

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

А.Н. ЗИНОВЬЕВ

11

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДВУХ БОРТОВЫХ ВОДОРОДНЫХ
СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ ТИПА VCH-1010
ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН»
В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

МОСКВА 2009

Аннотация.

Представлены результаты исследования характеристик и особенностей работы в лабораторных условиях двух бортовых водородных стандартов частоты (БВСЧ) активного типа с естественным внешним вакуумным контуром (для работы в условиях открытого космоса).

Оценены результаты измерений текущих значений дрейфа частот выходных сигналов, измерения относительной нестабильности частоты и измерения относительной разности частот между выходными сигналами бортовых водородных стандартов. Измерения выполнены с использованием реальных опорных сигналов глобальных систем координированного времени: отечественной - ГЛОНАСС и американской - GPS.

Установлена зависимость относительной расстройки БВСЧ от изменения давления во внешнем вакуумном контуре при контролируемом температурном режиме опорных оснований.

СОДЕРЖАНИЕ.

1. Перечень обозначений и сокращений	4
2. Введение	5
3. Цель, задачи и объекты исследований	6
4. Методы и инструменты исследований	9
4.1. Измерение дрейфа значения частоты и значения уровня фазовых шумов	9
4.2. Определение относительной разности частот между выходными сигналами БВСЧ и сигналами глобальных систем координированного времени.....	16
5. Результаты исследований	19
5.1. Результаты измерений дрейфа значения частоты и значения уровня фазовых шумов	19
5.2. Результаты измерений относительной разности частот между выходными сигналами БВСЧ и сигналами глобальных систем координированного времени.....	23
6. Выводы по результатам исследований	25
7. Литература	26

1. Перечень обозначений и сокращений.

ВСЧ	Водородный стандарт частоты
БВСЧ	Бортовой водородный стандарт частоты
ДЗЧ	Действительное значение частоты
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
GPS	Global Positioning System (Глобальная система позиционирования)
БКНА	Бортовой комплекс научной аппаратуры
ДрЗЧ	Дрейф значения частоты
КИА	Контрольно-измерительная аппаратура
БКНА	Бортовой комплекс научной аппаратуры
РСДБ	Радиоинтерферометр со сверхдлинной базой
КВГ	Квантовый водородный генератор
КРТ	Космический радиотелескоп
ЦЗО	Цифровой запоминающий осциллограф
VCH-1010_004	Первый бортовой водородный стандарт частоты
VCH-1010_005	Второй бортовой водородный стандарт частоты
VCH-1005	Образцовый наземный водородный стандарт частоты
ОРЧ	Относительная разность частот

2. ВВЕДЕНИЕ.

Все современные радиотелескопы, участвующие в глобальных (как наземных, так и космических) наблюдениях космических радиоисточников, используют водородные стандарты частоты (ВСЧ). Необходимость использования ВСЧ обусловлена высокими требованиями к стабильности выходного сигнала ВСЧ во время наблюдений для обеспечения длительного интервала времени когерентного накопления. В цепи принимаемых радиотелескопами радиосигналов имеется ряд синхронизируемых потребителей, которых необходимо обеспечить выходным сигналом ВСЧ:

- формирователи сетки гетеродинных и тактовых частот радиоприемного тракта радиотелескопа;
- формирователь сигналов местной (локальной) шкалы времени;
- формирователи сигналов для средств регистрации данных радиоастрономических наблюдений и для средств радиотехнических измерений;

Основная задача космического радиотелескопа проекта “РАДИОАСТРОН” состоит в обеспечении функционирования орбитального плеча радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ). Одной из целей РСДБ является изучение строения небесных источников с малыми угловыми размерами, излучающих в радиодиапазоне. Возможности улучшения разрешающей способности интерферометра состоят, с одной стороны, в использовании приемников более высоких частот, а с другой стороны, в разнесении антенн на большие расстояния (базы). При работе радиотелескопов интерферометра в сантиметровом диапазоне (в частности при $\lambda = 1.35\text{см}$) для повышения чувствительности интерферометра и, следовательно, для обеспечения длительного времени когерентного накопления информации о принятом сигнале, необходима высокая стабильность частот опорных генераторов. Отмеченные условия необходимо соблюдать как на Земле, так и в открытом космосе. По указанным причинам космический радиотелескоп оснащается высокостабильными источниками опорного сигнала - бортовыми водородным стандартом частоты (БВСЧ). Сложные эксплуатационные условия накладывают серьезные технические требования по подготовке к полету, включающей длительный вход приборов БВСЧ в стационарный режим. Под термином “стационарный режим” в настоящей работе понимается такое состояние исследуемого объекта, при котором изменение исследуемых характеристик объекта остается постоянным (в рамках допуска ТУ на объект). Наблюдениям за изменением характеристик приборов БВСЧ при входе в стационарный режим и посвящены настоящие исследования.

3. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В ходе проверки бортового комплекса научной аппаратуры (БКНА) по проекту “Радиоастрон” осуществлялась также проверка совместной работы оборудования БКНА с бортовыми водородными стандартами частоты (БВЧС). По рекомендации производителя стандартов ЗАО “Время-Ч” были проведены пробные включения стандартов в имитационном режиме. Имитация заключалась в замене естественного внешнего вакуума открытого космоса вакуумом, создаваемым вспомогательной турбомолекулярной насосной станцией. Рекомендации изготовителя дали основания для технологической наработки ресурса с целью выяснения реальных технических характеристик обоих бортовых стандартов.

Цель исследования: Оценка текущих значений важнейших характеристик двух приборов БВСЧ.

Поскольку подготовка к исследованиям заняла более месяца после включения БВСЧ в рабочий режим, сами исследования начались в сентябре 2008 года. Исследования непрерывно проводились по 25 декабря 2008 года.

Как показало дальнейшее развитие событий, цель была поставлена очень своевременно, так как по результатам исследований одному из приборов потребовалась перенастройка на заводе изготовителя.

Итак, в процессе исследований решались две задачи.

Задача 1. Определение реальных параметров БВСЧ в стационарных условиях :

- а) дрейф значения частоты выходного сигнала;
- б) значение уровня фазовых шумов (по двухвыборочной вариации Аллана);
- в) соответствие показаний телеметрических систем действительным состояниям выходных сигналов приборов БВСЧ.

Задача 2. Определение относительной разности частот между выходными сигналами БВСЧ и сигналами глобальных систем координированного времени. (непосредственно с выходными сигналами от GPS-ГЛОНАСС приемников)

Вторая задача является смежной по отношению к первой и служит повышению достоверности результатов измерений, получаемых в процессе исследований.

На рисунке 1 показаны два БВСЧ типа VCH-1010 з/н 004 и 005, укомплектованные оригинальной контрольно-измерительной аппаратурой (КИА) на основе портативных компьютеров. Комплекс оснащен вспомогательной турбомолекулярной насосной станцией, имитирующей вакуум открытого космоса во внешнем контуре обоих БВСЧ.



Рис.1. Объекты исследований

Структурная схема БВСЧ космического радиотелескопа (КРТ) представлена на рисунке 2 [1]. Конструктивно БВСЧ КРТ относится к водородным стандартам частоты активного типа. Принцип действия активного стандарта частоты основан на фазовой синхронизации сигнала кварцевого генератора по сигналу, генерируемому квантовым водородным генератором (КВГ). В КВГ осуществляется генерация высокостабильного сигнала с частотой 1420.4 МГц и мощностью около 10^{-13} Вт. Эта генерация происходит при переходе электрона между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода. С выхода КВГ высокостабильный сигнал поступает на усилитель и преобразователь частоты 1420.4 МГц в сигнал частоты 0.405 МГц. Преобразование выполняется в два этапа с первой гетеродинной частотой 1400 МГц и второй гетеродинной частотой 20 МГц. Далее, преобразованный сигнал 0.405 МГц поступает на первый вход фазового детектора. На второй вход фазового детектора поступает сигнал с синтезатора частоты 0.405 МГц подключенного, в свою очередь, к выходу кварцевого генератора 5 МГц. Сигнал с выхода фазового детектора управляет частотой кварцевого генератора, осуществляя автоматическое слежение (автоподстройку) за

1420 МГц

КВАНТОВЫЙ ВОДОРОДНЫЙ ГЕНЕРАТОР (КВГ)

Преобразователь частоты 1420-0.4 МГц

Фазовый Детектор

Синтезатор частоты 0,4 МГц

Блок питания КВГ

Умножитель частоты

Кварцевый Генератор

5 МГц

15 МГц

1 Гц

Блок цифровых термостатов

Блок управления и телеметрии

Блок ключей питания

-27В

УКС и ФК

ИЦМ

1400 МГц

Рис 2.

- собственно квантового водородного генератора (КВГ) ,
- формирующего на выходе гармонический сигнал частотой 1420,405 МГц малой мощности (10^{-13} Вт),
- преобразователь частоты 1420->0.4 МГц,
- фазовый детектор,
- управляемый по фазе кварцевый генератор 5 МГц,
- синтезатор частоты 0.4 МГц,
- умножитель частоты 5 МГц * 100 * 14 = 1400 МГц,
- блока питания КВГ,
- блока цифровых термостатов,
- блока управления и телеметрии.

