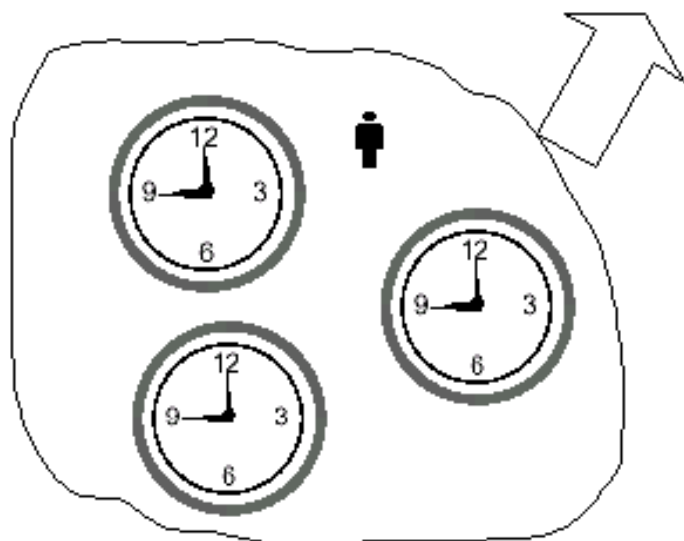


III. Ансамбли часов и шкалы времени ансамблей

Когда речь заходит о формировании надежной и высокоточной шкалы времени, единственных часов недостаточно. О поведении единственного



прибора ничего нельзя сказать, в него можно только верить. Если часов двое, то, сличая их, можно подтвердить определенный уровень характеристик, при допущении, что это приборы одного или близкого уровня точности.

Рис. 8

Кроме того, если в одном из них произойдет изменение, то факт изменения будет зафиксирован, но невозможно локализовать прибор, обязанный этому изменению. Таким образом, минимальное количество часов для формирования шкалы времени – три прибора. Учитывая требования непрерывности формирования шкалы и возможность любых часов время от времени выйти из строя, на практике минимальный ансамбль – это четверо часов.

Дальнейшее расширение ансамбля повышает его надежность и гораздо медленнее, $\sim N^{-1/2}$, его статистические стабильностные характеристики.

Основная проблема при работе с ансамблем часов на основе сличений между этими часами – невозможность определить частоту ансамбля и локализовать внутри него коррелированные изменения характеристик часов.

Этому есть прозрачное объяснение: поскольку измеряемой величиной является не само время, а разность шкал времени, то на ансамбле N часов может быть лишь $N-1$ независимых измерений. То есть ансамбль N часов имеет N степеней свободы, а число измерений $N-1$.

Это принципиальное ограничение может быть преодолено только с помощью внешней опорной системы: первичного/вторичного репера частоты типа Cs/Rb или внешней опорной временной системы, например UTC.

С другой стороны, использование ансамбля часов весьма привлекательно для повышения надежности хранения шкалы времени и снижения неопреде-

ленности u_A единицы времени.

