

Автономный хранитель времени и частоты для астрономических наблюдений

С.Д. Петров¹, И.В. Чекунов², С.С. Смирнов^{1,3}

¹СПбГУ

²МГТУ им Н.Э. Баумана

³ГАО РАН

4 октября 2018 г.

Посвящается памяти
Василия Александровича Вытнова (1927 – 2013)

Временное обеспечение наблюдений

Традиционно временное обеспечение астрономических наблюдений осуществлялось с помощью следующих средств:

- Атомные часы + печатающий хронограф;
- Приемник сигналов точного времени + печатающий хронограф;
- Приемник сигналов точного времени + морской хронометр.

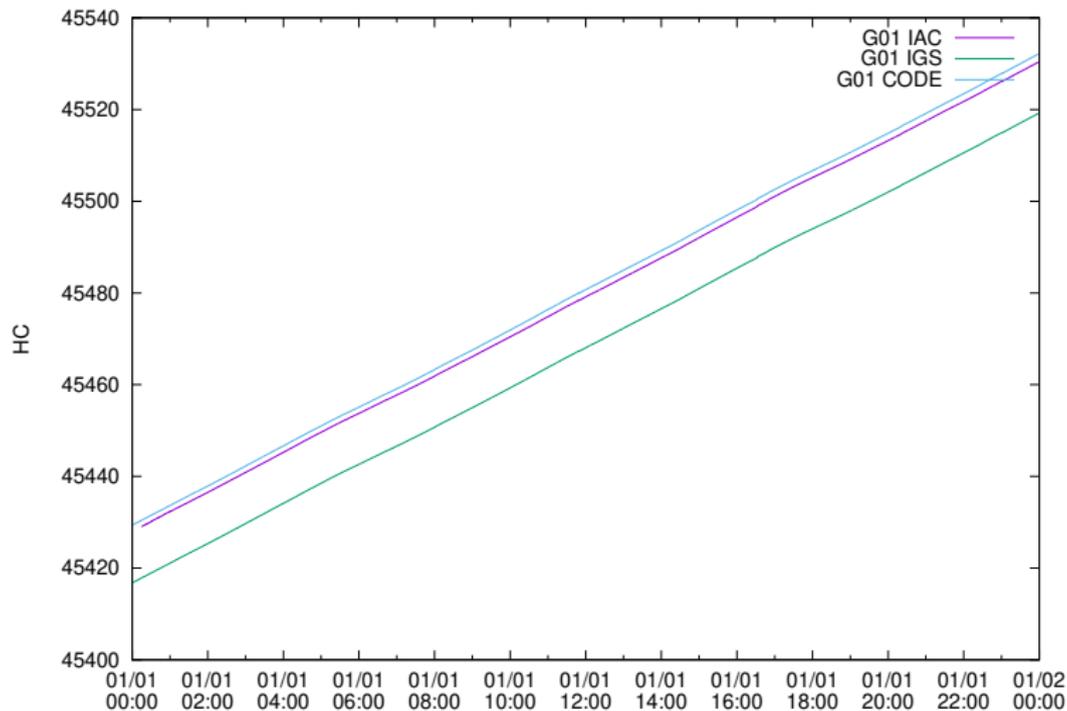
Временное обеспечение современных астрономических наблюдений осуществляется с помощью следующих средств:

- Атомные часы + электронный распределитель;
- GNSS-приемник + контроллер.