8

4. МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

4.1. Измерение дрейфа значения частоты и значения уровня фазовых шумов

Поскольку первая задача исследований состояла в определении реальных значений ключевых параметров обоих БВСЧ, выбор методов сопоставления сигналов был сделан в пользу цифровых методов сравнения. Разработчиками БВСЧ был рекомендован метод с использованием частотного компаратора VCH-314. Принцип работы компаратора основан на сопоставлении информации о разности фаз двух оцифрованных сигналов, полученных из измеряемых сигналов. Компаратор VCH-314 может работать в режиме трех наблюдаемых сигналов (метод трех генераторов) и в режиме с двумя наблюдаемыми сигналами с подавлением собственных шумов компаратора [2].

Измерения дрейфа значения частоты (ДрЗЧ) выходных сигналов БВСЧ и значения уровня фазовых шумов $\sigma_y(\tau)$ (вариация Аллана) выполнялись ежедневно в период с 25 сентября 2008 года по 25 декабря 2008 года. Для расчета вариации $\sigma_y(\tau)$ использовалось соотношение, представленное на рисунке 3.

Двухвыборочные оценки среднеквадратического отклонения для пар сигналов

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} [Y_{i+2} - 2Y_{i+1} + Y_i]^2, \text{ где}$$

Y_i – Элементы массива результатов измерений разности фаз между выходным сигналом опорного ВЧ и выходным сигналом исследуемого ВЧС.
 τ – интервал времени между соседними измерениями.

Рис. 3

Соотношение представляет собой статистическую оценку значения уровня фазовых шумов $\sigma_y(\tau)$ для двухвыборочной вариации Аллана [3].

Схема измерений с использованием компаратора VCH-314 представлена на рисунке 4. В качестве устройства управления частотным компаратором использовался один из портативных компьютеров КИА БВСЧ.

Изображенная на рисунке 4 схема измерений иллюстрирует режим измерений частотного компаратора по методу трех генераторов. Результаты одного из сеансов измерений, отображаемые на экране компьютера частотного компаратора, представлены на рисунке 5.

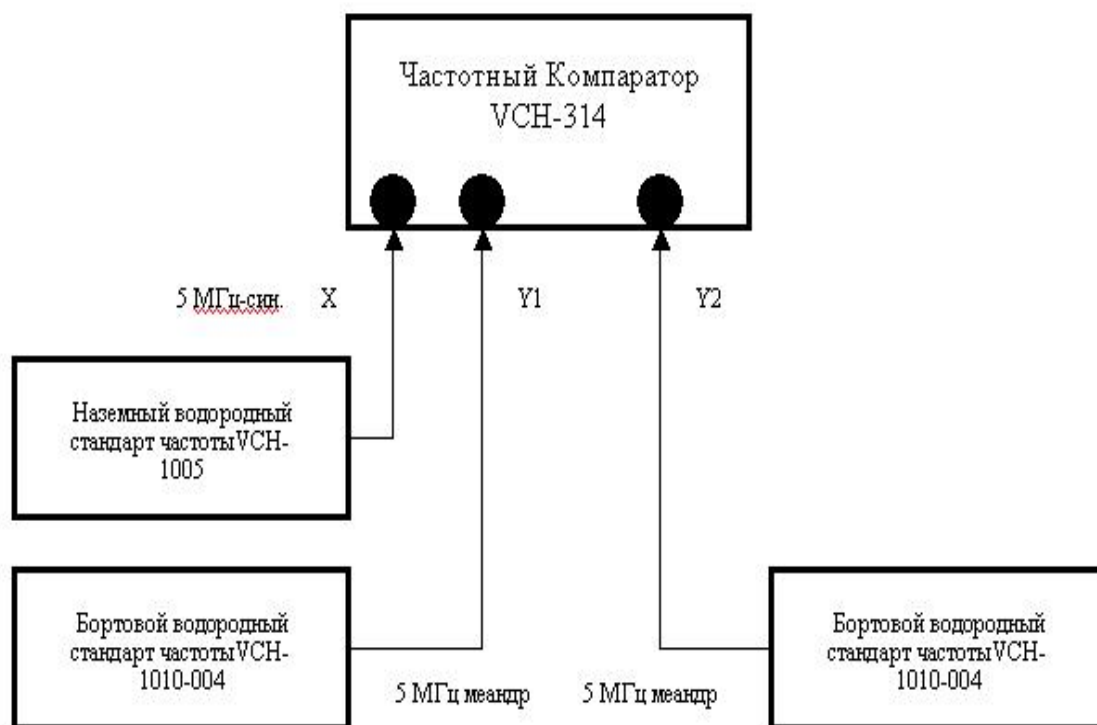


Рис. 4. Схема подключения частотного компаратора VCH314.

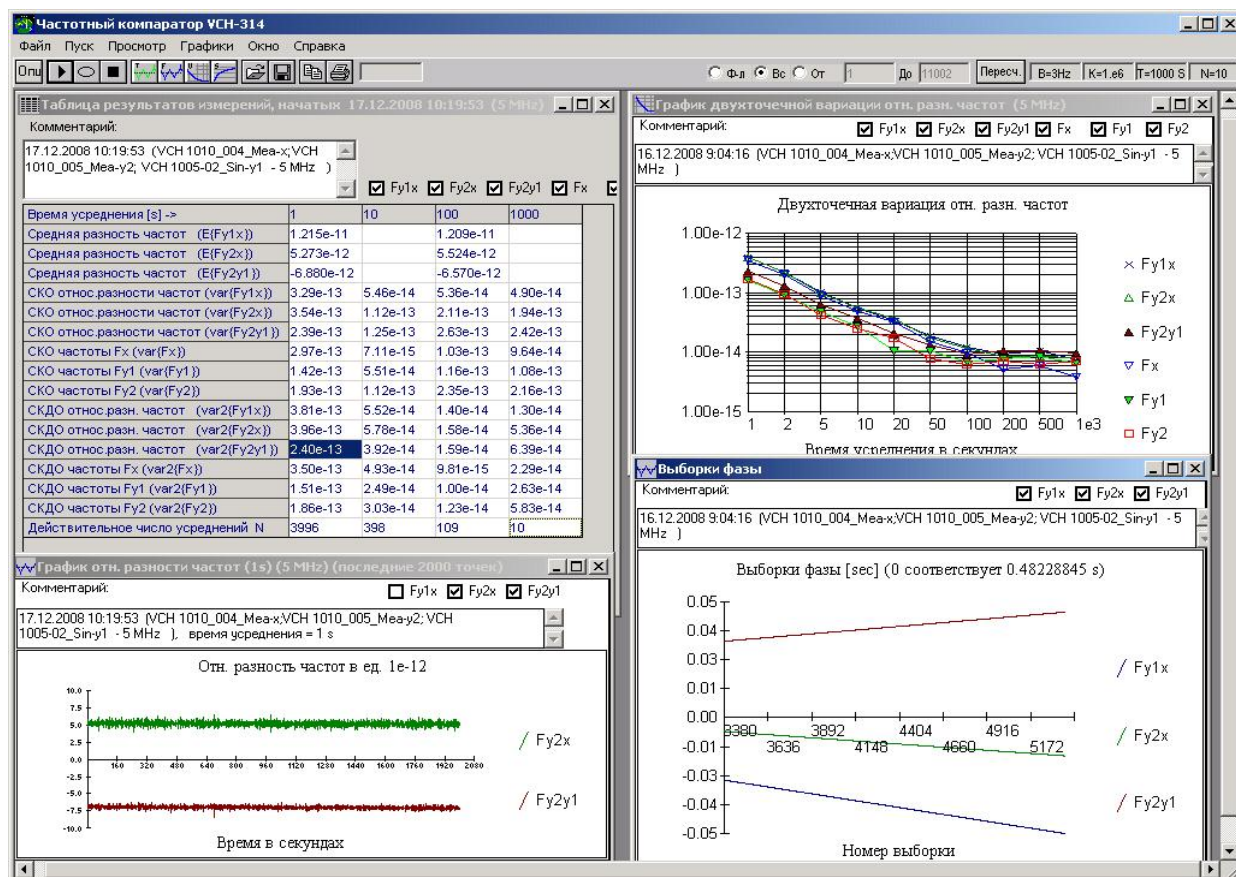


Рис. 5. Панели управления и индикации частотного компаратора VCH314.

Применяемый компаратор, как средство измерений, имеет один существенный недостаток в виде недостаточной помехоустойчивости, существенно снижающей точность измерений при длительных сеансах наблюдений. Последнее обстоятельство касается промышленных помех (в особенности помех от сети 50 Гц).

Таким образом, возникла необходимость в дублирующем надежном способе измерений, позволяющим вести непрерывные наблюдения за выходными сигналами водородных стандартов непрерывно в течение четырех месяцев, с возможностью сегментарной обработки результатов. Кроме того, в процессе исследований возникла сложность, связанная с невозможностью непрерывного доступа к выходным сигналам 5 МГц БВСЧ из-за смежных испытаний БКНА КРТ. Свободный доступ был возможен только к выходам 15 МГц и 1 Гц БВСЧ.

Поскольку частотный компаратор VCH-314 не имеет режима работы с сигналами 15 МГц, то для непрерывного контроля и измерений использовался цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО) WR44Xi. На заключительном этапе измерения были проведены и с сигналами 5 МГц.

Повышение надежности получаемых результатов измерений было достигнуто путем проведения параллельных измерений $Dp3Ч$ и $\sigma_y(\tau)$ с использованием цифрового запоминающего осциллографа LeCroy WR44Xi, оснащенного специальной авторской измерительной программой-регистратором.

