

IV. Приборы измерения времени и частоты

Первичные стандарты частоты. Recommendation ITU-R TF.686-2

Глоссарий и определения терминов по времени и частоте

Первичный стандарт частоты - стандарт частоты, частота которого соответствует принятому определению секунды и специфицированная точность которого достигается *независимо от калибровки*.

ЗАМЕЧАНИЕ 1. Международнопризнанной метрологической властью является Генеральная Конференция по мерам и весам (CGPM), и в настоящее время принятая опора является частотой специфицированного перехода в атоме цезия 133.

13 CGPM (1967/68, Resolution 1)

Секунда - продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133.

Следовательно, частота сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия 133 в точности равна 9 192 631 770 Гц.

На заседании СИРМ в 1997 было подтверждено, что это определение относится к атому цезия в покое при температуре 0 К.

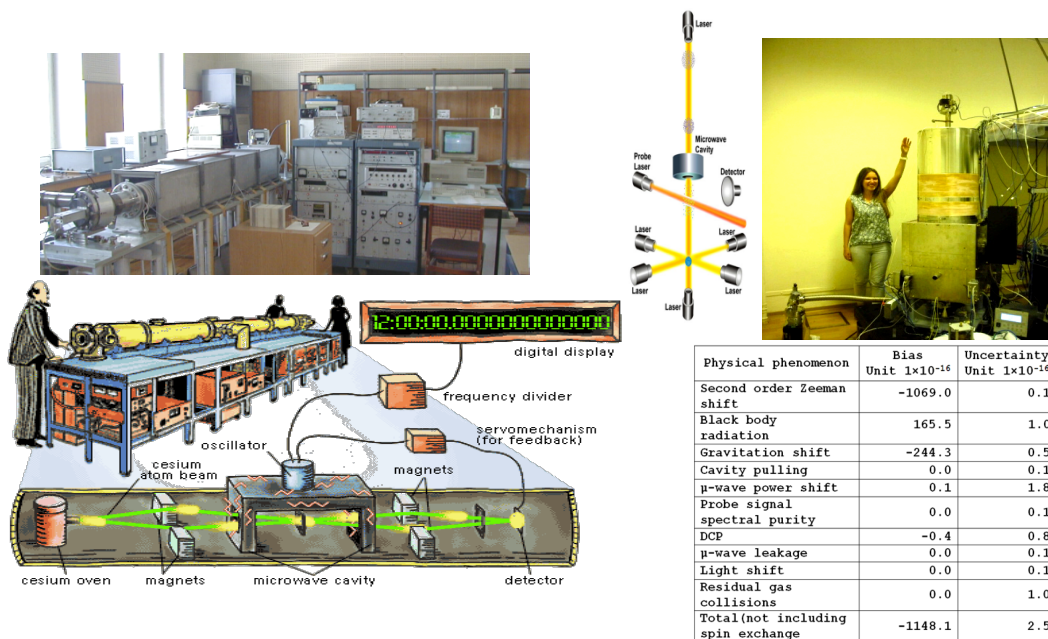


Рис. 24

Стандарты частоты для вторичной реализации секунды СИ

Recommendation ITU-R TF.686-2

Вторичный стандарт частоты - это стандарт частоты, который необходимо калибровать по первичному стандарту частоты.

Таким образом, термин «вторичный» говорит об иерархическом положении стандарта, а не о качестве его характеристик.

RECOMMENDATION 1 (CI-2006). «Рекомендованные значения частот стандартов для применений в практической реализации метра и вторичном представлении секунды»