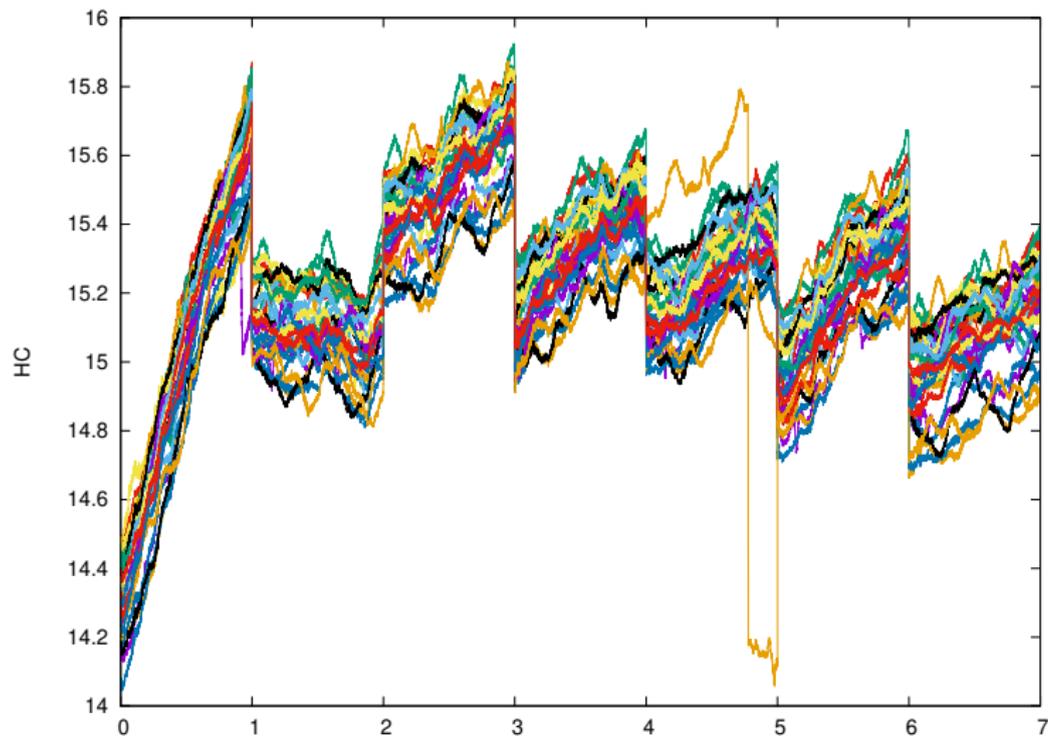
Решение временного обеспечения посредством GNSS-приемника становится стандартом в силу простоты, дешевизны и высокой точности.

- ГЛОНАСС и GPS введены в эксплуатацию в 1995 году.
- Уже в 1991 году имел место первый задокументированный случай подавления GPS-сигналов (“Буря в пустыне”).
- В 2002 году зафиксированы прецеденты подавления сигналов ГЛОНАСС в Санкт-Петербурге.
- В 2005 году задокументирован первый случай спуфинга GPS-сигналов.
- В 2011 году задокументированы случаи “увода” БПЛА посредством GPS-спуфинга.
- С 2014 года оборудование для спуфинга ГНСС-сигналов доступно на Ebay от \$3000.
- С 2015 года имеет место массовый спуфинг ГНСС-сигналов в центрах мегаполисов.
- В 2017 из-за спуфинга сорваны наблюдения летней практики СПбГУ.
- В 2018 году зафиксирована попытка “увода” БПЛА в Новгородской области.