В обоих способах измерений был реализован метод трех генераторов выходных сигналов трех водородных стандартов частоты: двух бортовых типа VCH-1010 и одного стационарного типа VCH-1005(2003 г/в.). Последний стандарт играл роль опорного источника сигнала. Основным инструментом исследований служил комплекс радиоизмерительной аппаратуры в составе:

- частотного компаратора типа VCH-314 (первый способ),
- цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) типа WR44Xi (второй способ),
- двух мультиметров типа UT-70C1 и UT-70D1.

Схема измерений с использованием ЦЗО представлена на рисунке 6. Как видно из схемы на рисунке 6, ЦЗО выполнял две функции одновременно. Первая заключалась в обеспечении 6-ти канальных фазовых измерений с регистрацией и накоплением результатов. Вторая функция состояла в управлении потоками данных от двух мультиметров-термометров.

Первая функция ЦЗО обеспечивалась как встроенными аппаратно-программными средствами (рисунок 7), так и специальным дополнительным программным обеспечением для регистрации результатов измерений (рисунок 8).

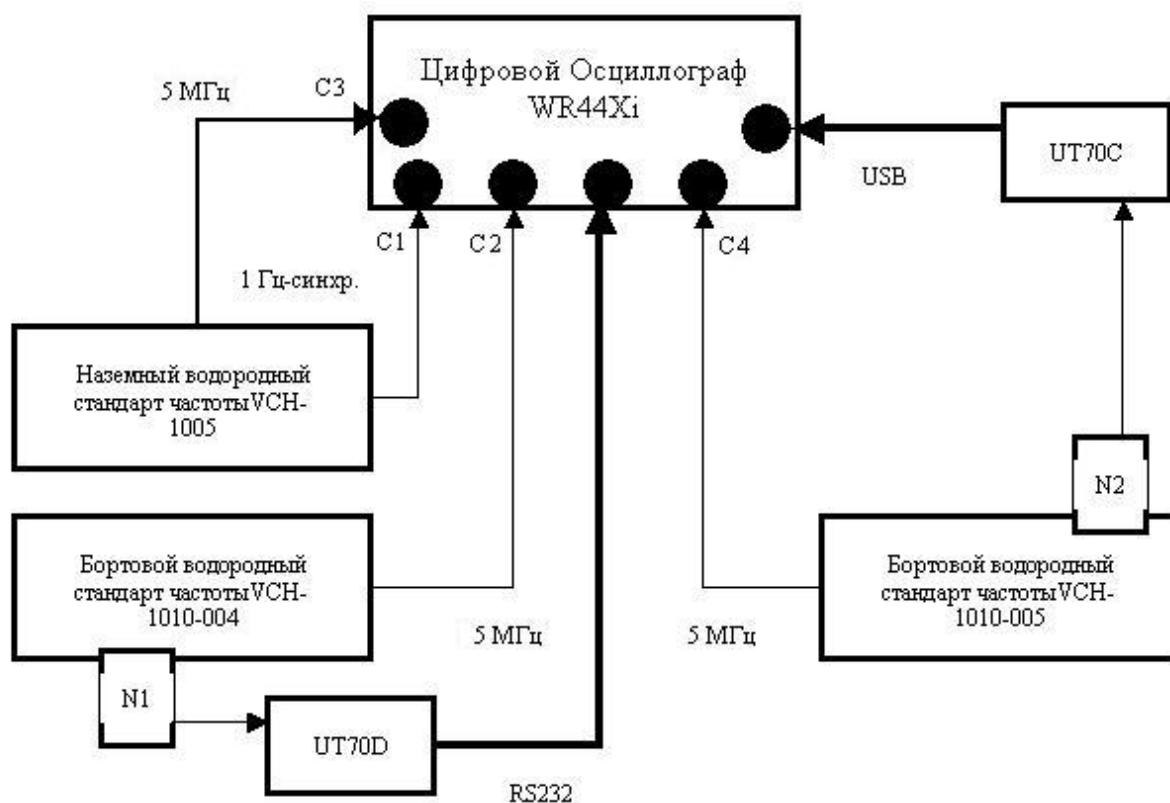


Рис. 6. Схема измерений ДрЗЧ, $\sigma_{\tau}(\tau)$ и температуры с использованием ЦЗО.

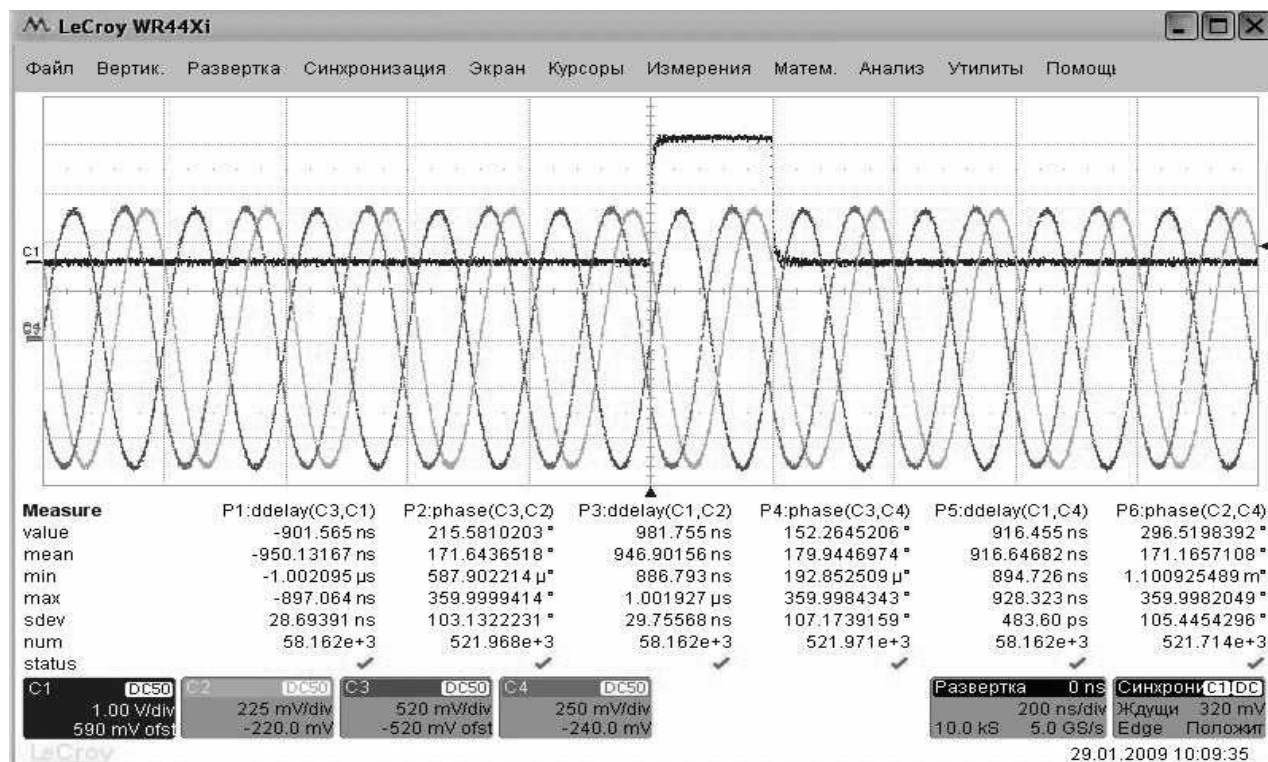


Рис.7. Осциллограмма , иллюстрирующая метод трех генераторов.

В верхней части рисунка 7 изображен импульсный сигнал секундной метки, который выполнял стартовую функцию для одного шестиканального измерения.

В средней части рисунка 7 представлены осциллограммы опорного сигнала (вход С3) и исследуемых сигналов (входы С2 и С4). В нижней половине рисунка 7 расположены шесть колонок, каждая из которых соответствует одному из шести измерителей разности фаз и взаимных задержек исследуемых сигналов. Все результаты измерений регистрируются специальной программой регистратором, встроенной в ЦЗО. Рабочая панель программы регистратора представлена на рисунке 8. В нижней части рабочей панели расположена таблица текущих регистрируемых измерений. Колонки таблицы полностью повторяют элементы верхней строки шести измерителей разности фаз. Колонка А регистрирует момент времени выполнения синхронных измерений с разрешением 1нС и шагом в 1 секунду. Данные в колонке С соответствуют результатам измерений разности фаз Р2 между сигналами на входах ЦЗО С3 и С2. Согласно схеме (рис. 6.) на вход С3 ЦЗО подключен сигнал 5 МГц ВСЧ типа VCH-1005_02 (образцовый опорный генератор). Аналогично, на вход С2 подключен выход сигнала 5 МГц БВСЧ типа VCH-1010_004. Таким образом таблица цифр на панели (рис.8.) содержит результаты ежесекундных измерений разности фаз всех шести измерителей с сохранением единиц измерений (см. рис.7.).

