

## V. Измерительные средства для локальных измерений

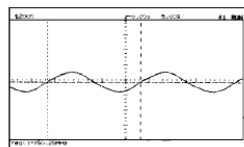
1. Фидеры сигналов.
2. Распределительные усилители и  $\mu$ -stepper.
3. Коммутаторы и мультиплексоры.
4. Измерители интервалов времени.
5. Фазовые компараторы.
6. Методы и средства определения неопределенности измерений типа  $u_A$  и  $u_B$ .

### Фидеры сигналов

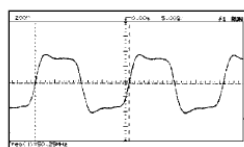
Основные параметры, на которые следует обращать внимание при выборе фидеров:

- полоса пропускания (затухание в фидере);
- фазовая стабильность (вносимые вариации фазы при заданных температурных перепадах, особенно вне помещения);
- обратные потери (КСВН);
- коэффициент экранирования;

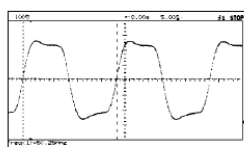
### Полоса пропускания



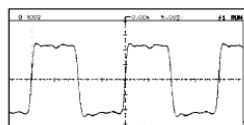
50-MHz square wave on 20-MHz scope



50-MHz square wave on 100-MHz scope

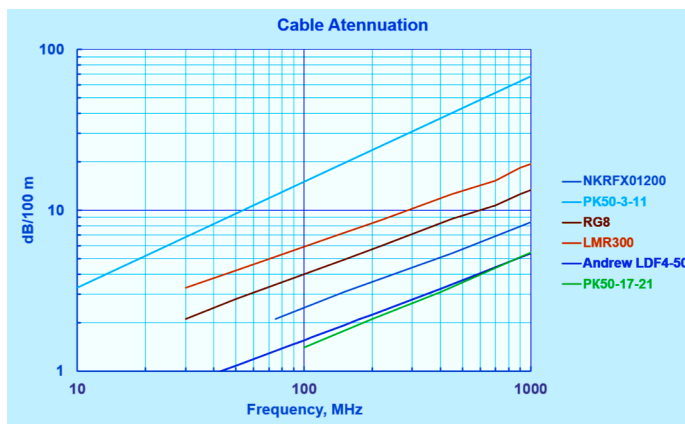


50-MHz square wave on 150-MHz scope



50-MHz square wave on 500-MHz scope

Рис. 32



For a typical instrument, the relationship between rise time and bandwidth is:

$$T_r = \frac{0.35}{3\text{-dB bandwidth (in hertz)}}$$

For timing measurements, the higher the ratio of signal rise time to scope rise time, the smaller the error. See the table below.

Ratio of Signal $T_r$ to scope $T_r$	Calculated measurement error
1:1	41.4%
3:1	5.4%
5:1	2.0%
10:1	0.5%

Рис. 33

**Фазовая стабильность**

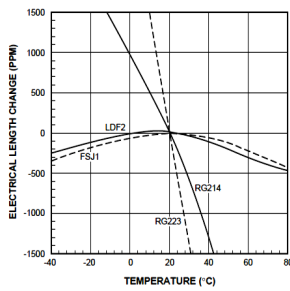


Figure 1

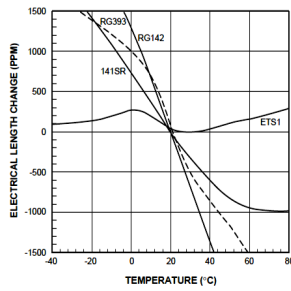


Figure 2

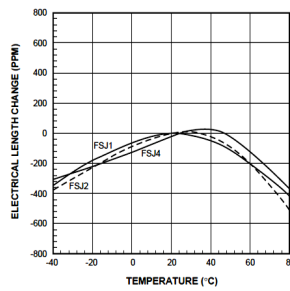


Figure 3 – Electrical Length Change vs. Temperature  
FSJ1-50A, FSJ2-50, FSJ4-50B

Рис. 34

Для фидера LDF4 длиной 90 м и перепаде температур 10-30 °С на частоте 10 MHz вариация фазы  $\Delta\varphi_{LDF4} = 67 \text{ ps} = 90\text{m} \cdot (10-30)^\circ\text{C} \cdot 10 \text{ MHz}$

**Обратные потери (КСВН)**



Рис. 35

Приличную величину КСВН можно получить только, используя высококачественные фидеры и ВЧ разъемы. В ГЭВЧ используются фидеры типа FSJ и LDF, разъемы HELIAX от ANDREW.

