

Исследование стабильности трёхдиапазонного криогенного приемного фокального блока с расчетом дисперсии Аллана

Ю.В. Векшин, А.П. Лавров

Институт прикладной астрономии РАН
г. Санкт-Петербург, Россия

Криогенный приемный фокальный блок (КПФБ)

Ипатов А.В., Ипатова И.А., Иванов Д.В., Евстигнеев А.А.,
Мардышкин В.В., Лавров А.С., Хвостов Е.Ю., Чернов В.К.

Радиоастрономическая приемная система для 13,2 м антенн, ВРК-2014.

Рабочие диапазоны частот:

- (2,2-2,6) ГГц, 13 см (S-диапазон)
- (7,0-9,5) ГГц, 3,5 см (X-диапазон)
- (28-34) ГГц, 1 см (Ka-диапазон)

В каждом диапазоне 2 канала: левой и правой круговой поляризации
На входе охлаждаемый трехдиапазонный облучатель

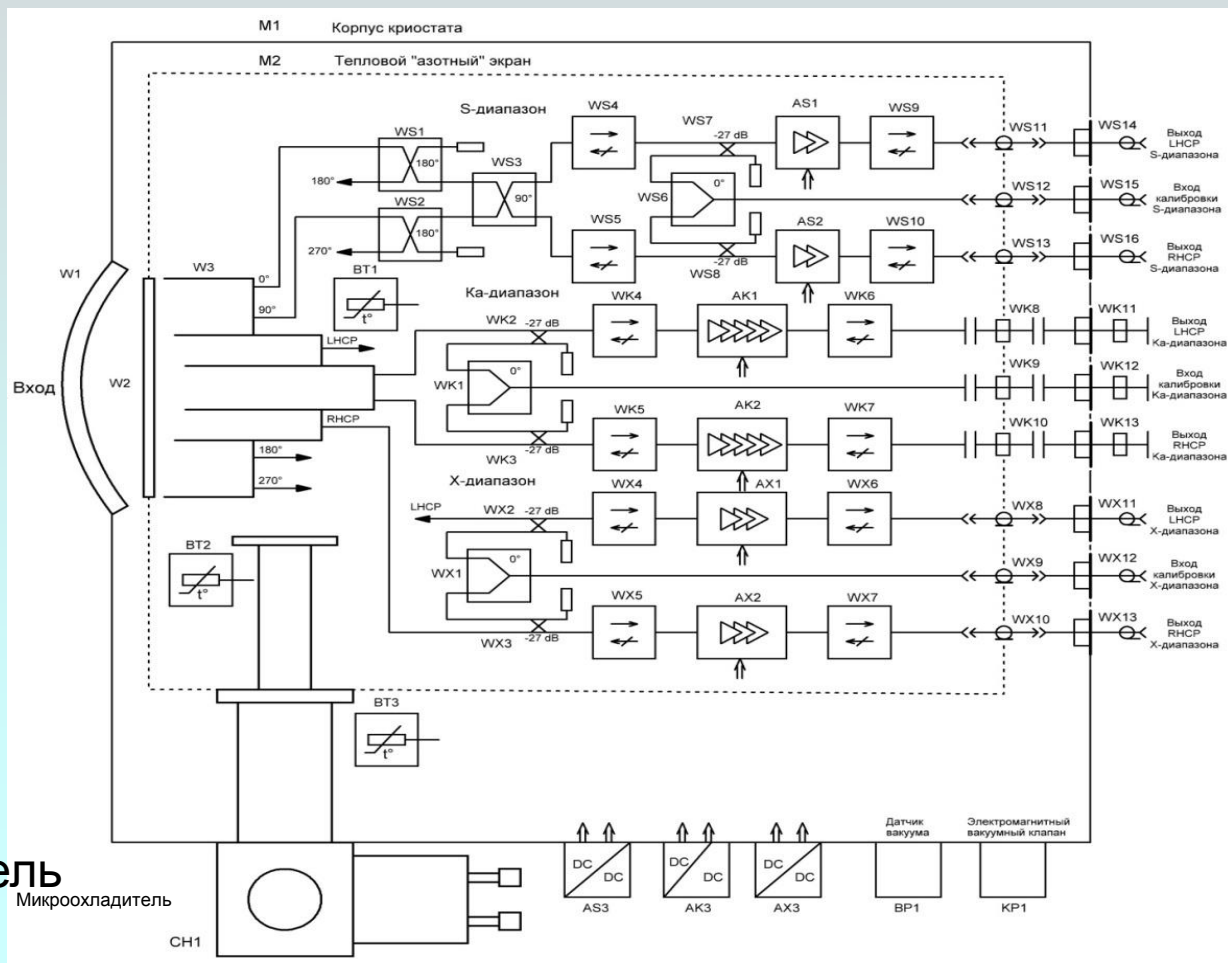
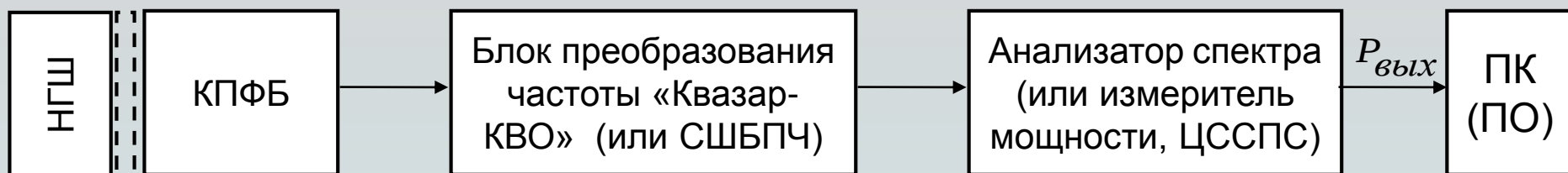