	A	B	C	D	E
1	28284308234046.2406	33.8024155204017	-48.9812369110545	9.79391999671599E-07	7.52325327238944E-C
2	28284308334037.3288	34.5794791631104	-47.9627529904874	9.79387323803389E-07	7.52792200495003E-C
3	28284308434030.4006	33.8873132179172	-49.0035781883004	9.7938788193298E-07	7.49030130302607E-C
4	28284308534021.8799	34.051175488378	-48.9353299596945	9.79402912105417E-07	7.53922342342793E-C
5	28284308634014.0857	35.4336221029954	-47.2607370775136	9.79354352068548E-07	7.48433926148404E-C
6	28284308734005.5091	34.1258711875836	-48.892385790902	9.79143225109251E-07	7.52643922979382E-C
7	28284308833997.6869	34.6347492395923	-47.9103663947347	9.79259453497982E-07	7.52761762894957E-C
8	28284308933989.278	35.4803188680703	-46.378498869495	9.7926652726461E-07	7.56007752129585E-C
9	28284309033981.0926	34.2465659411009	-47.9358413380533	9.79268760354223E-07	7.53762079988689E-C
10	28284309133972.9631	35.3341812486529	-46.9062766281993	9.79396148350111E-07	7.51254131420072E-C
11	28284309233964.7777	34.9121053234839	-48.3634743155476	9.79181933918295E-07	7.52248246199961E-C
12	28284309333957.0114	34.3449633138421	-47.7529584751985	9.79246771584306E-07	7.55269051861024E-C
13	28284309433948.7142	34.2312678295161	-47.9410579423386	9.79413027703245E-07	7.58792113194675E-C
14	28284309533940.6126	33.6636539416000	-48.4074912329955	9.79112367246944E-07	7.60788931713119E-C

Рис.8. Панель управления программы “Экспортер-Регистратор”.

Программа “Экспортер-Регистратор” обеспечивает запись результатов измерений на внутренний накопитель ЦЗО в формате совместимом со средствами обработки данных [4,5,6,7].

Метод трех генераторов иллюстрируется в нижней части рисунка 7. В строке “value” и колонках P2(C3,C2), P4(C3,C4) и P6(C2,C4) показаны результаты измерений разности фаз между сигналами 5МГц всех трех используемых ВСЧ. Измерения выполнены синхронно и соответствуют одному моменту времени – времени фронта синхронизирующего импульса, изображенному в верхней части осциллограммы. Результаты измерений на рисунке 7 показывают, что разность фаз между сигналами ВСЧ VCH-1005_02 (вход С3 ЦЗО), БВСЧ VCH-1010_004 (вход С2 ЦЗО) и БВСЧ VCH-1010_005(вход С4 ЦЗО) равны соответственно:

$$\begin{aligned} P2(C3,C2) &= 215.5810303^\circ; \\ P4(C3,C4) &= 152.2645206^\circ; \\ P6(C2,C4) &= 296.5198392^\circ; \end{aligned} \quad (2)$$

Для метода трех генераторов, с учетом принятых в настоящей работе обозначений, справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} 360^\circ - P6(C2,C4) &= P2(C3,C2) - P4(C3,C4); \\ 360^\circ - P2(C3,C2) &= P6(C2,C4) - P4(C3,C4); \\ 360^\circ &= P6(C2,C4) + P2(C3,C2) - P4(C3,C4); \end{aligned} \quad (3)$$

Проверяя соотношения (3), для первого уравнения имеем :

$$\begin{aligned} 215.5810303^\circ - 152.2645206^\circ &= 63.3165097^\circ; \\ 360^\circ - 296.5198392^\circ &= 63.4801608^\circ. \end{aligned}$$

Отклонение от баланса фаз за счет внутренних шумов ЦЗО составляет:

$$\Psi = 63.4801608^\circ - 63.3165097^\circ = 0.1636511^\circ.$$

Полученная величина не зависит от исследуемых сигналов ВСЧ.

Продолжаем проверку для подтверждения постоянства величины Ψ в момент времени комплексных измерений разности фаз.

Проверяя соотношения (3), для второго уравнения имеем:

$$\begin{aligned} 296.5198392^\circ - 152.2645206^\circ &= 144.2553186^\circ; \\ 360^\circ - 215.5810303^\circ &= 144.4189697^\circ. \\ \Psi &= 144.4189697^\circ - 144.2553186^\circ = 0.1636511^\circ. \end{aligned}$$

Проверяя соотношения (3), для третьего уравнения имеем:

$$\begin{aligned} 296.5198392^\circ + 215.5810303^\circ &= 512.1008695^\circ; \\ 512.1008695^\circ - 360^\circ &= 152.1008695^\circ. \\ \Psi &= 152.2645206^\circ - 152.1008695^\circ = 0.1636511^\circ. \end{aligned}$$

Дальнейшие вычисления подтверждают тот факт, что величина отклонения от баланса фаз по методу трех генераторов Ψ зависит от режимов работы ЦЗО и

является функцией времени. Исследование Ψ выходит за рамки настоящего материала и является предметом отдельного рассмотрения.

В настоящей работе, для определенности, считаем Ψ случайной методической погрешностью использования ЦЗО, которая для сигналов 5МГц не должна превышать $0.36^\circ = 360^\circ/1000$.

Для реализации второй функции, – регистрации результатов измерений температуры, к вычислительной машине ЦЗО были дополнительно подключены два мультиметра в режиме измерения температуры (см.рис.6). Композитные термодатчики, закреплены на опорных плитах обоих БВСЧ. Для обслуживания мультиметров на вычислительной машине ЦЗО установлена дополнительная программа многоканального регистратора “САДКО8К5” [8]. На представленном ниже рисунке 9 изображена панель управления регистратором “САДКО8К5”.

Таким образом, на вычислительной машине ЦЗО одновременно работали два регистратора результатов измерений: “Экспортер-Регистратор” для записи результатов фазовых измерений и программа многоканального регистратора “САДКО8К5” для регистрации результатов измерений мультиметров-термометров.

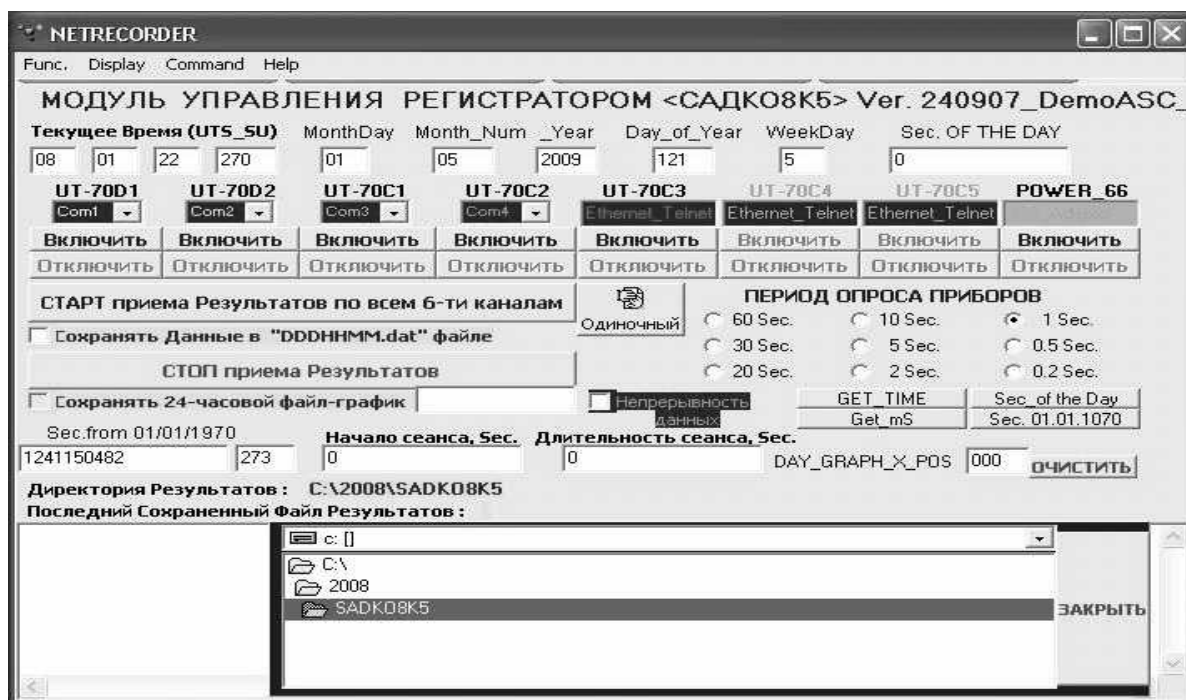


Рис.9. Панель управления регистратором “САДКО8К5”

Весь процесс комплексных измерений и регистрации происходит синхронно по сигналам ежесекундной метки, подаваемой с выхода образцового ВСЧ. Отключение сигнала ежесекундной метки приводит к завершению сеанса измерений. Единая шкала времени, фиксируемая программами ЦЗО, позволяет при обработке сопоставлять весь набор измеренных физических величин в любых комбинациях.

4.2. Определение относительной разности частот между выходными сигналами БВСЧ и сигналами глобальных систем координированного времени.

Для решения задачи определения относительной разности частот между выходными сигналами используемых водородных стандартов и сигналами глобальных систем координированного времени была собрана схема измерений, представленная на рисунке 10.