Бортовые часы НКА

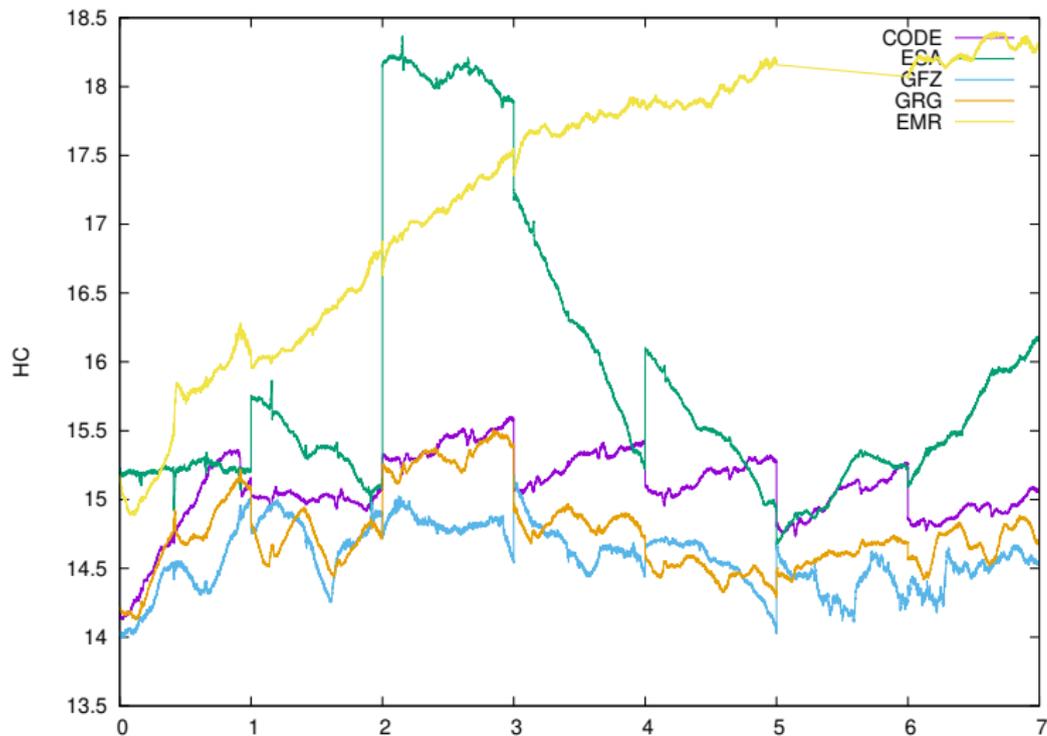


Поправки бортовых часов для спутника G01
(01.01.2018).



Разности поправок бортовых часов CODE-IGS
(GPS-неделя 1983).

Бортовые часы НКА



Разности поправок бортовых часов для спутника G01
(GPS-неделя 1983).

Требования к хранителю времени и частоты

- Автономность хранения времени и опорной частоты с возможностью сличений;
- компактные размеры и низкое энергопотребление;
- низкая стоимость, высокая технологичность и доступность компонент;
- высокая степень физической защиты, устойчивость к механическим и электро-магнитным воздействиям;
- высокая надежность.

Рубидиевый стандарт FE-5680A;
производство Frequency Electronics, Inc. (США);
внесен в Государственный реестр средств измерений;
официальный представитель ОАО "Морион";
стабильность $1,4 \times 10^{-11}$ / сутки, 2×10^{-9} / год;
габариты $25 \times 88 \times 125$ мм;
пиковое энергопотребление 32 Вт.

Рубидиевый стандарт FE-5680A



- Три рубидиевых стандарта FE-5680A;
- вычислительный модуль Raspberry Pi, штатно МЦСТ Эльбрус;
- ГНСС-приемник Trimble Condor, штатно K-161;
- компоненты питания и сопряжения, датчики;

Пиковое энергопотребление 110 Вт, в рабочем режиме 45 Вт. Исключение нагревательных элементов схем температурной компенсации хода рубидиевых стандартов FE-5680A позволит снизить рабочее энергопотребление до 25 Вт.