Схема измерений



$$P_{вых} = k \cdot T \cdot G \cdot \Delta f$$

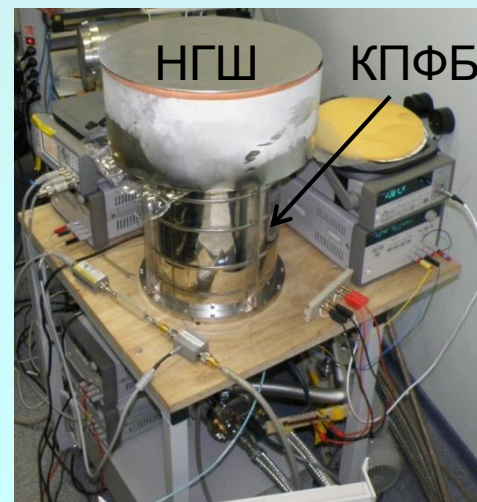
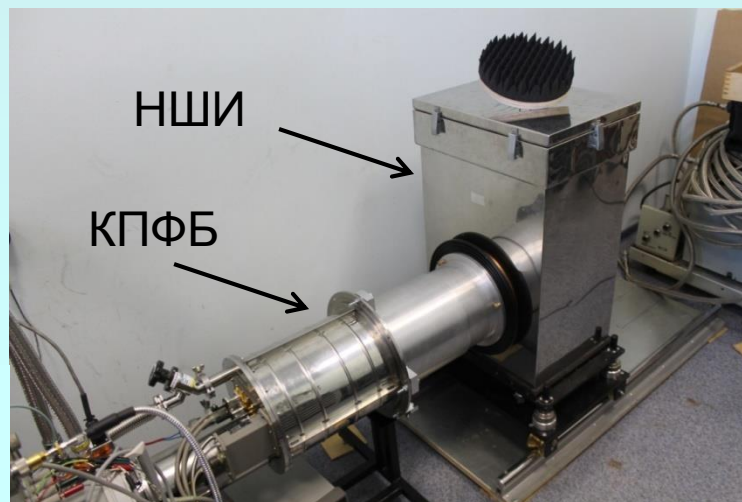
Для измерения шумовой температуры КПФБ применяется специальная «азотная» нагрузка:

$$T_{ш} = \frac{T_T - n \cdot T_A}{n - 1}$$

Низкотемпературный широкоапертурный излучатель (НШИ-200, ФГУПВНИИФТРИ)

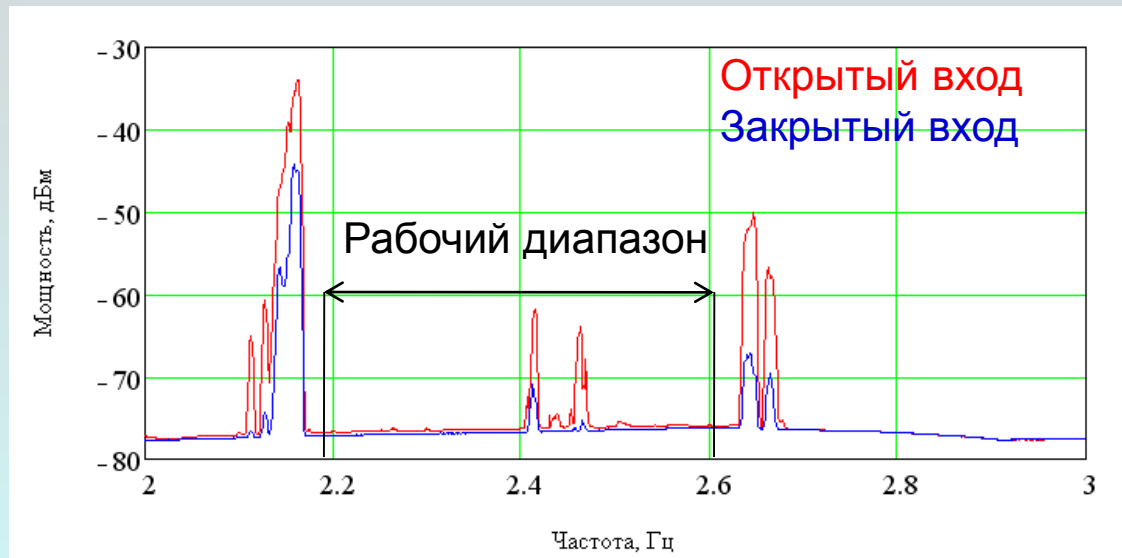
Низкотемпературный генератор шума (НГШ, ИПА РАН)

$$n = \frac{P_{вых.Т}}{P_{вых.А}}$$

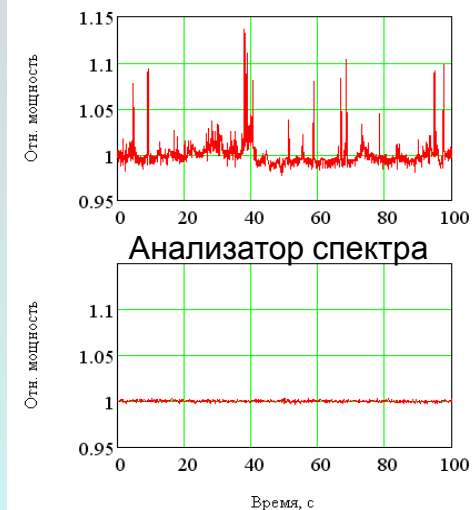


Особенности измерений параметров КПФБ в S-диапазоне

Помехи в рабочем диапазоне частот S-диапазона:



Детекторный измеритель мощности



Подход: Измерения с помощью спектрально-селективной системы регистрации:

- 1) Анализатор спектра Agilent N9030A, управляемый программой в среде LabVIEW
- 2) Спектрально-селективное выходное устройство радиометра

Гренков С.А., Кольцов Н.Е., Рахимов И.А.

Опыт использования спектрально-селективного выходного устройства радиометра для борьбы с радиопомехами.

Основные параметры КПФБ

Диапазон	Канал	Шумовая температура, К		Коэффициент усиления**, дБ	
		«Тепло»	«Холод»	«Тепло»	«Холод»
S (2,2-2,6 ГГц)	S левый	<i>131</i>	13	28,6	31,2
	S правый	<i>114</i>	12	25,8	30,7
X (7,0-9,5 ГГц)	X левый	<i>100</i>	10	25,3	29,5
	X правый	<i>101</i>	10	26,0	31,0
Ка (28-34 ГГц)	Ка левый	286	80*	37,1	37,5
	Ка правый	280	81*	34,7	41,6

* - В опытном образце КПФБ из состава радиоастрономической приемной системы осуществлена доработка каналов Ка-диапазона с целью уменьшения шумовой температуры.