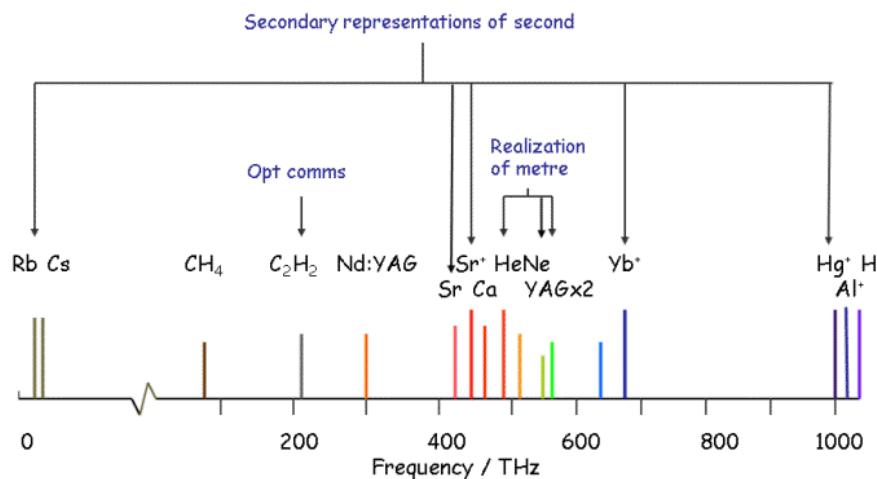


Рис. 25

- невозмущенный сверхтонкий квантовый переход в основном состоянии ^{87}Rb с частотой $f^{87}\text{Rb} = 6\,834\,682\,610.904\,324\text{ Hz}$ и оценкой $u_A \cdot 3 \cdot 10^{-15}$;
- невозмущенный оптический переход $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ в ионе Sr с частотой $f^{88}\text{Sr}^+ = 444\,779\,044\,095\,484\text{ Hz}$ и оценкой $u_A \cdot 7 \cdot 10^{-15}$;
- невозмущенный оптический переход $5d_{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F=2)$ в ионе $^{199}\text{Hg}^+$ с частотой $f^{199}\text{Hg}^+ = 1\,064\,721\,609\,899\,145\text{ Hz}$ и оценкой u_A of $3 \cdot 10^{-15}$;
- невозмущенный оптический переход $6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2)$ в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ с частотой $f^{171}\text{Yb}^+ = 688\,358\,979\,309\,308\text{ Hz}$ и оценкой $u_A \cdot 9 \cdot 10^{-15}$;
- невозмущенный оптический переход $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$ в нейтральном атоме ^{87}Sr с частотой $f^{87}\text{Sr} = 429\,228\,004\,229\,877\text{ Hz}$ оценкой $u_A \cdot 1.5 \cdot 10^{-14}$.

Квантовые часы



PERFORMANCE PARAMETERS

Stability (Allan Deviation)

ADEV

TAU = 1 sec	2.5x10 ⁻¹⁰
TAU = 10 sec	8x10 ⁻¹¹
TAU = 100 sec	2.5x10 ⁻¹¹
TAU = 1000 sec	8x10 ⁻¹²

RF Output Phase Noise (SSB)

1 Hz	<-50 dBc/Hz
10 Hz	<-70 dBc/Hz
100 Hz	<-113 dBc/Hz
1000 Hz	<-128 dBc/Hz
10000 Hz	<-135 dBc/Hz
100,000 Hz	<-140 dBc/Hz

Frequency Accuracy

- Maximum offset at shipment: ±5x10⁻¹¹
 - Maximum retrace (48 hrs off): ±5x10⁻¹⁰
 - Aging, monthly*: <9x10⁻¹⁰ typical
 - Aging, yearly*: <1x10⁻⁸ typical
 - 1 PPS Sync.: ±100 ns
- (*After 30 days of continuous operation)

- Aging
 - Monthly (after 1 month): <±5.0E-11/Month
 - <1.0E-11/Month (option)
 - 10 years: <±1.0E-9
- Frequency accuracy at shipment: <±5.0E-11 (@ +25°C)
- Frequency retrace <±2.5E-11 (on-off-on: 24h, 48H, 24H at 25°C)
- Short term stability $\sigma_y(t)$ (Allan deviation)

τ (sec)	
1	<1.0E-11
10	<3.2E-12
100	<1.0E-12
- Frequency control
 - Analog freq. adj. range: ±1.5E-9 [0 - 5V] Digital freq. adj. res: ±1.0E-6 with 2.0E-12 resolution



1 с	5,0·10 ⁻¹³ ;
10 с	2,0·10 ⁻¹³ ;
100 с	7,0·10 ⁻¹⁴ ;
1 час	9,0·10 ⁻¹⁵ ;
1 сутки	4,0·10 ⁻¹⁵

