стандарт частоты на ионе ртути с лазерным охлаждением .....	256
6.8. Другие атомные стандарты .....	257
6.8.1. Стандарт частоты на пучке магния .....	257
6.8.2. Оптические стандарты частоты .....	258
6.8.3. Оптический стандарт частоты на одиночном ионе в покое .....	258
6.8.4. Оптические стандарты для измерения времени .....	260
6.9. Заключение .....	261

## **Глава 7.**

<b>Измерения атомного времени .....</b>	<b>262</b>
7.1. Определения .....	262
7.1.1. Определение секунды .....	262
7.1.2. Международное атомное время и его связь с геоцентрическим и барицентрическим координатными временами .....	263
7.2. Установление международного атомного времени .....	266
7.2.1. Алгоритмы шкалы времени .....	266
7.2.2. Алгоритм для международного атомного времени .....	268
7.3. Свойства TAI и UTC .....	280
7.3.1. Надежность .....	280
7.3.2. Точность показаний .....	280
7.3.3. Стабильность частоты .....	280
7.3.4. Точность частоты .....	281
7.4. Мировая организация измерений времени .....	282
7.4.1. Всемирное координированное время .....	282
7.4.2. Локальное представление UTC и независимые локальные атомные времена .....	284
7.4.3. Другие формы атомного времени .....	286
7.5. Распространение времени и частоты .....	287
7.5.1. Частота .....	287
7.5.2. Время .....	288
7.6. Итоги и перспективы .....	289

## **Глава 8.**

<b>Астрономические времена .....</b>	<b>292</b>
8.1. Всемирное время .....	292
8.1.1. Концептуальные определения .....	292
8.1.2. Практическое определение UT1 .....	295
8.1.3. Другие виды всемирного времени .....	297

8.1.4. Техника измерений .....	298
8.1.5. Неравномерности вращения Земли .....	302
8.1.6. Применение всемирного времени .....	305
8.2. Эфемеридное время .....	307
8.2.1. Определение .....	307
8.2.2. Установление эфемеридного времени .....	308
8.2.3. Трудности и текущие решения .....	309
8.3. Пульсарное время .....	310

## **Глава 9.**

### **Применение сверхточного времени и частоты .....**

9.1. Фундаментальные исследования .....	317
9.1.1. Метрология .....	317
9.1.2. Измерение физических констант .....	319
9.1.3. Воздействие на атомную физику .....	320
9.1.4. Строение пространства-времени и гравитация .....	321
9.2. Определение положения, геодезия и навигация .....	326
9.2.1. Принципы время частотных методов .....	326
9.2.2. Глобальная система определения положения .....	328
9.2.3. Другие системы определения положения .....	332
9.3. Интерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ) .....	333
9.4. Программа TOPEX-POSEIDON .....	334
9.5. Телекоммуникация .....	338

## **Глава 10.**

### **Навигационная система GPS – генератор**

<b>координатно-временного поля .....</b>	<b>340</b>
10.1. Физические и геометрические принципы действия GPS .....	341
10.1.1. Геодезические построения .....	341
10.1.2. Методы измерения расстояний .....	343
10.1.3. Орбиты спутников .....	345
10.2. Сигналы GPS .....	347
10.2.1. Техника формирования кодовых последовательностей .....	347
10.2.2. Структура и передача в эфир навигационного сигнала .....	349
10.2.3. Прием и обработка сигналов .....	351
10.3. Методы учета факторов, искажающих результаты измерений .....	354
10.3.1. Влияние ионосферы .....	354
10.3.2. Влияние тропосферы .....	356
10.3.3. Другие факторы .....	357

10.4. Алгоритмы и точность координатно-временных определений ...	359
10.4.1. Абсолютный и относительные методы измерений .....	359
10.4.2. Особенности обработки фазовых измерений .....	362
10.4.3. Точность различных методов GPS-измерений .....	363
10.5. Организационная структура GPS .....	366
10.5.1. Космический, управляющий и пользовательский сегменты	366
10.5.2. Функциональные дополнения к GPS .....	371
10.5.3. Международная служба IGS .....	372
10.6. Области применения GPS .....	375
<b>Приложение 1.</b>	
<b>Акронимы для лабораторий времени .....</b>	<b>378</b>
<b>Приложение 2.</b>	
<b>Сокращения .....</b>	<b>380</b>
<b>Приложение 3.</b>	
<b>Определение основных единиц СИ .....</b>	<b>382</b>
<b>Приложение 4.</b>	
<b>Международные службы .....</b>	<b>384</b>
<b>Ссылки .....</b>	<b>386</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>398</b>