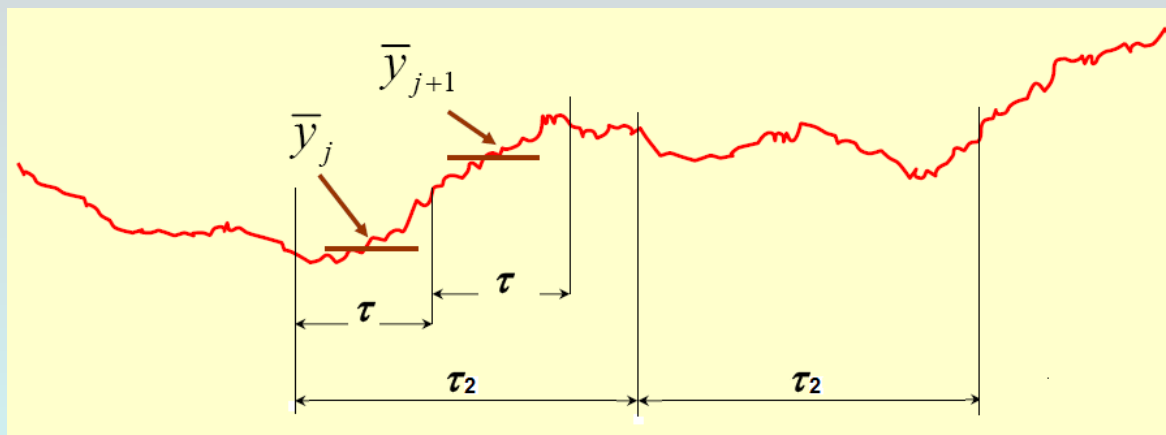
** - *Ипатов А.В., Ипатова И.А., Иванов Д.В., Евстигнеев А.А., Мардышкин В.В., Лавров А.С., Хвостов Е.Ю., Чернов В.К.*

Радиоастрономическая приемная система для 13,2 м антенн, ВРК-2014

Метод определения стабильности

Дисперсия Аллана

Стабильность – неизменность во времени рассматриваемых величин



$U_{\text{ср}}$

Задача: оценка $U_{\text{ср}}$

Дисперсия Аллана - дисперсия попарных разностей, усредненных на временном интервале τ значений обрабатываемого сигнала y

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot (N - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{y}_{j+1} - \bar{y}_j)^2$$

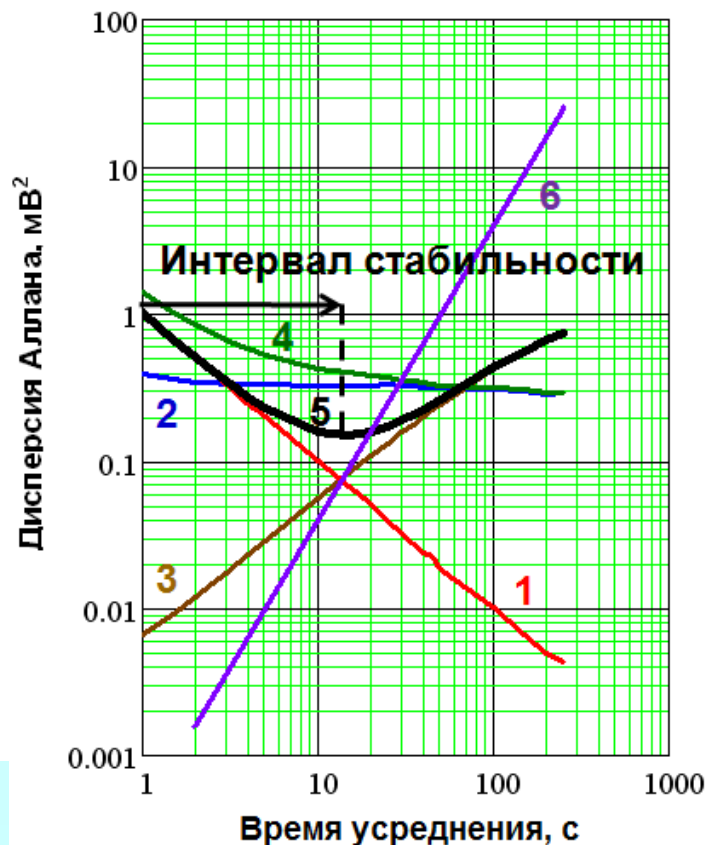
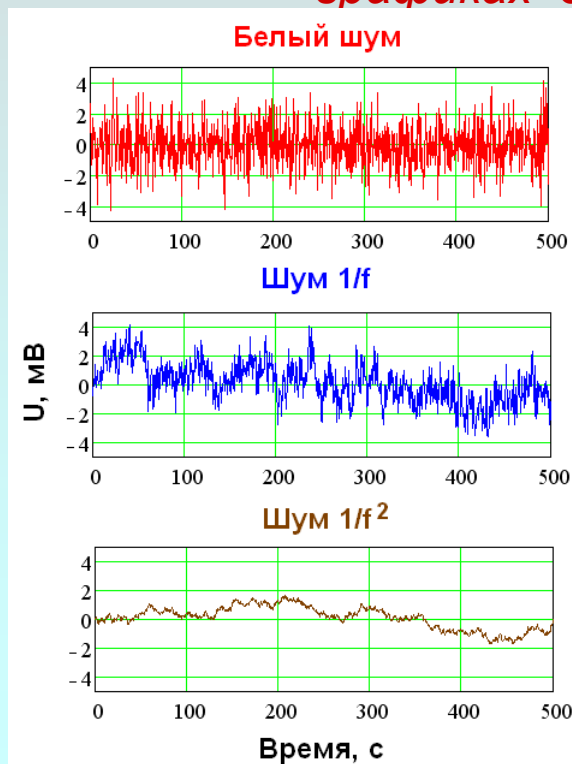
Дисперсия Аллана представляется в виде графика зависимости от времени усреднения τ

Дисперсия Аллана для шумов с различной спектральной плотностью мощности

Спектральная плотность мощности шума (СПМ): $S(f) = c_\alpha \cdot f^{-\alpha}$, f – частота.

Дисперсия Аллана (ДА): $\sigma_A^2(\tau) = K_\alpha \cdot \tau^{\alpha-1}$ – связана с СПМ

Шум с различным спектральным составом имеет разный наклон на графиках дисперсии Аллана от времени усреднения.



1 – белый шум,
ДА – спад 10дБ/декада

2 – шум $1/f$,
ДА – константа

3 – шум $1/f^2$, ДА –
подъем 10дБ/декада

4 – Сумма **(1)+(2)**

5 – Сумма **(1)+(3)**

6 – линейный дрейф

Особенности регистрации мощности широкополосных сигналов с применением анализатора спектра