Доступность шкалы времени ансамбля

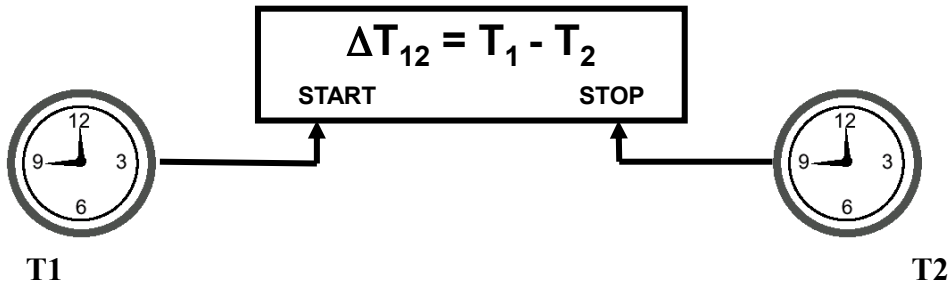


Рис. 9

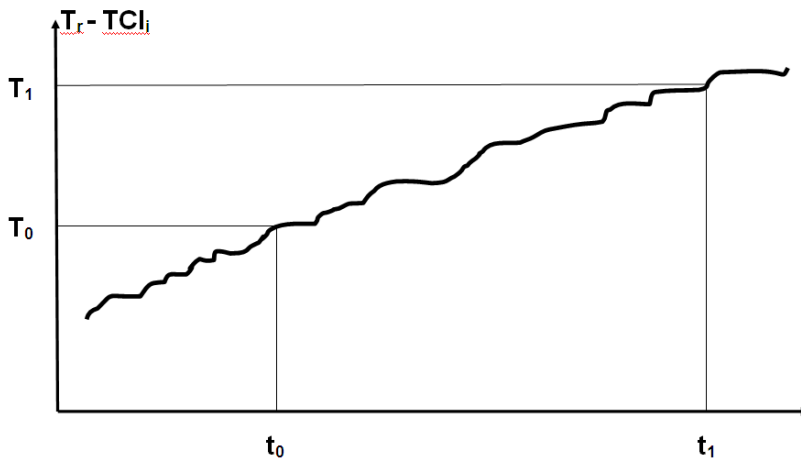
$$T_e = (T_1 + T_2) / 2$$

$$2T_e = T_1 + T_2$$

$$\Delta T_{12} = T_1 - T_2$$

$$T_e = T_1 - \Delta T_{12} / 2$$

$$T_e = T_2 + \Delta T_{12} / 2$$



$$(T_r - Cl_j)_{t_1} = (T_r - Cl_j)_{t_0} - F_j \times (t_1 - t_0)$$

Рис. 10

Поправки на шкалу часов

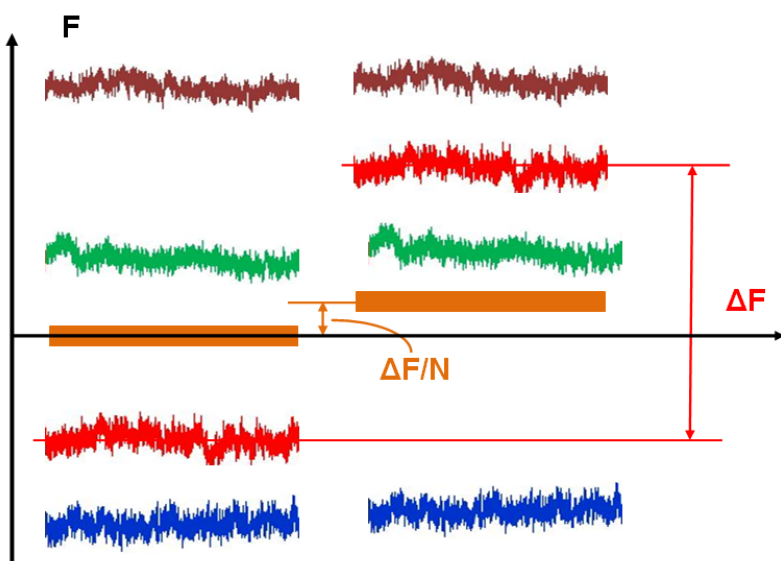


Рис. 11

Смысл использования ансамбля

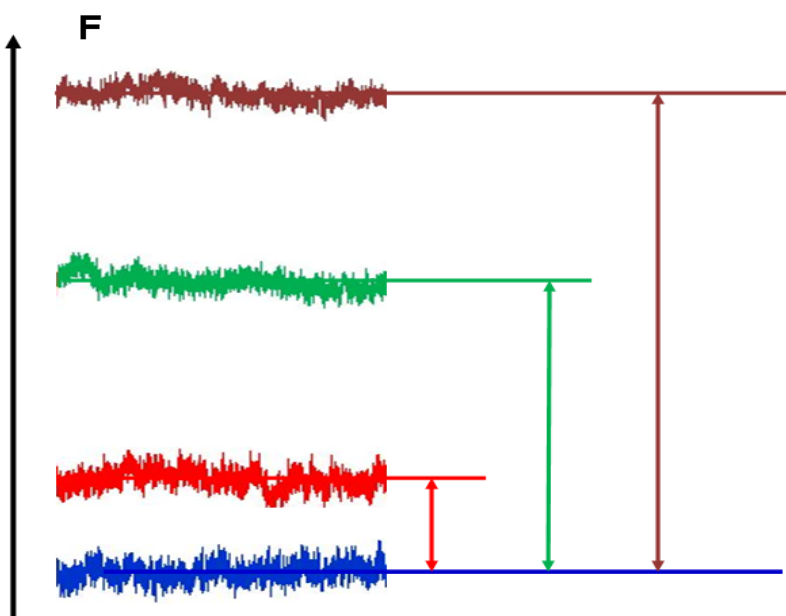
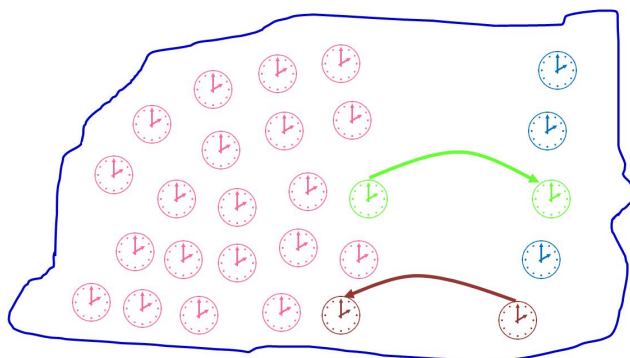