**Коэффициент экранирования**

Mechanical Specifications			
Weight, lb-ft (kg-m)	0.02 (0.03)		
Minimum Bend Radius (multiple), in (mm)	0.50 (12.7)		
Electrical Specifications			
Cable Impedance, ohms	50		
Maximum Frequency, MHz	18000.00		
Velocity Percentage	76		
Peak Power, kW	3.0		
Inner Conductor dc Resistance, ohms/kft (ohms/km)	6.48 (21.26)		
Outer Conductor dc Resistance, ohms/kft (ohms/km)	4.20 (14.13)		
Capacitance, pF/ft (pF/m)	27.30 (89.808)		
Inductance, uH/ft (uH/m)	0.980 (0.320)		
Shielding Effectiveness, dB	+120		
Cable Test Voltage, Vdc	1100		
Dimensions			
Diameter Over Jacket, in (mm)	0.16 (4.26)		
Outer Conductor Outside Diameter, in (mm)	0.14 (3.58)		
Inner Conductor Outside Diameter, in (mm)	0.04 (1.02)		
Performance			
Frequency MHz	Attenuation @100 ft (dB/100 m)	Attenuation @500 ft (dB/150 m)	Average Power (dBm)
900	10.80	25.25	0.60
1500	15.50	44.25	0.40
2000	15.80	52.16	0.30



Рис. 36

Приличную величину экранирования (~120 dB) можно получить только, используя высококачественные фидеры. В ГЭВЧ используются фидеры типа FSJ и LDF от ANDREW.

### Распределительные усилители и $\mu$ -stepper



Сигналы 5 MHz - 10 MHz. Фазовая стабильность 1.2 ps/°C  
Изоляция OUT/OUT 140 dB OUT/IN 145 dB



Сигналы 100 MHz  
Изоляция OUT/OUT 100 dB OUT/IN 110 dB



1 PPS Фронт 3 ns. Фазовая стабильность 3ps/°C



Сигналы 1 PPS, 5 MHz & 10 MHz. Фазовая стабильность 3ps/°C  
Изоляция OUT/OUT 130 dB OUT/IN 140 dB



Рис. 37

$\mu$ -stepper

Разрешение по времени 0.047 fs  
Разрешение по частоте  $5 \cdot 10^{-19}$

Девияция Аллана  $\sigma_y(t)$   
при отстройке  $\Delta f = 1 \cdot 10^{-12}$

1s	$9 \cdot 10^{-14}$
10s	$9 \cdot 10^{-15}$
100s	$4 \cdot 10^{-15}$
1000s	$4 \cdot 10^{-15}$

## Коммутаторы и мультиплексоры ЗАО ВРЕМЯ-Ч



Коммутатор высокочастотных сигналов VCH-604  
2×25 - 2×2. Полоса частот ≤ 100 MHz  
*Вносимые фазовые шумы ненормированы*

ОАО ННИПИ «КВАРЦ»



Коммутатор высокочастотных сигналов 115  
50×5. Полоса частот ≤ 100 MHz  
Рис. 38

*Вносимые фазовые шумы ненормированы*



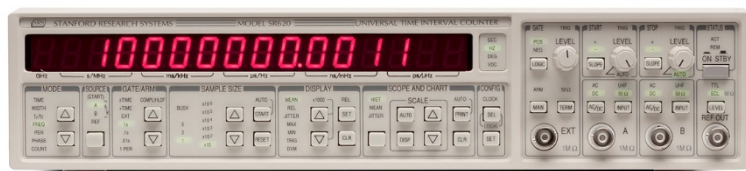
Полностью электронный мульти-  
плексер (Без реле),  
9 каналов (ВІ301) или  
18 каналов (ВІ302)  
Частотный диапазон DC to 5 GHz.  
Вносимые шумы:  
Меандр: <2 ps  
Синусоидальный:  
Частота > 100 MHz: 2 ps  
Частота < 100 MHz: 2 ps + порог  
запуска.

Рис. 39

## Измерители интервалов времени



CNT-90. Входное сопротивление: 1 МΩ or 50 Ω.  
Разрешение единичного счета 100 ps.  
Точность не специфицирована.