1 отсчет мощности: $P = \sum_{i=1}^N p_i$

Отношение СКО флуктуаций к среднему значению измеряемой мощности

$$\frac{\Delta P_i}{P_i} = \frac{1}{\sqrt{RBW \cdot \tau}}$$

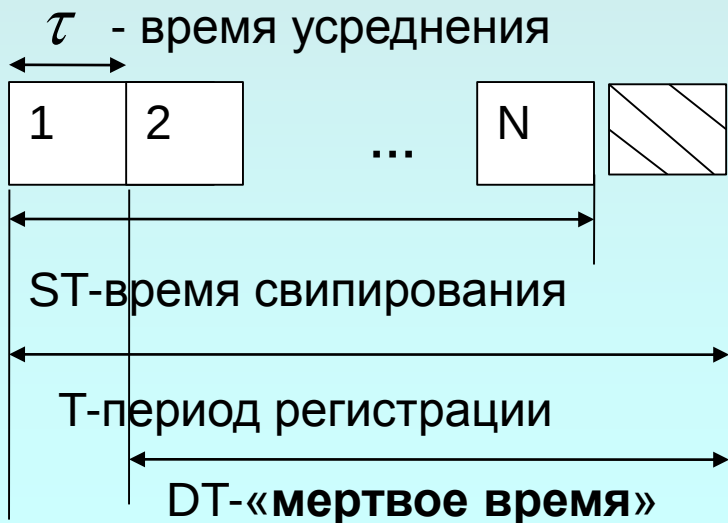
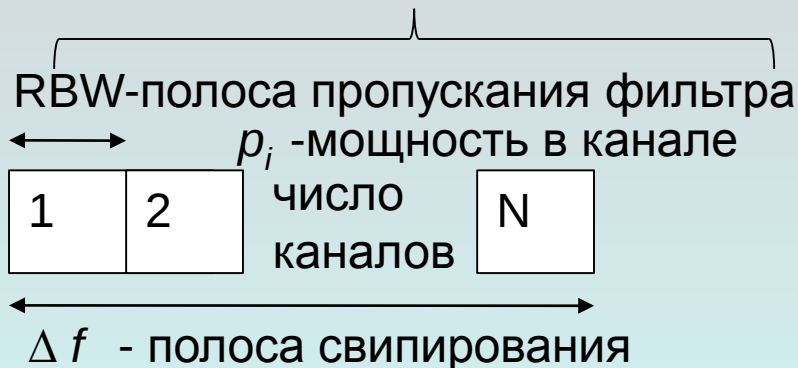
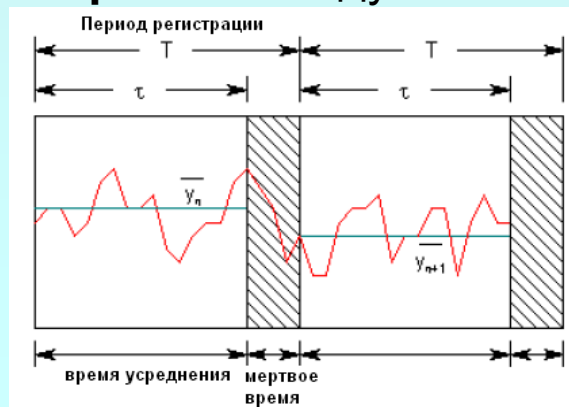
При измерениях в широкой полосе $\Delta f = RBW \cdot N$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}} = \frac{1}{\sqrt{RBW \cdot N \cdot \tau}} = \frac{1}{\sqrt{RBW \cdot ST}}$$

Пример:

$\Delta f = 1$ ГГц, $ST = 1$ с, $RBW = 1$ МГц, $\tau = 1$ мс

Период регистрации отсчетов равен 1,5 с, а время усреднения 1 мс. Появляется «мертвое время» между отсчетами.



Методика корректировки дисперсии Аллана для сигналов с «мертвым временем» в измерениях

$$\sigma_A^2(\tau) = B \cdot \sigma_{ADT}^2(\tau)$$

- *Barnes J. A., Allan D.W.* Variances based on data with dead time between the measurements // NIST Technical Note 1318. 1990.
- *Wenlei Shan, Zhenqiang Li, Shengcai Shi, Ji Yang.* Gain Stability Analysis of a Millimeter Wave Superconducting Heterodyne Receiver for Radio Astronomy // Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference. 2010

Предлагаемая методика:

- 1) Построение зависимости дисперсии Аллана с «мертвым временем» на интервалах, кратных периоду регистрации сигнала T .
- 2) Аппроксимация зависимостью, соответствующей сумме шумов: белого, $1/f$, $1/f^2$, линейного дрейфа

$$\sigma_A^2(\tau) = K_0 \cdot \frac{1}{\tau} + K_1 + K_2 \cdot \tau + K_3 \cdot \tau^2$$

- 3) Умножение на корректирующие коэффициенты:

$$B_0 = \frac{\tau}{T}$$

для белого шума,

$$B_1 = B_2 = B_3 = 1$$

для остальных шумов

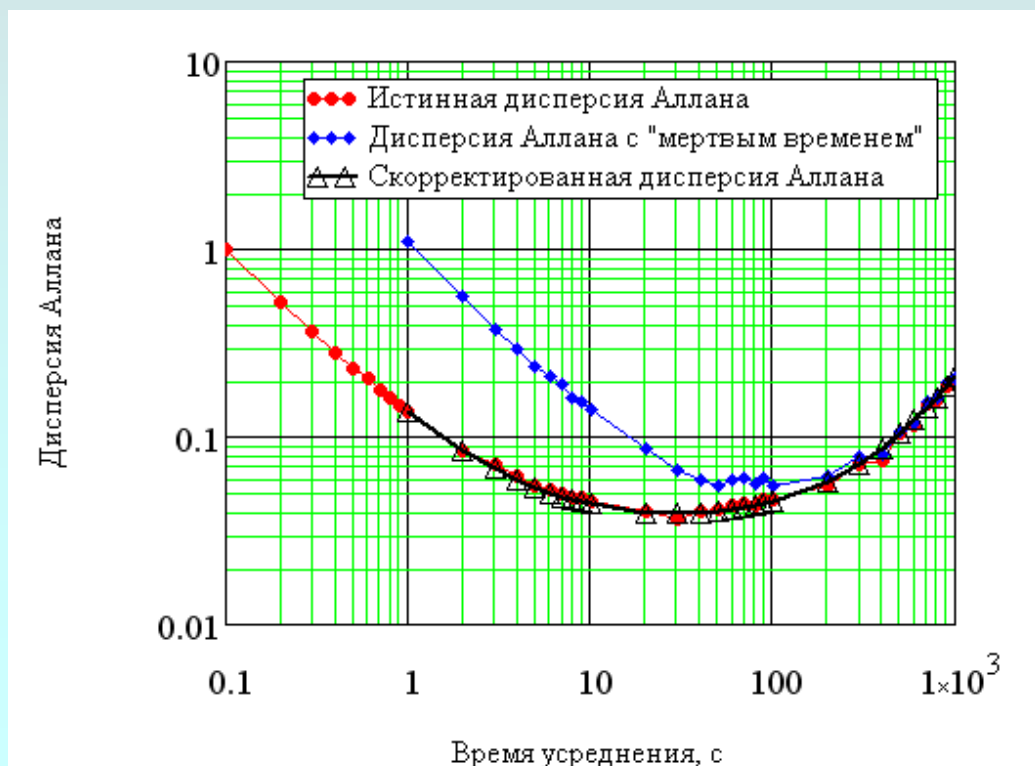
Проверка методики корректировки дисперсии Аллана для сигналов с «мертвым временем» на модельных сигналах