Рис. 12

$$\begin{aligned}
 &C1-C2=A; \quad C1-C3=B; \quad C1-C4=C; \\
 &C1+C2+C3+C4=0; \\
 &C1=(A+B+C)/4; \\
 &C2=(B+C-3A)/4; \\
 &C3=(A+C-3B)/4; \\
 &C4=(A+B-3C)/4.
 \end{aligned}$$



Риз. 13

Простое суммирование частот непродуктивно, поскольку создает неудобства при исключении часов из ансамбля или, наоборот, их включении в ансамбль.

Более выигрышным является формирование ансамбля на основании соответствия текущего значения размера единицы времени часов его прогнозируемому значению.

Решение на «сегодня» производится по ансамблю «вчера», а затем проверяется, нет ли «выскачек». После этого новое решение и анализ. Затем, если есть необходимость, можно переходить к пополнению ансамбля.

$$x_i(t) = T_r(t) - h_i(t) = \sum_{j=1}^N w_j \left[\tilde{h}_j(t) + x_{ij}(t) \right],$$

$$y_i(t) = F_r(t) - f_i(t) = \sum_{j=1}^N w_j \left[\tilde{f}_j(t) + f_{ij}(t) \right].$$

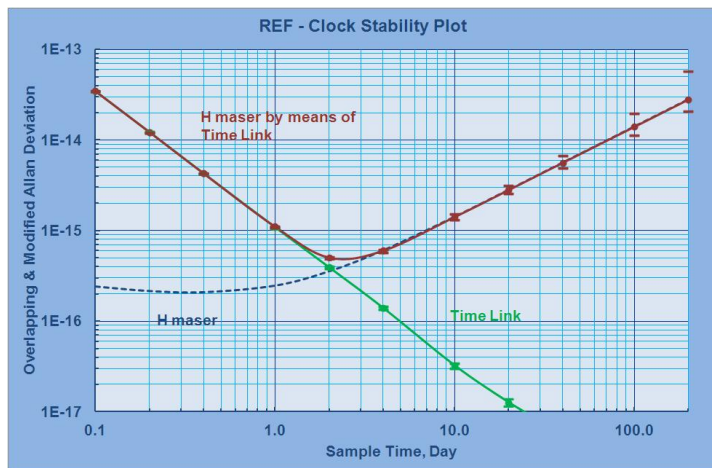


Рис. 14

Оценки модели часов для построения прогноза

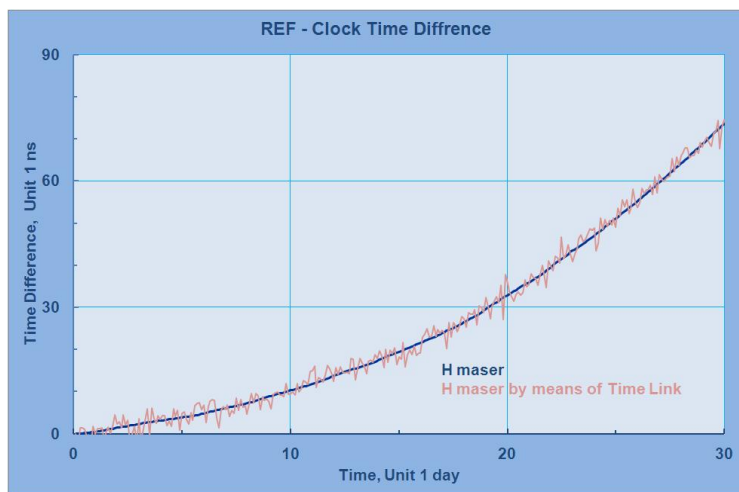


Рис. 15

Даже в случае приличного канала сличений, $\sigma_A \sim 100$ ps/day (TWSTFT), требуется по меньшей мере 5-10 суток для построения внушающего доверия прогноза.