• Stability	Standard Performance	High Performance
Avg. Time (s)	Allan Deviation	Allan Deviation
0.01	<7.5E-11	<7.5E-11
0.1	<1.2E-11	<1.2E-11
1	<1.2E-11	<5.0E-12
10	<8.5E-12	<3.5E-12
100	<2.7E-12	<8.5E-13
1,000	<8.5E-13	<2.7E-13
10,000	<2.7E-13	<8.5E-14
100,000	<8.5E-14	<2.7E-14
5 days	<5.0E-14	<1.0E-14
30 days	<5.0E-14	<1.0E-14
Flicker floor		
Guaranteed	<5.0E-14	<1.0E-14
Typical	<1.5E-14	<5.0E-15

Рис. 26

Квантовые часы

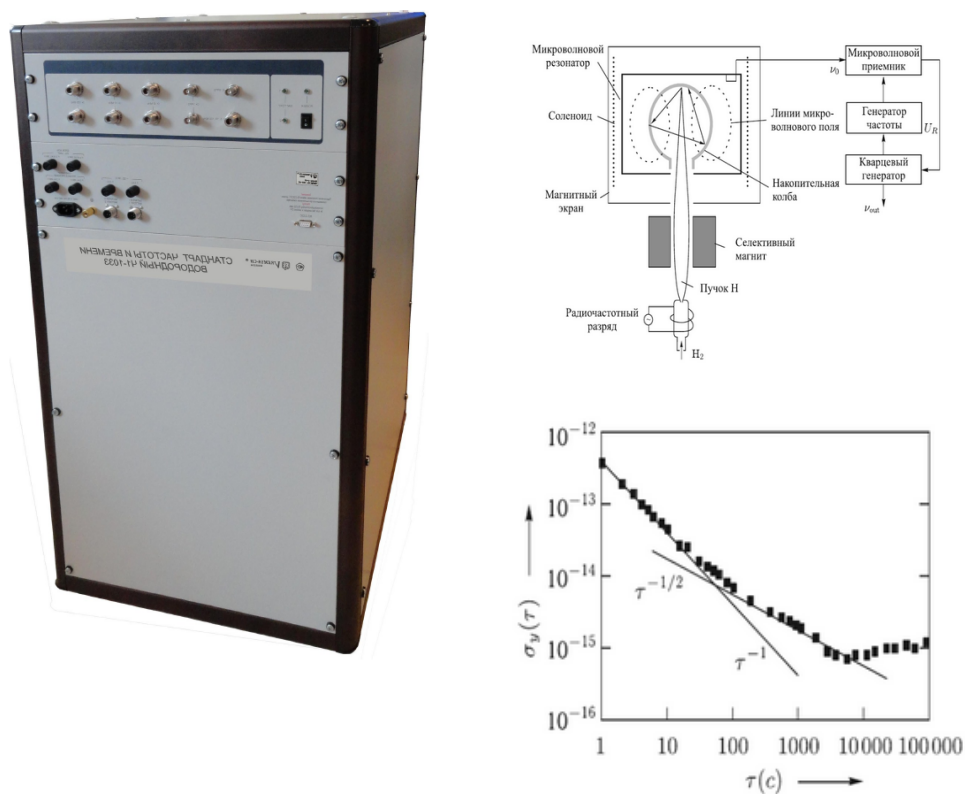


Рис. 27

Таблица 4

Интервал времени измерения, τ	Нестабильность частоты, СКДО	Полоса пропускания компаратора, Гц	Примечание
1 с	$1,5 \cdot 10^{-13}$	3	
10 с	$2,5 \cdot 10^{-14}$	3	
100 с	$7,0 \cdot 10^{-15}$	3 или 10	*
1 час	$2,0 \cdot 10^{-15}$	3 или 10	*
1 сутки	$5,0 \cdot 10^{-16}$	3 или 10	*

*Примечание – Значения нестабильности гарантируются при изменении температуры окружающей среды в пределах $\pm 0,1$ °C в рабочем диапазоне температур со скоростью не более 0,3 °C/час. Нестабильность частоты на интервале времени усреднения 1 сутки приведена за вычетом относительного среднего изменения частоты.

4.2.7 Относительное среднее (систематическое) изменение частоты за 1 сутки (дрейф) не более $\pm 2,0 \cdot 10^{-16}$ при времени наработки стандарта $T=9000$ ч.