Пример численного моделирования:

$\tau=0,1$ с, $T=1$ с («мертвое время» $DT=0,9$ с). $B_0 = 0,1$

Сумма шумов: белого, $1/f$, $1/f^2$, линейного дрейфа.

$$\sigma_A^2(\tau) = K_0 \cdot \frac{1}{\tau} + K_1 + K_2 \cdot \tau + K_3 \cdot \tau^2$$



Аппроксимация
ДА:

$$K_0 = 1,055$$

$$K_1 = 0,032$$

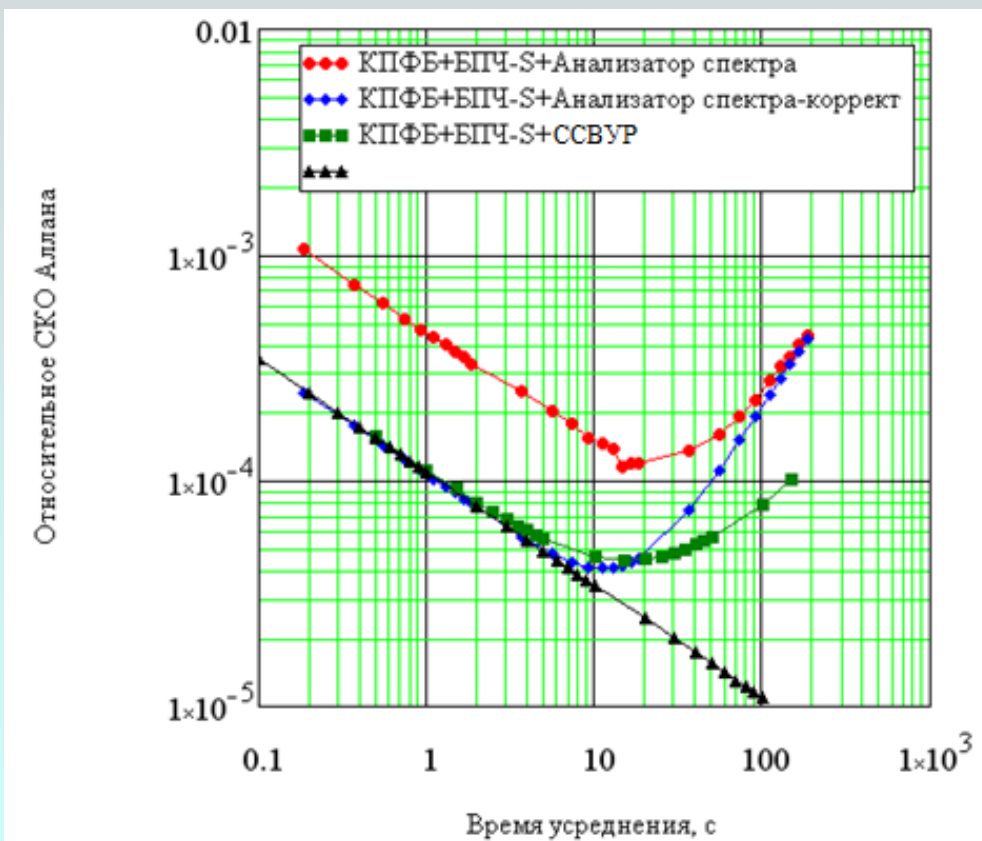
$$K_2 = 1,125 \cdot 10^{-4}$$

$$K_3 = 6,401 \cdot 10^{-8}$$

Коррекция:

$$B_0 \cdot K_0 = 0,105$$

Проверка методики корректировки дисперсии Аллана для реального сигнала анализатора спектра с «мертвым временем»



$RBW=8$ МГц; $\Delta f=84$ МГц;
 $ST=0,1$ с; $T=0,2$ с; $\tau=9,5$ мс;
 $DT=0,19$ с

Теория:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}$$

Корректирующий коэффициент для СКО Аллана

$$B_0 = \sqrt{\frac{\tau}{T}} = \sqrt{\frac{RBW}{\Delta f} \cdot \frac{ST}{T}} \quad \text{для белого шума}$$

τ – время интегрирования

T – период регистрации

RBW – полоса пропускания

Δf – полоса обзора частот

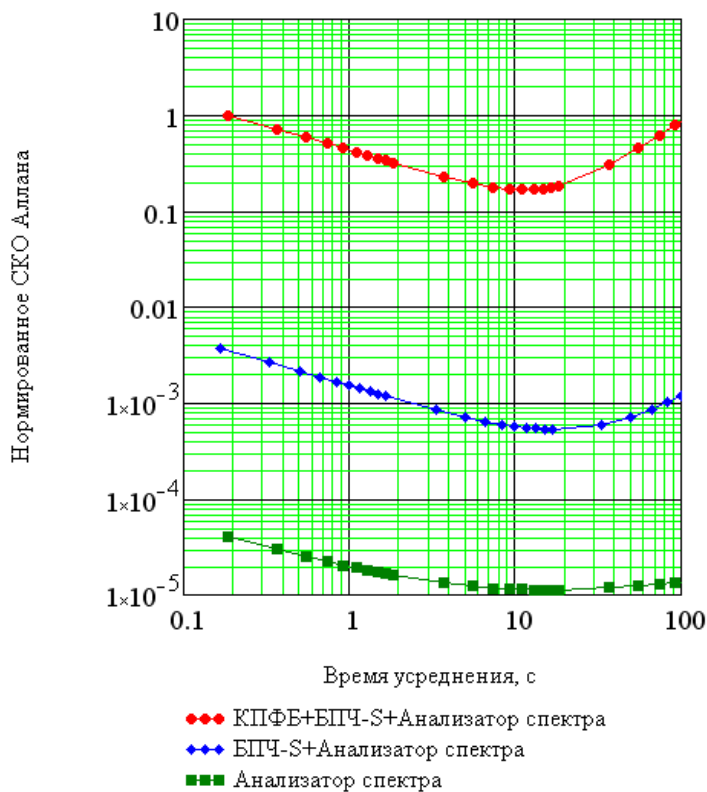
ST – время обзора (сви́пирования)

T – реальный период регистрации
 ($T > ST$ из-за задержек)