Примеры действия алгоритмов шкал времени ансамблей

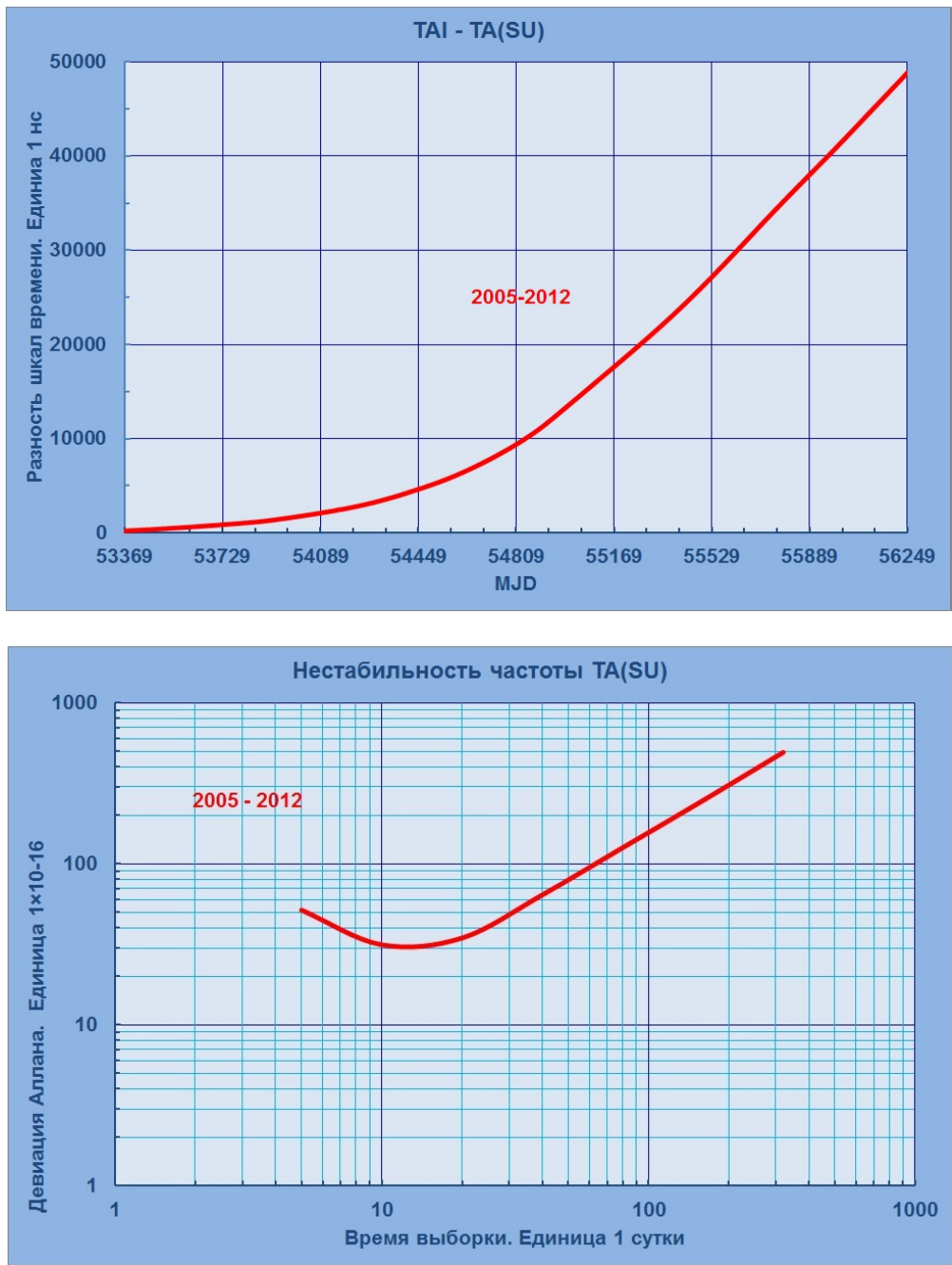


Рис. 16

Свободная атомная шкала времени

Это разность шкал времени TAI – TA(SU) на протяжении 8 лет. В это время TA(SU) представляла собой свободную атомную систему на основе ансамбля Н-мазеров. Прогнозирование поведения часов на месяц вперед велось по результатам сличений Н-мазеров с TA(SU). Никаких иных данных: ни внешних сличений с TAI, ни с МЦР102 ВНИИФТРИ не привлекалось. Как и следовало ожидать, TA(SU) демонстрирует остаточный дрейф, величина которого на основании оценок вариации Аллана $\sim 2 \cdot 10^{-16}$ в сутки.

Основная цель проекта обеспечить нестабильность TA(SU) на уровне $(3-5) \cdot 10^{-15}$ на интервале 10-30 суток, в первую очередь для формирования следящей за UTC шкалы UTC(SU).

Атомная шкала времени с размером единицы времени, согласованным с национальной реализацией секунды СИ

Алгоритм времени определяет, как на основе ансамбля независимых часов с принципиально различными частотами и моментами времени формируется национальная шкала атомного времени TA(SU) с размером единицы времени СИ(SU), независимо задаваемым первичными цезиевыми реперами CsF01(SU) и CsF02(SU), в соответствии с его определением в системе СИ, и опирающаяся на нее следящая за UTC национальная шкала UTC(SU).