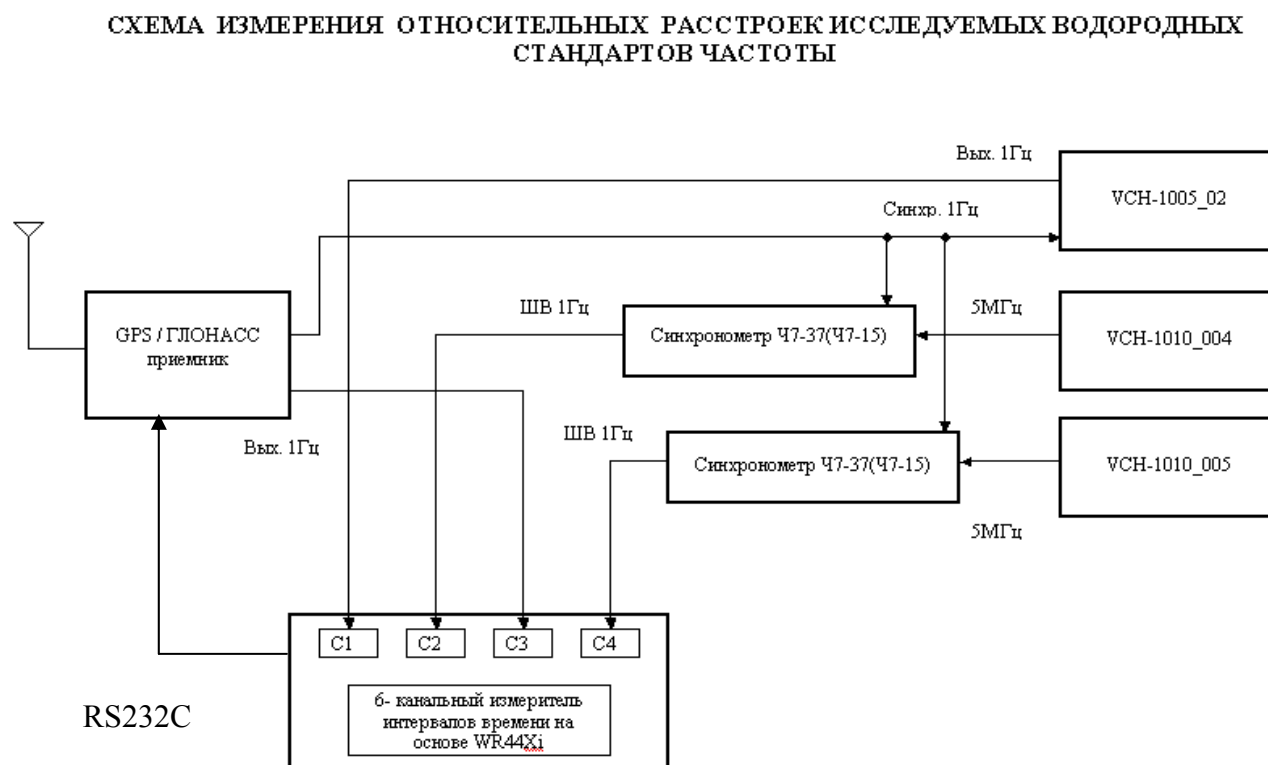


Рис. 10.

В состав схемы вошли: комбинированный блок GPS/ГЛОНАСС приемников, источник опорного сигнала 1Гц ВСЧ типа VCH-1005_02, исследуемые БВСЧ типа VCH-1010_004 и VCH-1010_005, два синхрометра типа Ч7-15 и шестиканальный измеритель интервалов времени на базе ЦЗО типа WR44Xi. Синхрометры необходимы для формирования двух независимых шкал времени исследуемых БВСЧ.

Прием сигналов точного времени от глобальных систем координированного времени осуществлялся с использованием GPS-приемников компании Trimble. Для работы с системой ГЛОНАСС использовался микроконтроллер компании JAVAD типа Quattro-G3D (16 каналов). Приемники управлялись отечественной управляющей программой, встроенной в цифровой запоминающий осциллограф. Панель управляющей программы представлена на рисунке 11. Программа представляет собой монитор событий, происходящих в системе GPS (или ГЛОНАСС).

В верхней части расположены органы управления подключением встроенной машины ЦЗО к приемникам GPS/ГЛОНАСС.

Ниже, на темном фоне, представлено окно принятых информационных пакетов. Справа расположена таблица, в которой расшифровываются принятые пакеты сообщений. Слева внизу расположены окна результатов расчетов, необходимых для работы регистраторов ЦЗО. Вычисления производятся только в случаях, когда в зоне видимости антенн приемников находится более трех спутников GPS (или ГЛОНАСС).

Измерения относительной разности частот (ОРЧ) выполнялись при помощи ЦЗО в режиме шестиканального измерителя интервалов времени. Регистрация результатов измерений взаимных задержек между сигналами производилась при помощи упоминавшейся выше программы “Экспортер-Регистратор”.

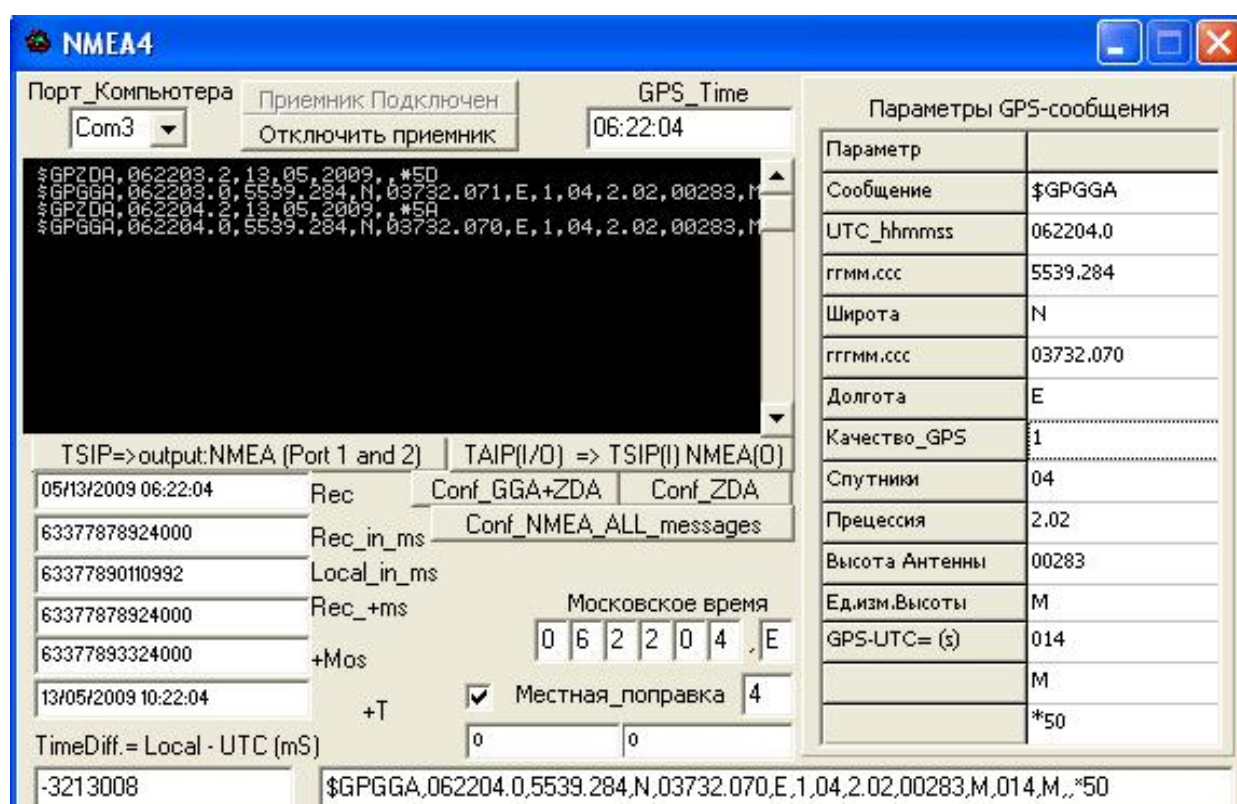


Рис. 11. Управляющая программа GPS/ГЛОНАСС приемников

Осциллограмма, поясняющая работу шестиканального измерителя интервалов времени, представлена на рисунке 12. Весь цикл измерений ОРЧ проводился в два этапа. Сначала – с использованием сигнала GPS, а затем с использованием сигнала ГЛОНАСС с сохранением масштаба времени.

Из представленных на рисунке 12 осциллограмм и результатов измерений взаимных задержек секундных импульсов, видно :

$$P1 = \tau(C3, C1) = -636.2 \text{ нС}; \quad P2 = \tau(C3, C2) = -327.2 \text{ нС};$$

$$P3 = \tau(C1, C2) = 309 \text{ нС};$$

Принимая во внимание соотношение (2), для первой комбинации задержек между сигналами имеем:

$$\tau(C3, C1) = \tau(C3, C2) - \tau(C1, C2) = -(327.2 + 309) = \underline{-636.2 \text{ нС.}}$$

Для второй комбинации задержек

$$P4 = \tau(C3, C4) = 95.4 \text{ нС, } P5 = \tau(C1, C4) = 731.6 \text{ нС,}$$

$$P6 = \tau(C3, C1) = \underline{-636.2 \text{ нС, имеем:}}$$

$$\tau(C3, C1) = \tau(C3, C4) - \tau(C1, C4) = 95.4 - 731.6 = \underline{-636.2 \text{ нС.}}$$

Для третьей комбинации задержек

$$P5 = \tau(C1, C4) = \underline{731.6 \text{ нС, } P6 = \tau(C2, C4) = 422.6 \text{ нС,}}$$

$$P3 = \tau(C1, C2) = 309 \text{ нС, имеем:}$$

$$\tau(C1, C4) = \tau(C2, C4) + \tau(C1, C2) = 422.6 + 309 = \underline{731.6 \text{ нС.}}$$

Для четвертой комбинации задержек

$$P3 = \tau(C2, C4) = 422.6 \text{ нС, } P5 = \tau(C3, C2) = -327.2 \text{ нС,}$$

$$P4 = \tau(C3, C4) = \underline{95.4 \text{ нС, имеем:}}$$

$$\tau(C3, C4) = \tau(C2, C4) + \tau(C3, C2) = 422.6 - 327.2 = \underline{95.4 \text{ нС.}}$$