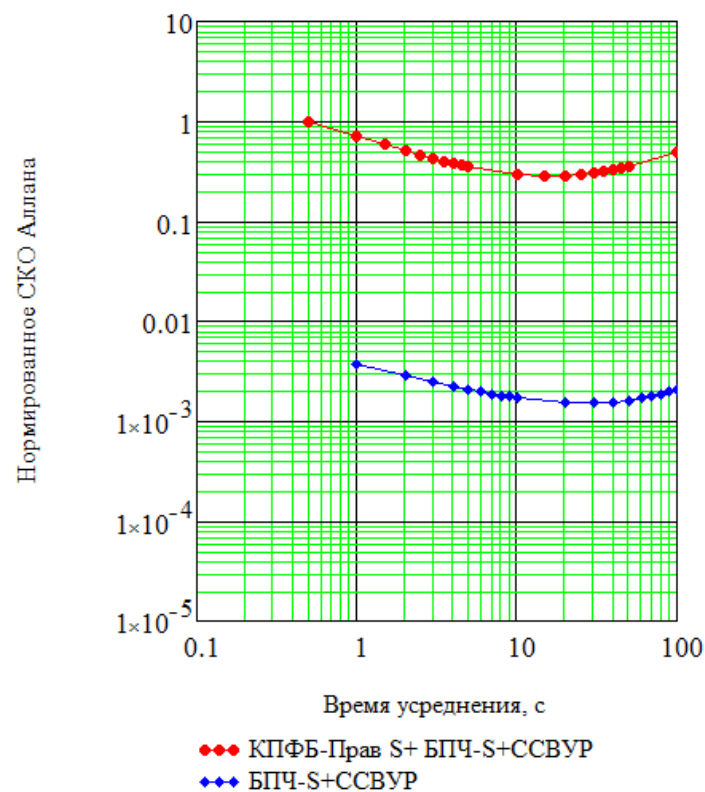
S-диапазон. Покаскадное исследование стабильности

Измерения $P_{\text{вых}}$ в полосе $\Delta f = 84$ МГц (2286-2370 МГц)

Анализатор спектра
Agilent N9030A



Спектрально-селективное
выходное устройство радиометра



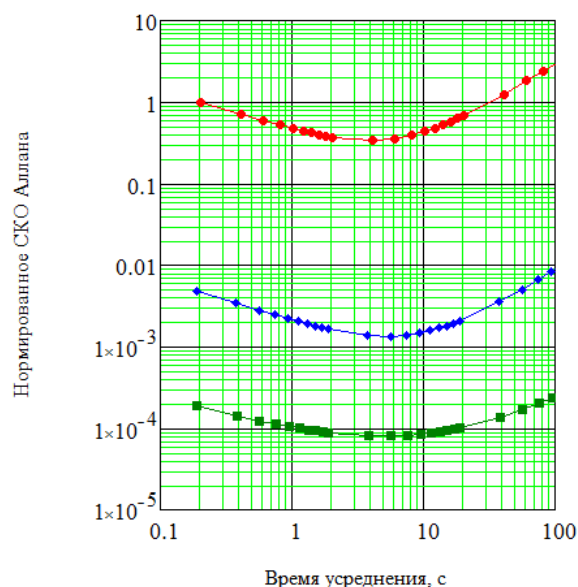
Х-диапазон. Покаскадное исследование стабильности

Измерения $P_{\text{вых}}$ в полосе $\Delta f = 900$ МГц (8200-9100 МГц)

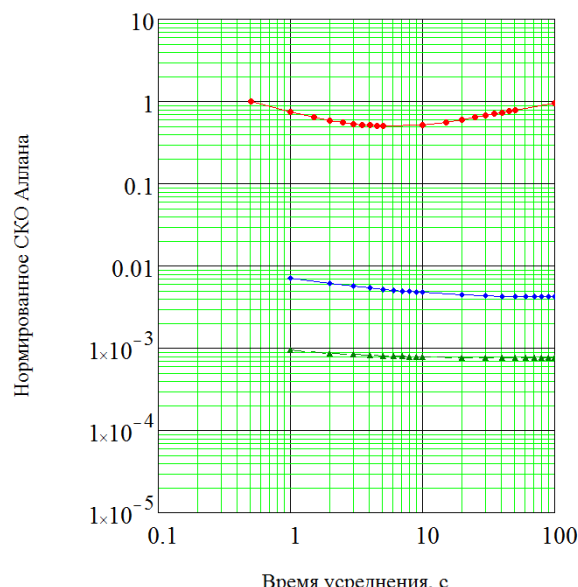
Анализатор спектра
Agilent N9030A

Спектрально-селективное
выходное устройство
радиометра

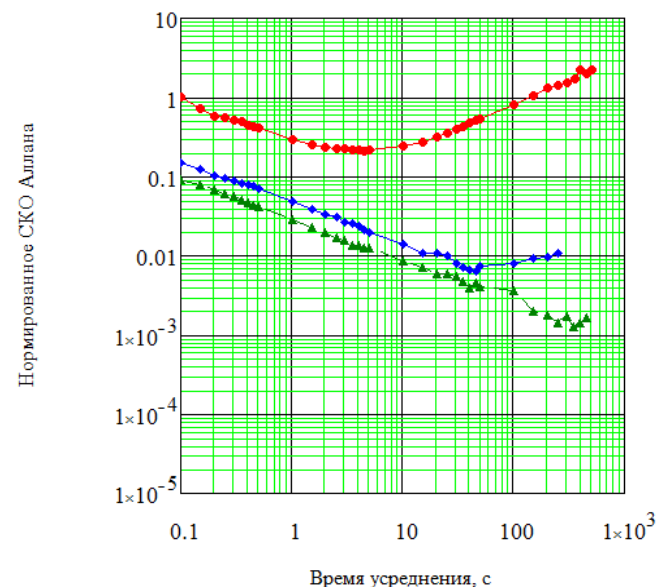
Измеритель мощности
Agilent N1914A



- КПФБ+БПЧ-Х+Анализатор спектра
- ◆◆◆ БПЧ-Х+Анализатор спектра
- ■ ■ Анализатор спектра