Характерными чертами алгоритма времени являются:

- хранение размера единицы времени, воспроизводимого первичными цезиевыми реперами частоты ВНИИФТРИ фонтанного типа, обеспечивается ансамблем непрерывно работающих Н-мазеров;
- размер единицы времени в шкале TA(SU) соответствует СИ(SU), воспроизводимым первичными цезиевыми реперами частоты фонтанного типа CsF01(SU) и CsF02(SU);
- шкала TA(SU) является автономной и независимой;
- интервал прогнозирования хода часов для формирования TA(SU) составляет 1 месяц. Прогноз базируется на отсчетах CsF01/02(SU) – Cl 4038ij на интервале в несколько месяцев (обычно 8-10). Модель прогнозирования первого порядка по частоте.

Во избежание скачков по частоте в случае замены или отсутствия данных CsF01/02(SU) – Cl 4038ij, а также при переходе через окончание месяца в алгоритме предусмотрены специальные меры.

Тестирование алгоритма

Задавались эмулированные «часовые» и Cs данные относительно внешней идеальной опорной системы REF на суточном базисе. Статистические характеристики часовых данных относительно REF соответствовали реальному поведению часов с точки зрения спектрального состава шумов. Что касается модели Cs-REF, то она предполагала белый частотный шум уровня

$$\sigma_y(\tau) = 2 \cdot 10^{-15} / \sqrt{\tau}$$

(τ сутки), который затем выходил на фликкерную полку уровня

$$\sigma_y(\tau) = 3 \cdot 10^{-16}$$

. Современные реальные характеристики, по крайней мере в части белого частотного шума, заметно лучше : $\sigma_y(\tau) = 1 \cdot 10^{-15} / \sqrt{\tau}$.

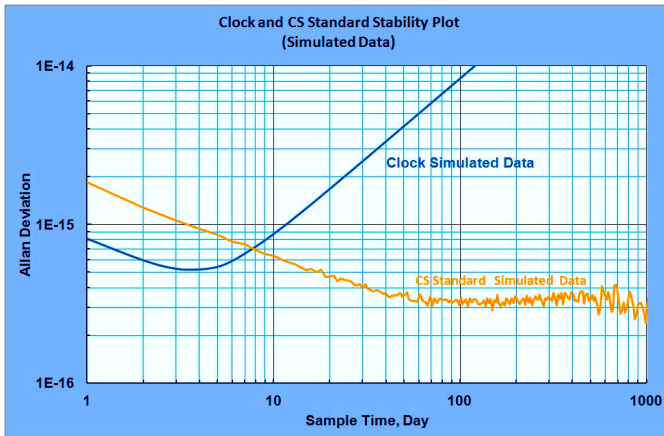


Рис. 17

Результаты тестирования алгоритма

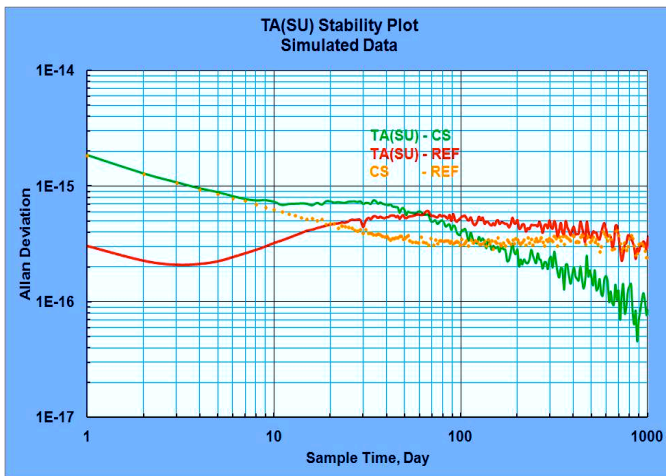


Рис. 18

Поведение нестабильности частоты TA(SU) – REF (красная кривая) полностью укладывается в качественное и количественное ожидание – на интервалах первых суток улучшение нестабильности TA(SU) связано с элементарным статистическим усреднением по ансамблю из 6 часов. Реальное влияние Cs про-

является, как и следовало ожи-

дать, на больших интервалах, когда обнажается подавление дрейфа частоты часов.