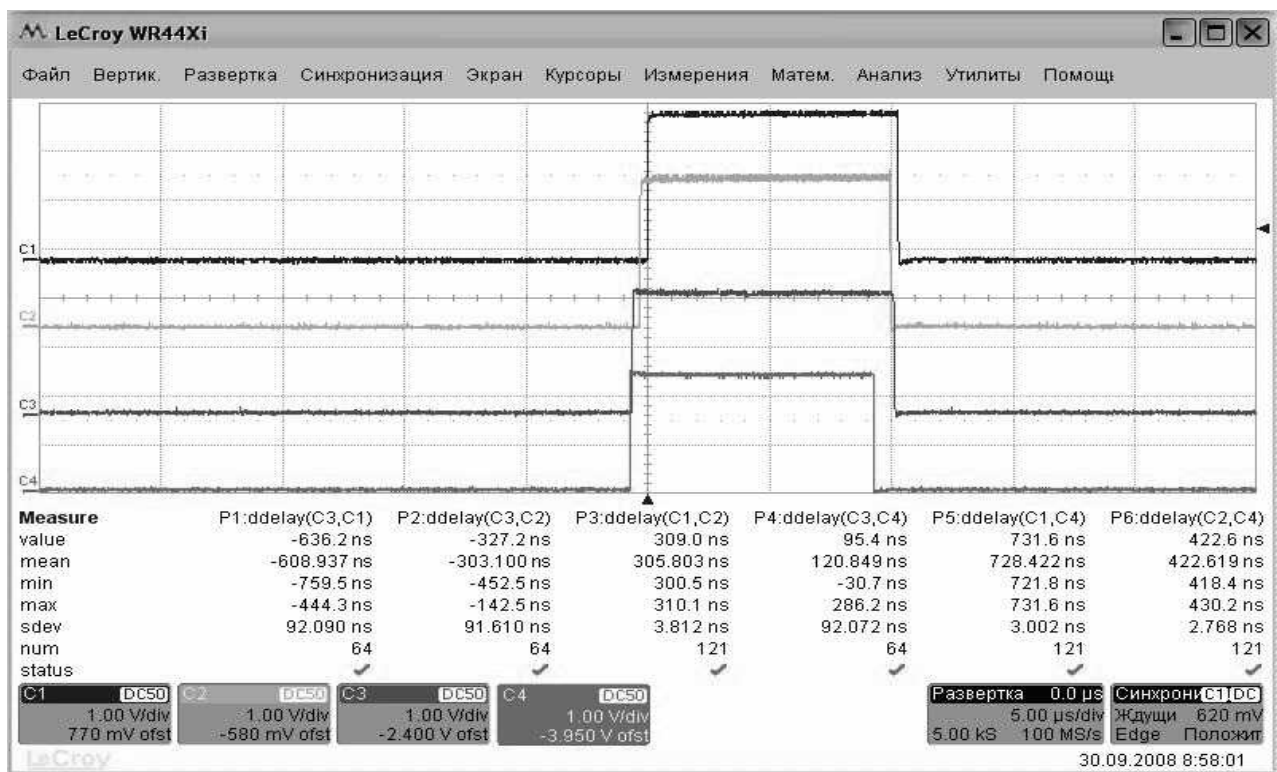


Рис. 12. Осциллограмма шестиканального измерителя интервалов времени.

Во всех четырех рассмотренных вариантах наблюдается равенство результатов измерений взаимных задержек с результатами вычислений по методу трех генераторов этих же самых задержек. Выполненная проверка баланса задержек подтверждает приемлемость метода трех генераторов, как способа измерения относительной разности частот выходных сигналов ВЧЧ путем измерения изменения относительных задержек.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

5.1. Результаты измерений дрейфа значения частоты и значения уровня фазовых шумов

Результаты измерений сгруппированы в сегментированный массив файловых таблиц для упрощения последующего анализа и обработки.

По результатам обработки сеанса измерений с использованием ЦЗО построены графики дисперсии Аллана, представленные на рисунке 13.

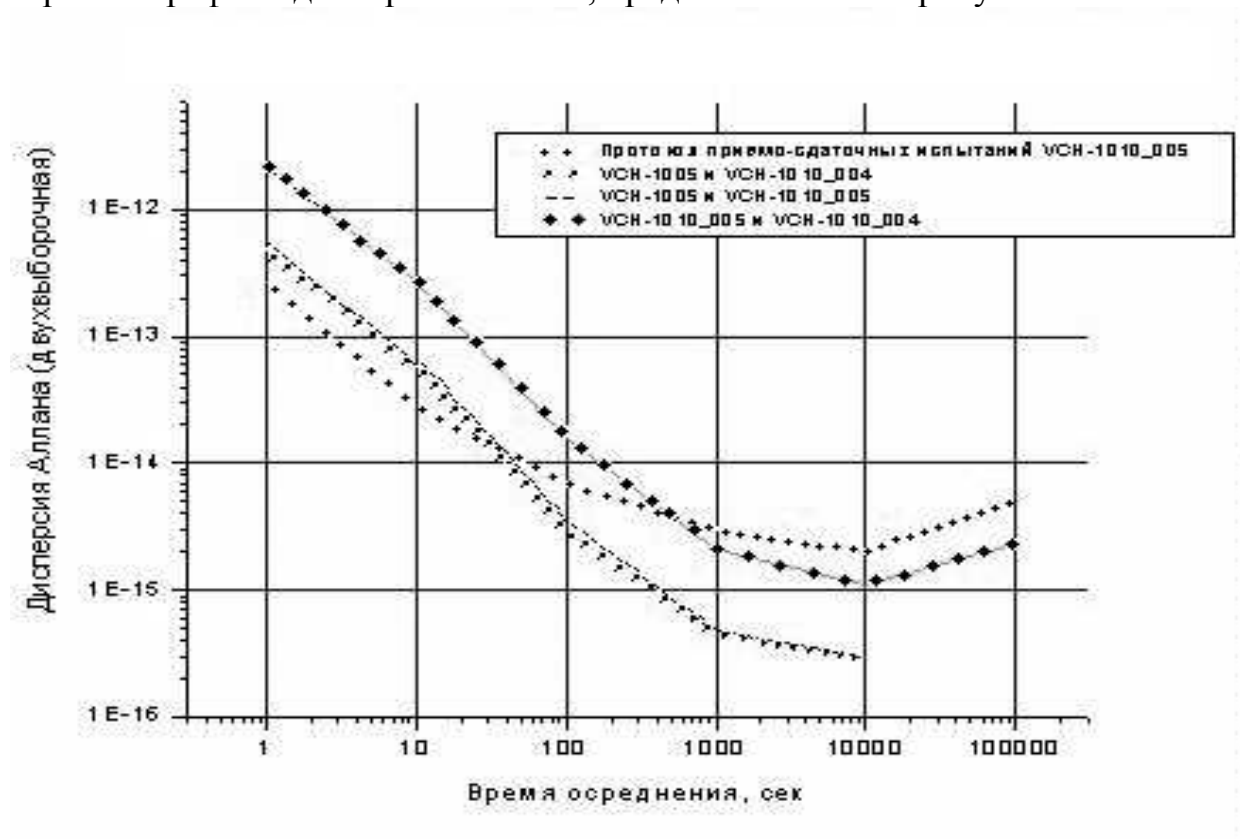


Рис.13. Двухвыборочная вариация Аллана для БВСЧ, где
++ По протоколу приемо-сдаточных испытаний VCH-1010_005;
▲ ▲ VCH-1005 и VCH-1010_004;
--- VCH-1005 и VCH-1010_005;
*** VCH-1010_004 и VCH-1010_004.

Из графиков следует вывод, что требования ТУ, выдвигаемые к БВСЧ в рамках проекта РАДИОАСТРОН, выполняются. Для обоих БВСЧ оба примененных способа измерений, как с использованием частотного компаратора, так и с применением ЦЗО, дали практически совпадающие результаты (см. рис.5 и рис.13). В тоже время способ ЦЗО дал существенно лучшую оценку дисперсии $\sigma_y(\tau)$ при сравнении каждого БВСЧ с наземным водородным стандартом частоты. Этот результат был ожидаем в силу более высокого качества сигнала на выходе VCH-1005. Подобный результат при использовании частотного компаратора обнаружить не удалось (см. рис.5). При обработке результатов измерений по методу ЦЗО была обнаружена

флуктуация частоты одного из БВСЧ. Зависимость разности фаз между выходными сигналами обоих БВСЧ представлена на рисунке 14.

Отсутствие полноценного регистратора в управляющей программе частотного компаратора VCH-314 не позволило выполнить подобную операцию.



Рис. 14. Зависимость разности фаз сигналов БВСЧ от времени.