- КПФБ-Х+ БПЧ-Х+ССВУР
- ◆◆◆ БПЧ-Х+ССВУР
- ▲▲▲ ССВУР



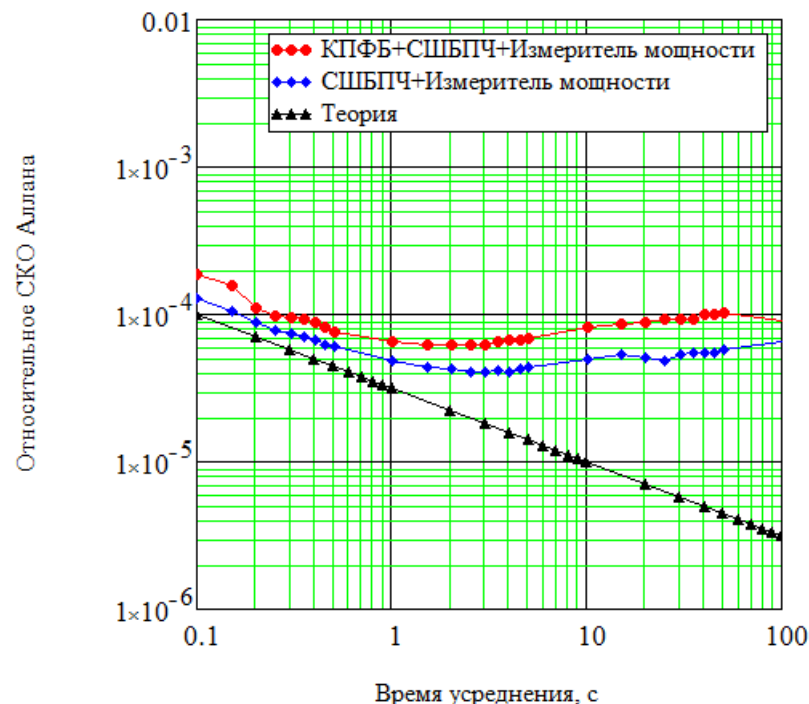
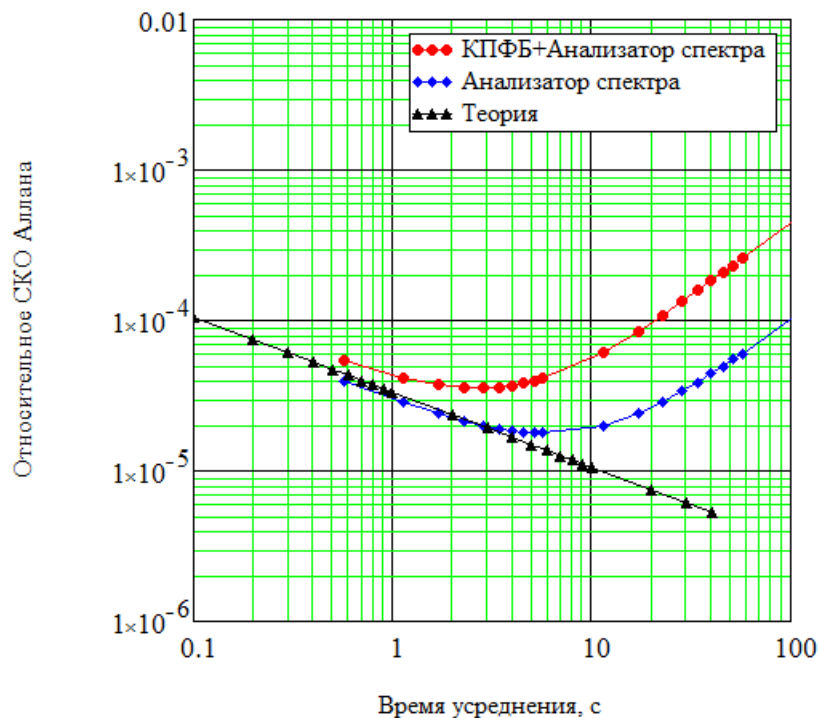
- КПФБ+БПЧ-Х+Измеритель мощности
- ◆◆◆ БПЧ-Х+Измеритель мощности
- ▲▲▲ Измеритель мощности

Ка-диапазон. Покаскадное исследование стабильности

Измерения $P_{\text{вых}}$ в полосе $\Delta f = 900$ МГц (29-29,9 ГГц)

Анализатор спектра
Agilent N9030A

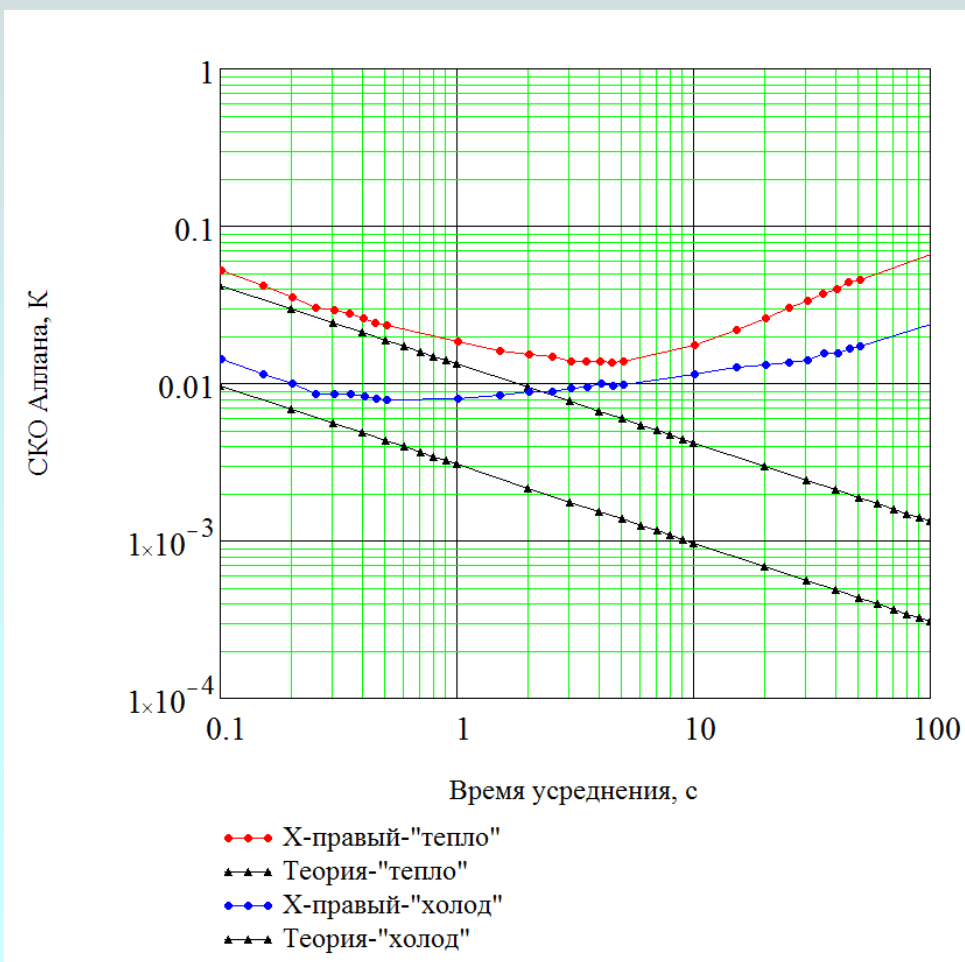
Сверхширокополосный БПЧ +
измеритель мощности Agilent N1914A



Х-диапазон. Сравнение результатов измерения стабильности в «тепле» и «холоде»