*Часы на основе H-мазера
Реальные характеристики нестабильности*

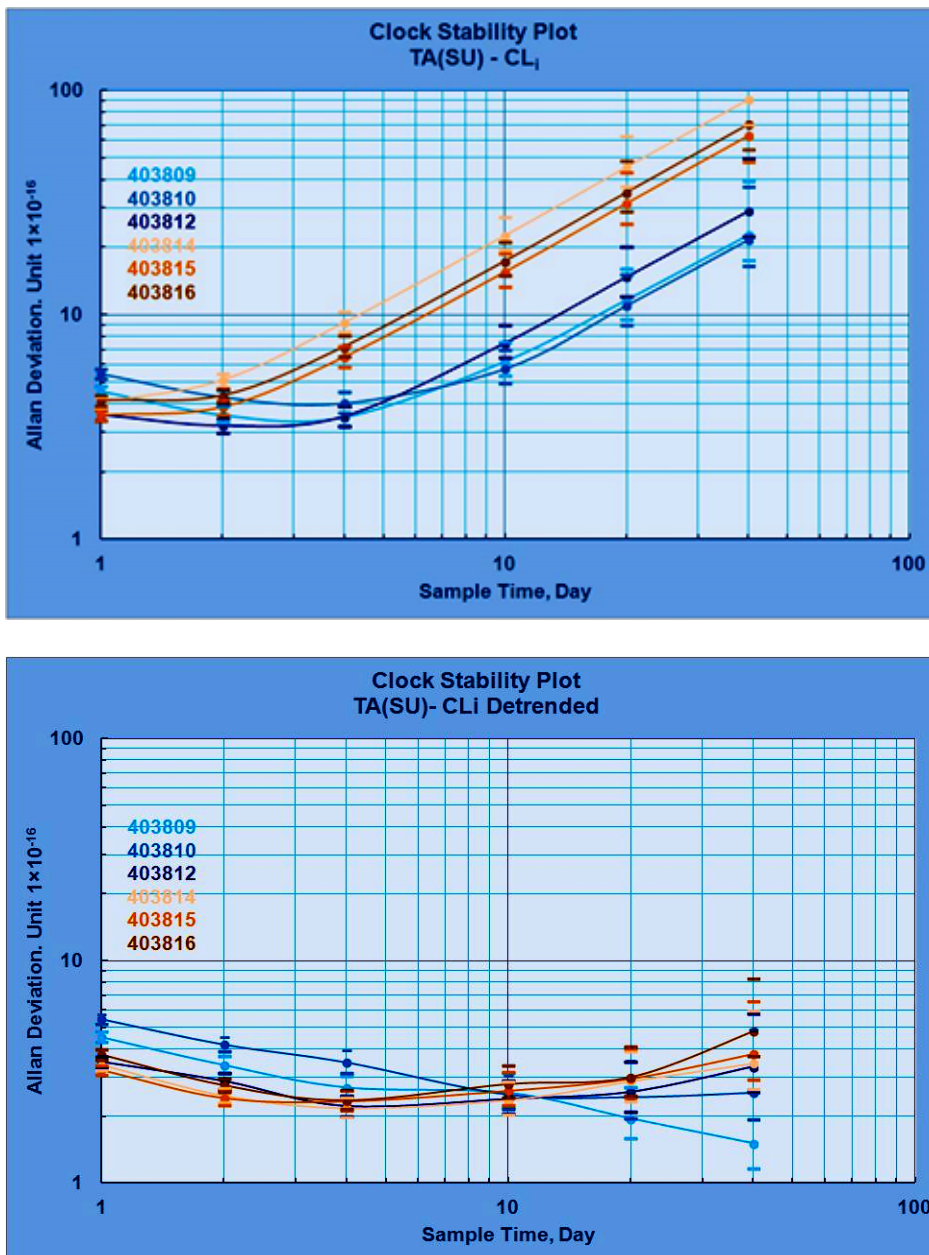


Рис. 28

Часы на основе H-мазера
Как достичь предельных характеристик

Основной критерий качества часов для хранения размера единицы времени и формирования шкалы времени – *прогнозируемость*.