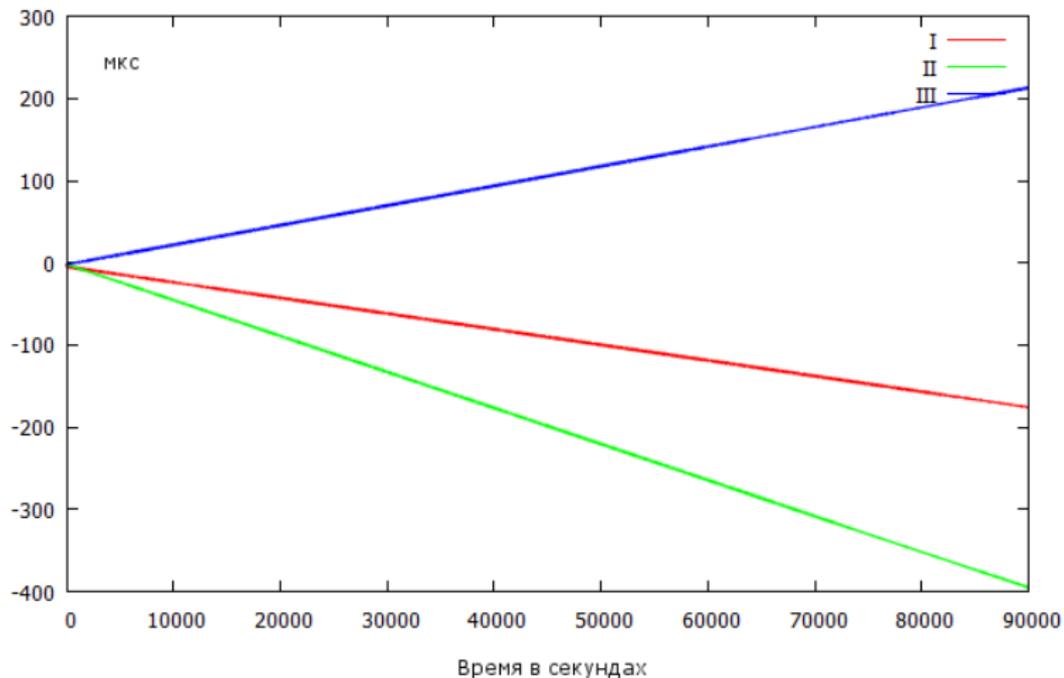
Схема функционирования группового стандарта времени и частоты

- Рабочей шкалой времени (РШВ) устройства служат системные часы вычислительного модуля;
- моменты положительных импульсов секундных меандров с трех генераторов фиксируются относительно РШВ с разрешением 1 нс, как поправки генераторов;
- поправка каждого генератора преобразуется согласно математической модели генератора (ММГ);
- поправки индивидуальных генераторов осредняются и формируется точная шкала времени (ТШВ) в формате поправки ТШВ – РШВ.

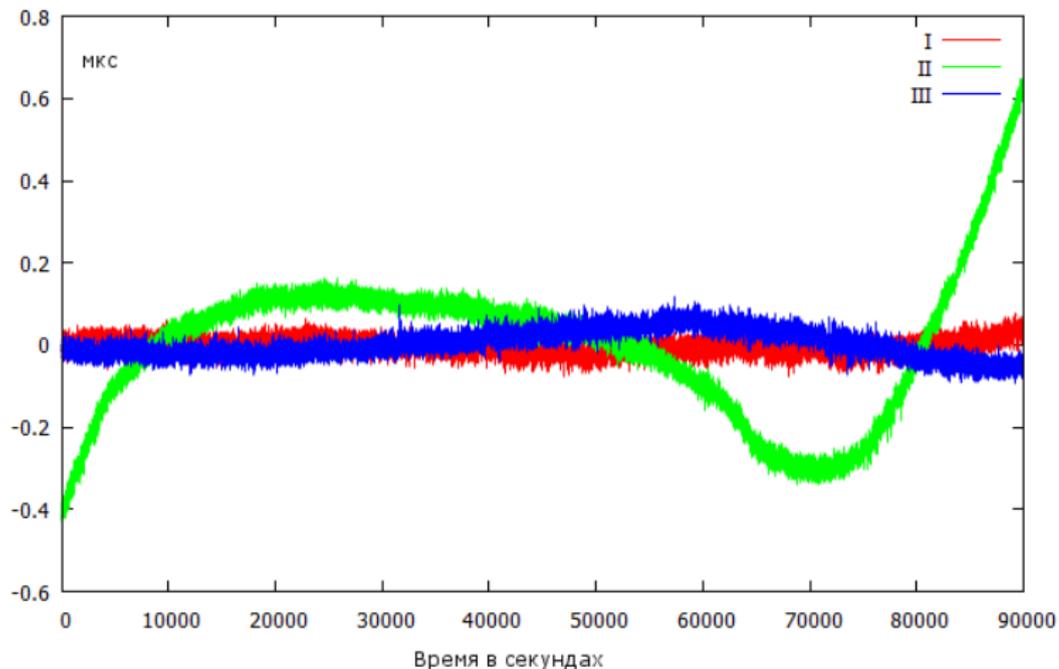
- 1 Учет сдвига и линейного дрейфа частоты;
- 2 учет температуры окружающего воздуха посредством регрессионной модели;
- 3 фильтрация хода генератора посредством фильтра Стратоновича на основе расчетной структурной функции хода генератора.