Измерения $P_{\text{вых}}$ в полосе $\Delta f = 900$ МГц (8200-9100 МГц)

БПЧ-Х + измеритель мощности Agilent N1914A



Теория:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}$$

$$T = T_H + T_{\text{кпфб}}$$

«Тепло»:

$$T = 300 + 100 = 400 \text{ K}$$

«Холод»:

$$T = 82 + 10 = 92 \text{ K}$$

Результаты исследования стабильности КПФБ в S-, X-, Ka-диапазонах

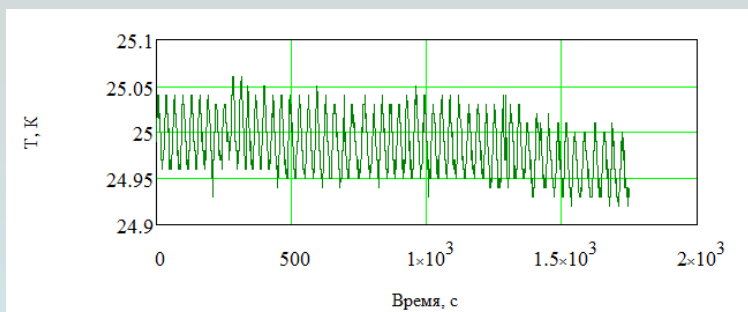
		«Тепло»			«Холод»		
	Полоса, МГц	T _{ОПТ} , с	Относительное СКО Аллана		T _{ОПТ} , с	Относительное СКО Аллана	
			на T _{ОПТ} , с	на 100 с		на T _{ОПТ} , с	на 100 с
S-лев	84	10	$4 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
S-прав	84	10	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$
X-лев	900	2	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
X-прав	900	3	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1	$9 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Ka-лев	900	1	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	1	$5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Ka-прав	900	1	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	1	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Влияние криогенных температур

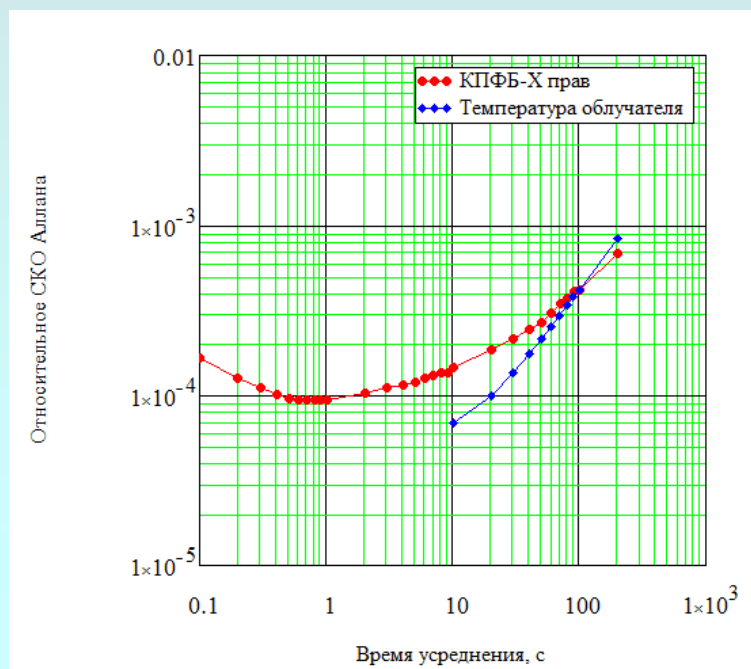
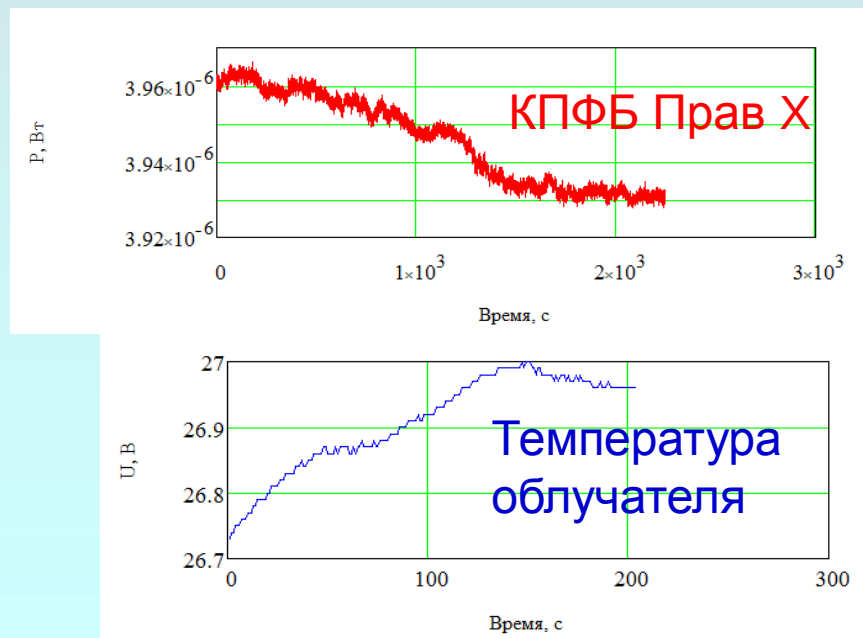
Коэффициент влияния $K_t = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta T$

Диапазон	Коэффициент влияния, 1/К
S	-0,0133
X	-0,0085
Ka	-0,0155

Температура 2 степени



$T=5$ мин



Заключение

1) Дисперсию Аллана удобно использовать в качестве сравнительной характеристики стабильности радиометров и их узлов. Она позволяет:

- определить интервал стабильности - оптимальное время усреднения сигнала, при котором достигается минимум дисперсии шума;
- выделить вклад различных составляющих шума (белый шум, $1/f$, $1/f^2$, временной дрейф) на конкретных временных интервалах.

2) Разработана методика коррекции дисперсии Аллана при регистрации сигналов с «мертвым временем» и она применена при измерениях мощности широкополосного шума анализатором спектра.

3) Исследована стабильность выходных сигналов криогенного приемного фокального блока каналов левой и правой поляризации S, X, Ka-диапазонов. Интервалы стабильности в «теплом» режиме для каналов S-диапазона составляют 10 с, для X-диапазона - 4 с, для Ka-диапазона - 2 с, а в «холодном» режиме 2 с, 1 с, 1 с, соответственно. Временной дрейф в «холодном» режиме связан с температурными процессами установления после смены нагрузок.

4) В некоторых экспериментах проявилось влияние нестабильности систем регистрации (включая использованные блоки преобразования частоты) на результаты измерения стабильности КПФБ. Необходимы дальнейшие исследования и усовершенствования систем регистрации.

Спасибо за внимание!