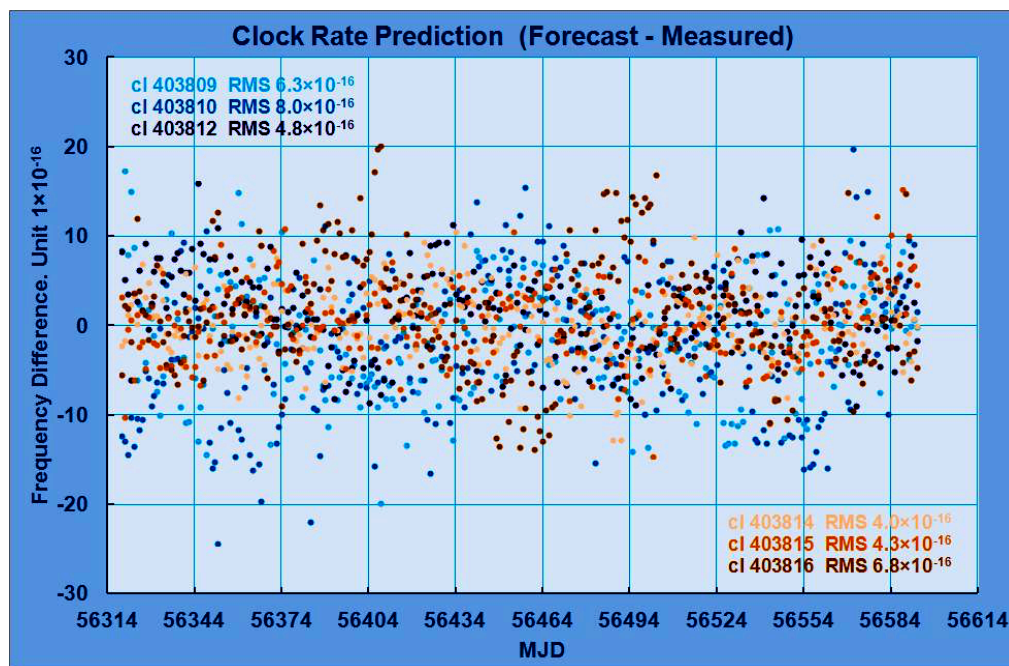


Рис. 29

Возмущающие эффекты:**Температура**

- Квадратичный Допплер $\sim 1.4 \cdot 10^{-13}$ /К (квантовый переход)
- Расстройка резонатора (тепловое расширение)
- Электроника

Магнитное поле

- Квантовый переход

Старение покрытия колбы

- Квантовый переход

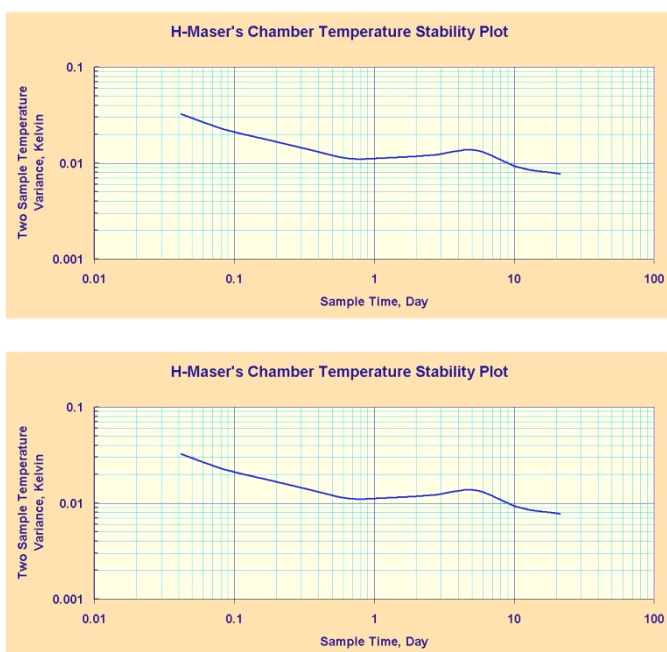
Влажность

- Электроника (утечки).

Хранители времени в кондиционированном помещении с вариацией температуры ≤ 0.1 К и вариацией влажности $\leq 0.1\%$ RH. Помимо них в этом же помещении основная распределительная и измерительная аппаратура.



Рис. 30



Подобные уровни стабильности температуры T и относительной влажности RH абсолютно необходимы, поскольку чувствительность частота /температура существующих H-мазеров $\sim 10-15/K$.

Рис. 31