Характерный подъем в районе 30 суток связан с постоянной времени алгоритма 1 месяц и является простым следствием теории регулирования. На больших интервалах времени оценки нестабильности TA(SU) относительно REF сливаются с аналогичными для Cs-REF. Ещё более поучительным выглядит поведение зависимости нестабильности частоты разности TA(SU) – Cs (зеленая кривая). На ней четко видно слежение TA(SU) за Cs, что выражается в устойчивом снижении нестабильности разности TA(SU) – Cs на больших интервалах времени до уровня ниже $1 \cdot 10^{-16}$.

Внедрение алгоритма

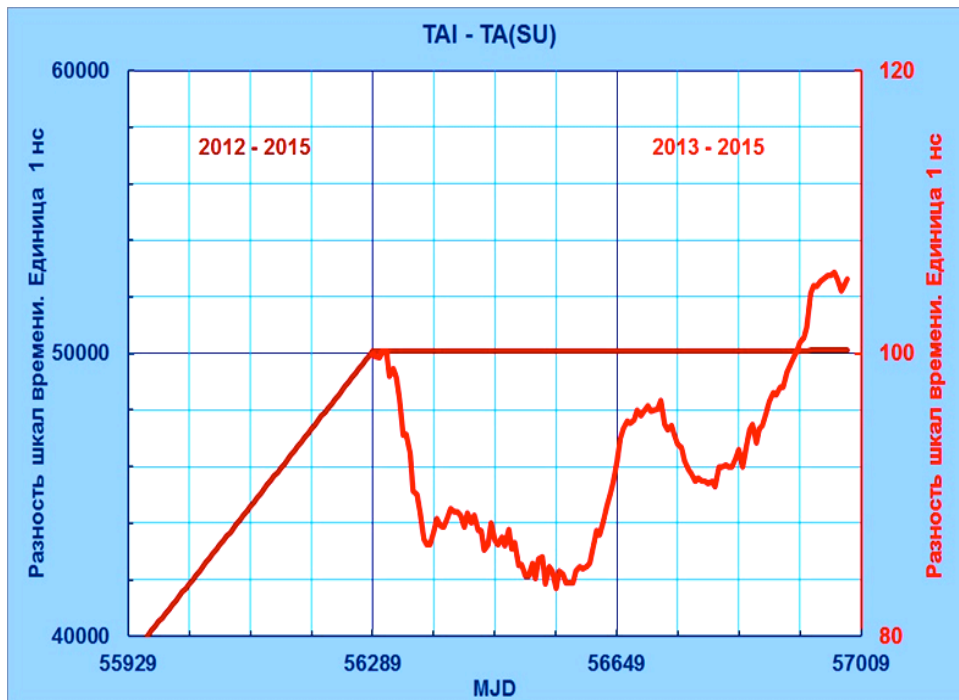


Рис. 19

Федеральное агентство по техническому
регулированию и метрологии
«РОССТАНДАРТ»
ФГУП «ВНИИФТРИ»
ГМЦ ГСВЧ

ISSN 0135-2415

БЮЛЛЕТЕНЬ Г-136

3 НОЯБРЯ 2012 г.

ИЗВЕЩЕНИЕ**Об изменении размера единицы времени в шкале атомного времени TA(SU)**

Главный метрологический центр государственной службы времени и частоты извещает о том, что с целью согласования размера единицы времени в атомной шкале TA(SU) с национальной реализацией единицы времени – секунды СИ, в 00 h UTC 28 декабря 2012 г., MJD 56289, будет произведено изменение размера единицы времени в атомной шкале TA(SU).

При этом $(F(TA(SU)_{нов}) - F(TA(SU)_{стар})) / (F(TA(SU)_{стар})) = 36 \times 10^{-14}$

Размер единицы времени национальной шкалы всемирного координированного времени UTC(SU) изменен не будет.

Никаких изменений по моменту в шкалах UTC(SU) и TA(SU) производится не будет.

Главный метрологический центр РФ

ФГУП «ВНИИФТРИ»
ГМЦ ГСВЧ
гп Менделеево, Солнечногорский р-н,
Московская обл., Россия, 141570
Телефон: (495) 535-93-20
Факс: (495) 744-81-74, (495) 660-17-41
E-mail: nio7@vniiftr.ru

Рис. 20

Успешно завершённые испытания алгоритма и его программной реализации позволили перейти к его практическому внедрению, которое потребовало изменения размера единицы времени в национальной атомной шкале времени TA(SU) для согласования его с размером единицы времени СИ(SU), воспроизводимым первичными цезиевыми реперами ВНИИФТРИ фонтанного типа.