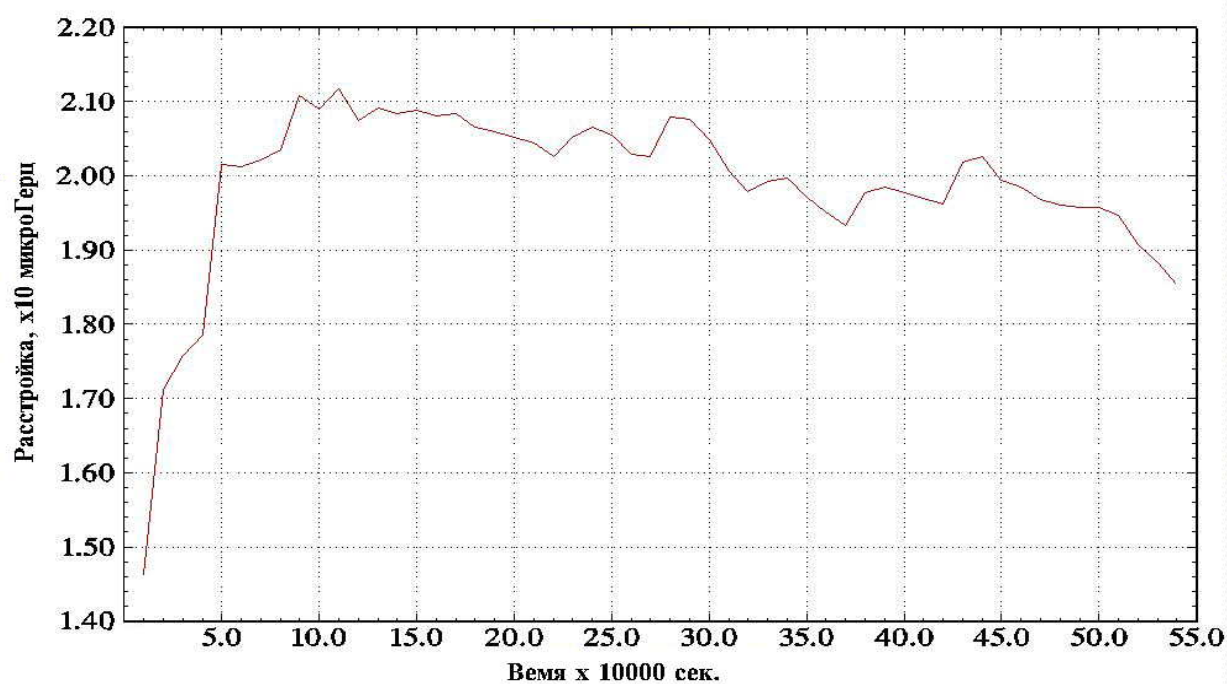


Рис. 15. Зависимость, иллюстрирующая стационарный режим БВСЧ.

Сопоставляя результаты измерений с использованием ЦЗО с результатами работы телеметрических систем обоих БВСЧ, была обнаружена связь флуктуации с периодичностью работы термостатов. В целях уточнения подозрений на расстройку цифровых термостатов одного из исследуемых БВСЧ результаты были скомпонованы в одном масштабе времени.

Представленная на рисунке 16 зависимость подтверждает термическую природу флуктуации частоты выходного сигнала БВСЧ при наработке ресурса на начальном этапе эксплуатации. Одновременно с измерениями ДрЗЧ БВСЧ проводились наблюдения за величиной давления во вспомогательном вакуумном контуре. Результаты измерений средней разности частот сопоставлены с результатами измерений давления. Изображенные на рисунке 17 зависимости дают основания утверждать, что:

- при ухудшении качества вакуума (рост давления) во внешнем контуре БВСЧ величина расстройки стандарта увеличивается пропорционально величине давления;
- аппаратура КИА БВСЧ не фиксирует изменение давления (концентрации вещества) во внешнем контуре стандарта и, следовательно, при возможном сближении КРТ с атмосферой Земли возможна неконтролируемая расстройка включенного БВСЧ.

Результат сопоставления позволяет сделать вывод о зависимости (линейной) средней разности частот (за 100 сек.) от изменения давления во вспомогательном вакуумном контуре в диапазоне от $6 \cdot 10^{-6}$ mBar до 10^{-3} mBar.

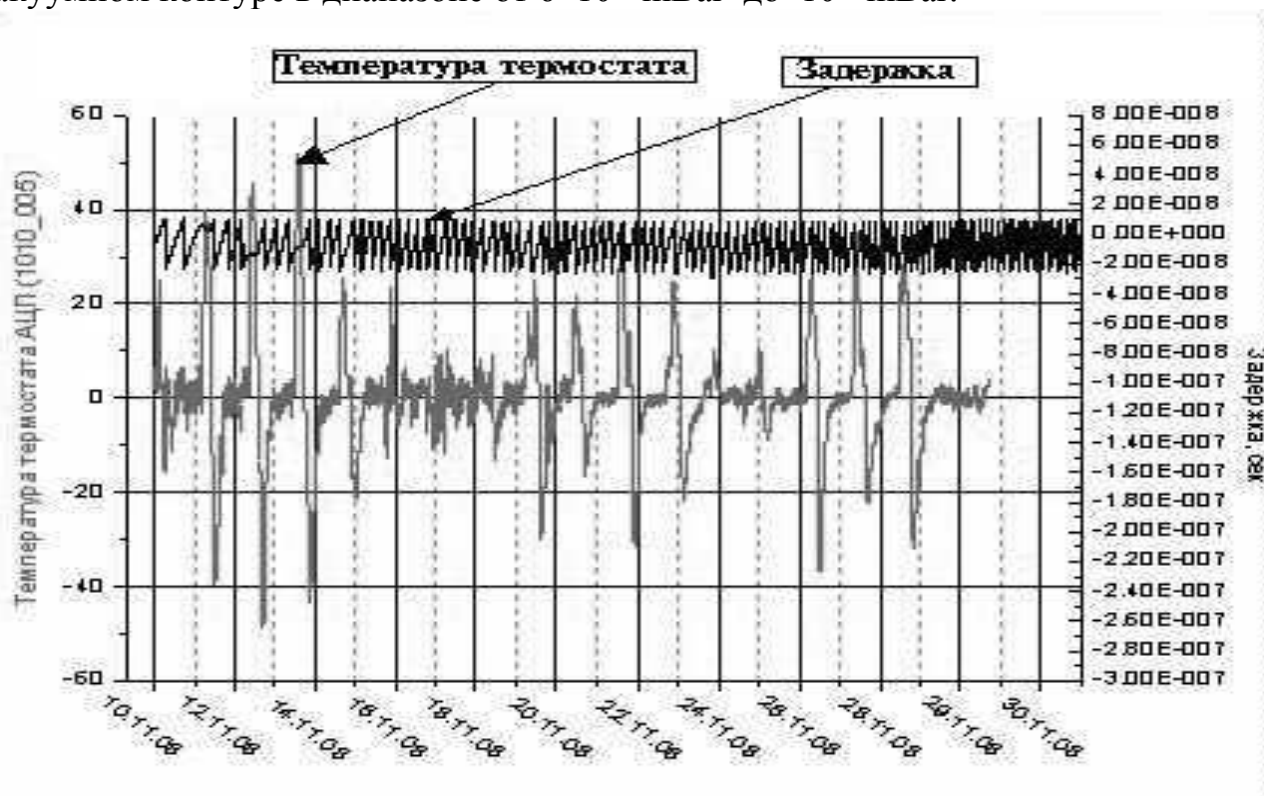


Рис. 16. Зависимости температуры термостата и задержки от времени. Температура указана в десятых долях гр.С, относительно среднего значения в 31 гр.С.

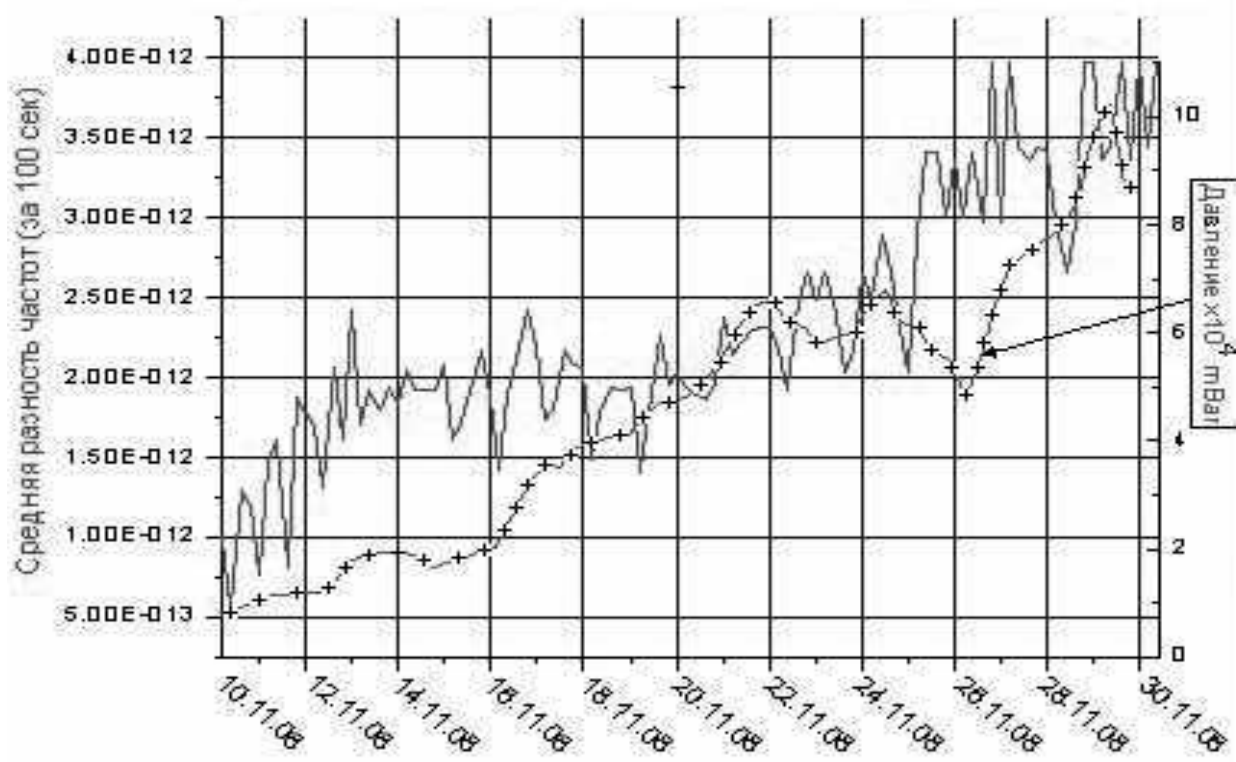


Рис.17. Зависимости средней разности частот БВСЧ и давления от времени.