Параметры всех трех моделей оцениваются в результате тестовых измерений. В качестве опорной используется шкала времени ГНСС-модуля.

Ход генераторов за сутки



Остаточные вариации генераторов за сутки



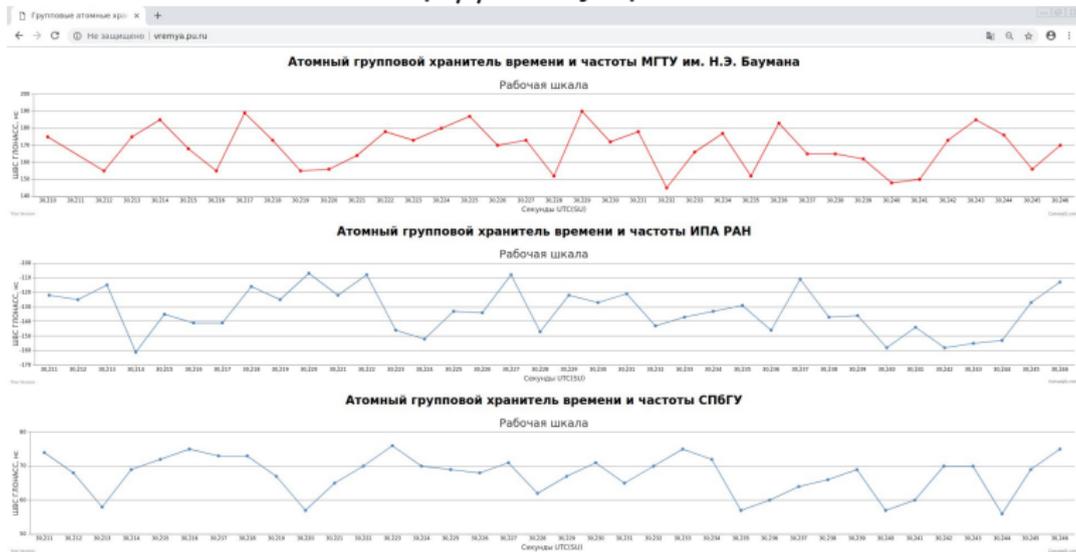
Редукция поправок генератора на суточном интервале

Эффект	Поправка
Сдвиг частоты	5000 нс
Дрейф частоты	3000 нс
Температура $\pm 5^\circ$	1500 нс
Фильтр	500 нс
Осреднение	100 нс

Итоговая суточная стабильность 5×10^{-13} .

- Реализован макет хранителя времени и частоты, массой не более 3 кг, объемом не более двух куб.дм;
- за счет программной обработки поправок достигнута суточная стабильность выходной шкалы на порядок лучше, чем у индивидуальных генераторов, на уровне 5×10^{-13} ;
- дальнейшее развитие математической модели позволит повышать стабильность;
- стоимость при условии приобретения компонент на вторичном рынке составляет около 50000 руб.

<http://vremya.pu.ru>



Спасибо за внимание!