**Результаты работы алгоритма
с реальными данными**

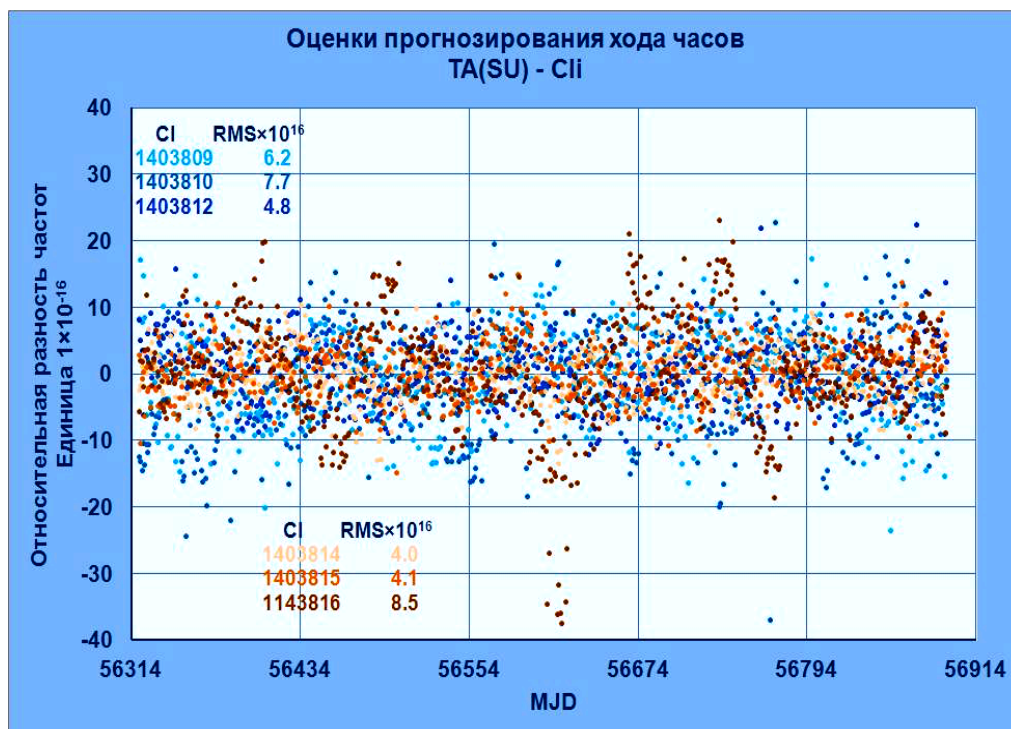


Рис. 21

Измеренные разности между прогнозируемой вперед на интервал 1 месяц частотой часов относительно TA(SU) и её реальным апостериорным значением, характеризуемые средним квадратом разности (RMS), подтверждают обоснованность выбора в алгоритме времени месячного интервала прогнозирования. Полученная на основе величин RMS оценка прогнозируемости ансамбля часов $\leq 3 \cdot 10^{-16}$, в свою очередь, характеризует реальную способность ансамбля часов хранить воспроизведённый цезиевым репером размер СИ(SU). Это довольно высокая величина, но вместе с тем она менее чем в 2 раза отличается от заявленной неопределённости типа u_B для цезиевых реперов частоты ВНИИФТРИ и в случае их дальнейшего совершенствования будет служить препятствием для объективной оценки их метрологических характеристик.