5.2. Результаты измерений относительной разности частот между выходными сигналами БВСЧ и сигналами глобальных систем координированного времени.

Результаты измерений, представленные в обобщенной таблице 1, позволяют судить о качестве настройки исследуемых БВСЧ и принимать решение о необходимости подстройки. Главное назначение таблицы заключается в снижении неопределенности в ДЗЧ выходных сигналов обоих БВСЧ.

Таблица 1. Результаты измерений ОРЧ для всех исследованных источников опорных колебаний

Источник F1	VCH-1005_2	VCH1010_004	VCH1010_005	GPS-8	ГЛОНАСС-6
Источник F2					
VCH-1005_2		$F2 > F1$	$F2 < F1$	$F2 < F1$	$F2 < F1$
VCH1010.004	-1.56×10^{-11}		$F2 < F1$	$F2 < F1$	$F2 < F1$
VCH1010.005	-1.15×10^{-11}	$+4.0 \times 10^{-12}$		$F2 < F1$	$F2 < F1$
GPS-8	$+3.7 \times 10^{-12}$	$+1.92 \times 10^{-11}$	$+1.52 \times 10^{-11}$		$F2 > F1$
ГЛОНАСС-6	$+3.3 \times 10^{-12}$	$+1.88 \times 10^{-11}$	$+1.48 \times 10^{-11}$	-4.0×10^{-13}	

Поясним суть данных, представленных в таблице 1.

По горизонтали (строки) отмечены измеряемые источники сигнала 5 МГц. По вертикали (столбцы) указаны образцовые источники опорного сигнала 5 МГц. На пересечении соответствующих строк и столбцов указаны результаты измерений ОРЧ между образцовым и измеряемым источниками, равные $(F1-F2)/F_{\text{ДЗЧ}}$. Для наглядности результаты измерений могут быть представлены в виде диаграмм относительных расстроек на шкале частот.

Из представленных материалов следует, что непосредственно перед запуском оба БВСЧ должны быть подстроены по опорной частоте под наземный водородный стандарт станции слежения. Кроме того, до начала наблюдений КРТ должен быть найден способ сверки действительных значений опорных частот бортовых стандартов с наземными стандартами частоты и времени.

Для иллюстрации результатов, сведенных в таблицу 1, построена диаграмма распределения ОРЧ по состоянию на 30.01.2009. Для иллюстрации динамики изменения ОРЧ дополнительно представлена диаграмма по состоянию на 10.02.2009.

Диаграмма распределения относительных расстроек на 30.01.2009

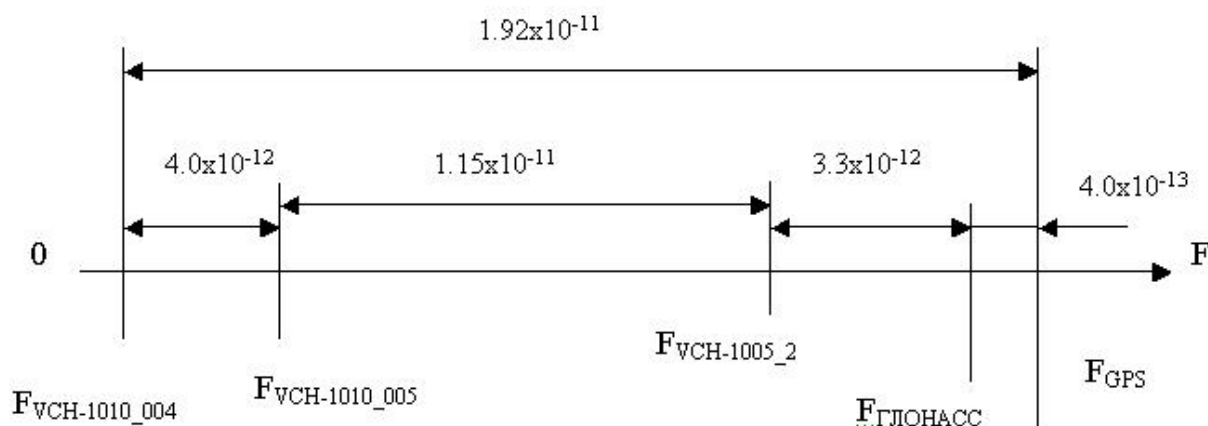
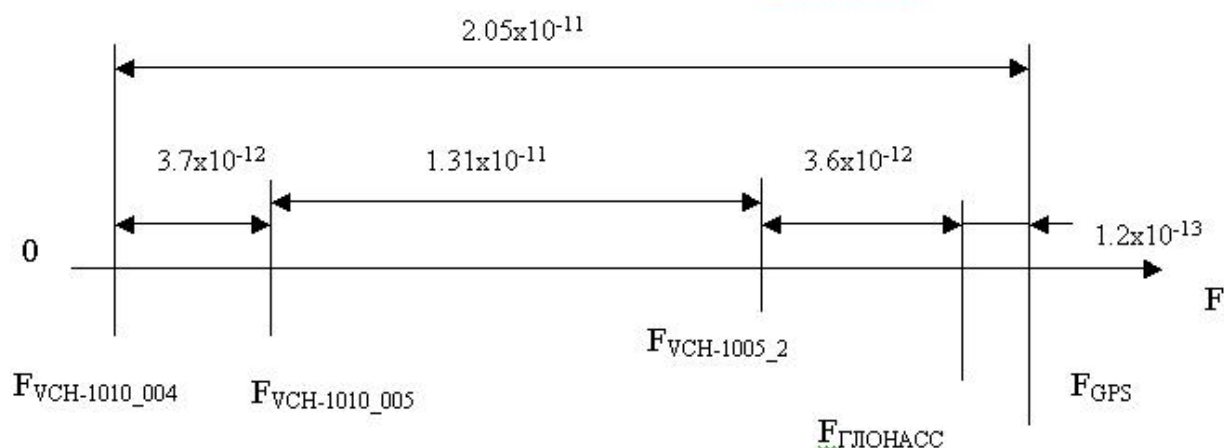


Диаграмма распределения относительных расстроек на 10.02.2009



Используя упомянутый выше метод трех генераторов, по диаграммам можно определить допустимое среднее относительное изменение частоты за 10 суток. Для исследуемых БВСЧ это изменение составило -3×10^{-13} , что находится в пределах ТУ на эти приборы.

6. ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ.

- 1. Реальное относительное изменение частоты 5МГц на выходах БВСЧ за 20 суток составило $+3.9 \cdot 10^{-12}$ (по ТУ $\pm 8 \cdot 10^{-14}$) за период с 10.11.2008 по 30.11.2008. После настройки у производителя относительное изменение частоты 5МГц на выходах БВСЧ за 10 суток составило $-3 \cdot 10^{-13}$ (по ТУ $\pm 2 \cdot 10^{-13}$).**
- 2. Отмечена ДЕГРАДАЦИЯ вспомогательного вакуумного контура в одном из БВСЧ. Давление за 65 суток увеличилось более, чем в 270 раз (с $6.6 \cdot 10^{-6}$ mBar до $1.8 \cdot 10^{-3}$ mBar).**
- 4. Обнаружена зависимость относительной расстройки БВСЧ от изменения давления во вспомогательном вакуумном контуре .**
- 5. Значение уровня фазовых шумов и дрейф значения опорной частоты соответствующие ТУ, достигаются только через 4 месяца после начала работы приборов в вакууме.**
- 6. Во время исследований наблюдались такие состояния приборов БВСЧ, когда показания телеметрической системы отличались от реальных состояний приборов.**

А.Н. Зиновьев 14.05.2009

7. Литература.

1. Бортовой водородный стандарт частоты космического радиотелескопа VCH-1010 . Руководство по эксплуатации. ЯКУР. 411141.015 РЭ ЗАО “Время-Ч”. Нижний Новгород, 2006.
2. Компаратор частотный VCH-314. Инструкция пользователя. ЯКУР. 411146.014 ИП ЗАО “Время-Ч”. Нижний Новгород, 2006.
3. К. Одуан, Б. Гино. Измерение времени. Основы GPS. Москва: Техносфера, 2002.
4. А.Н. Зиновьев. Сравнительный анализ параметров систем обработки наблюдений VLBI. - Препринт № 36, АКЦ ФИАН, 1994.
5. А.Н. Зиновьев. Аппаратурная синхронизация шкал времени в сегментах интерферометра с нулевой базой. - Препринт № 34, АКЦ ФИАН, 2005.
6. А.С. 1224997. СССР. Устройство для задержки импульсов. А.М. Бонч-Бруевич, А.Н. Зиновьев и др. // Открытия. Изобретения. – 1986 – №14.
7. А.Н. Зиновьев, В.В. Шестаков. Устройство переменной задержки для цифровой системы связи. “Радиотехника”, 1986, №4.
8. Аппаратно-программный комплекс “ФАВОРИТ 1К8”. Инструкция пользователя. АКЦ ФИАН, 2006.