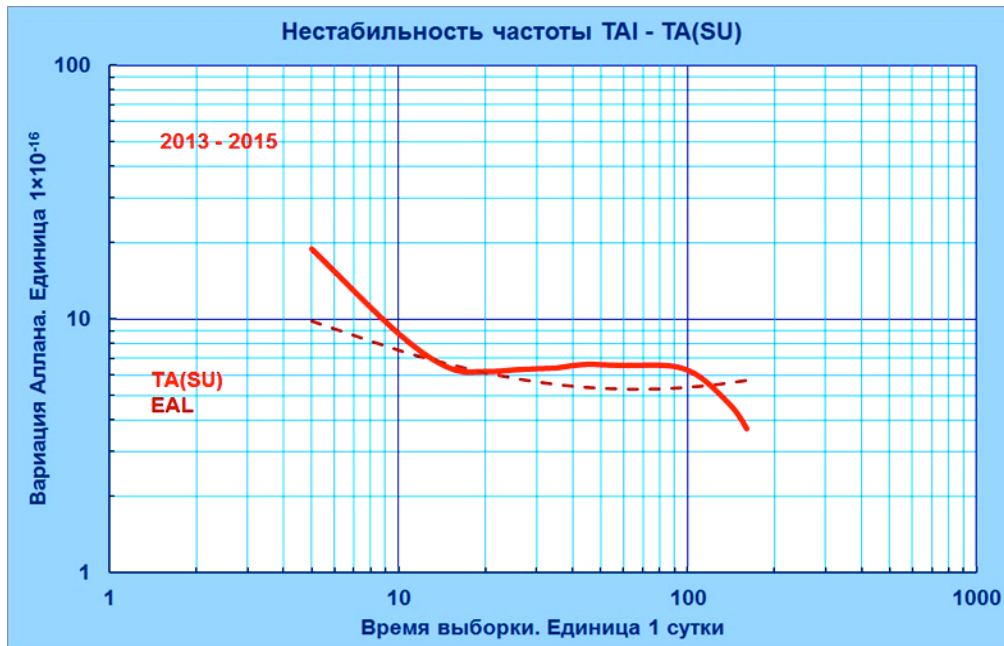


Рис. 22

Анализ нестабильности TA(SU) по отношению к TAI является лучшим доказательством работоспособности предложенного алгоритма. При этом, конечно, необходимо принять во внимание, с одной стороны, шумовые характеристики канала сличений, а с другой, конечную нестабильность TAI, определяемую нестабильностью свободной атомной шкалы EAL.

ALGOS оптимизирован на достижение наиболее высоких результатов по стабильности EAL на интервалах \sim месяца, при этом $\sigma_y(1 \text{ месяц}) = 5.6 \cdot 10^{-16}$ и $\sigma_y(2 \text{ месяца}) = 5.3 \cdot 10^{-16}$.

Оценка нестабильности национальной атомной шкалы TA(SU) относительно TAI на интервале MJD 56289–57019 (2013-2014) после проведения изменения размера единицы времени подтверждает, что работы по аппаратной и алгоритмической модернизации ГЭВЧ восстановили позиции ГЭТ 1-2012 в ряду лучших эталонов мира, с характеристикой нестабильности атомной шкалы, сопоставимой с самой опорной системой.

В завершение приведена разность национальной шкалы Всемирного координированного времени UTC(SU) относительно мировой опорной системы UTC на основании официальных публикаций МБМВ за период MJD 53369–57019 (2005-2014), а также вычисленные оценки среднего квадрата разности этих величин – RMS. Она подчеркивает радикальный прогресс в

формировании национальной шкалы времени Российской Федерации UTC(SU), достигнутый в результате глубокой аппаратной и алгоритмической модернизации ГЭВЧ. Так, по сравнению с 2005 г. степень согласования UTC(SU) с UTC повышена более, чем в 11 раз – 42.3/3.8. UTC(SU) по степени согласования с UTC практически приблизилась к UTC(USNO) – отставание 40 % в 2012-2014.

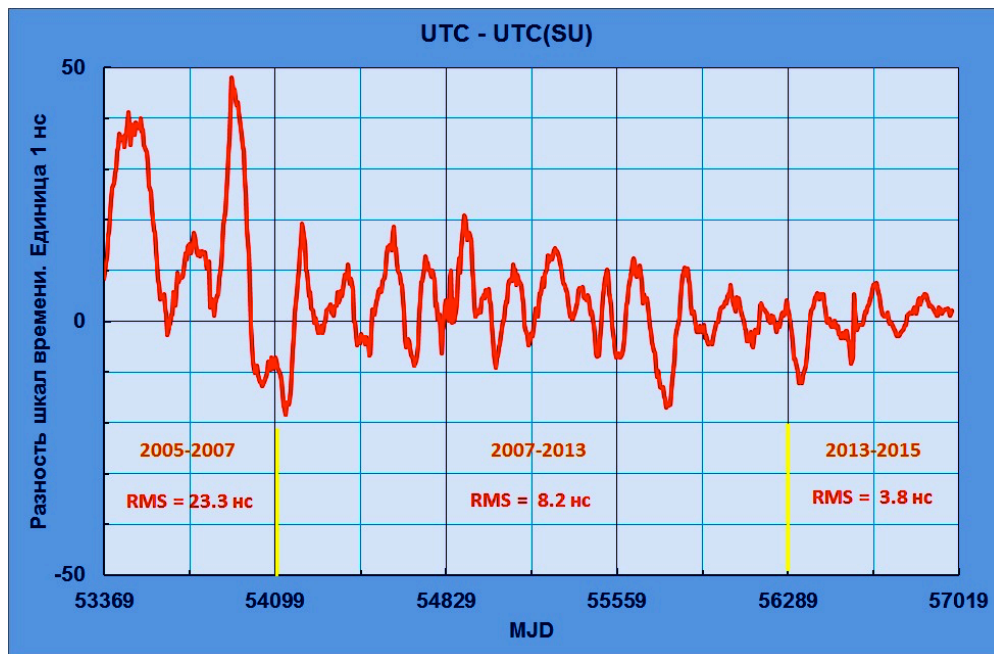


Рис. 23