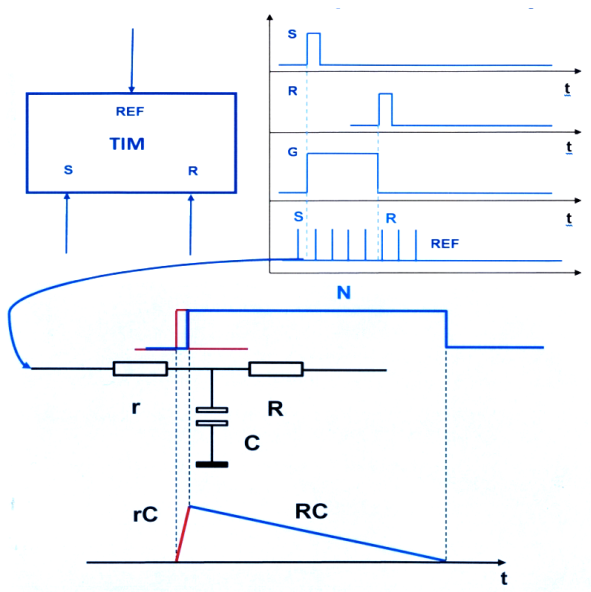
SR 620. Входное сопротивление: 1 МΩ or 50 Ω.  
Разрешение единичного счета 25 ps.  
Точность 500 ps.



GT668PXI-1. Входное сопротивление: 1 kΩ or 50 Ω.  
Разрешение единичного счета 2 ps.  
Точность 10 ps.

Рис. 40

**Принцип работы интерполяционного измерителя интервалов времени**

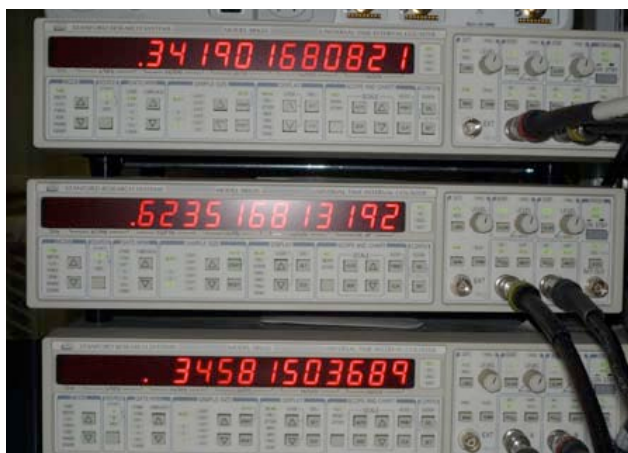


Принцип работы интерполяционного измерителя интервалов времени заключается в счете целых периодов сигнала, когерентного с опорным, и калиброванной растяжки дробных долей на старте и стопе.

$$dT = N \cdot REF + S - R.$$

Рис. 41

**Методы и средства определения неопределенности измерений типа  $u_A$  и  $u_B$**   
(на примере SR 620)



Применение метода трех генераторов для оценки неопределенности типа  $u_A$  и типа  $u_B$  время-частотных средств измерений.

С. Болгинова, Н. Кошеляевский, С. Пестерев, Е. Попкова.

Process proceedings  
IFCS-EFTF2013

Рис. 42



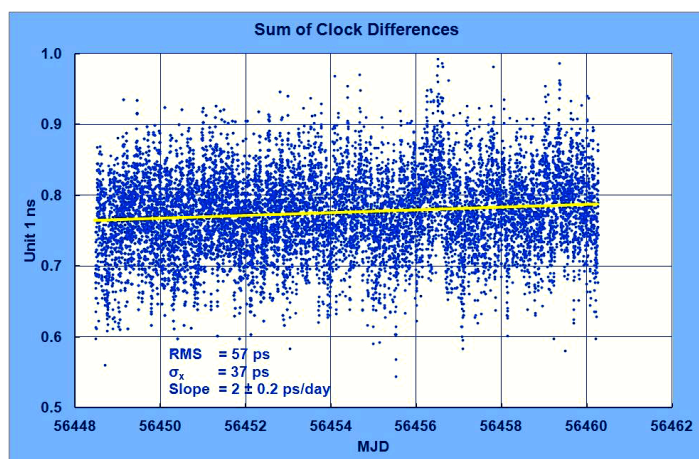


Рис. 43

Для определения неопределенности типа  $u_A$  при измерениях интервала времени с помощью трех однотипных измерителей интервалов времени и трех часов организуется треугольник измерений:

$(Cl_1 - Cl_2)_{TIM1} + (Cl_2 - Cl_3)_{TIM2} + (Cl_3 - Cl_1)_{TIM3} \equiv 0$ . При этом необходимо, чтобы в каждой паре  $Cl_i - Cl_j$  опорный сигнал был  $k \neq i, j$ . Остаточный наклон  $\sim 2$  ps/day говорит о систематике в измерении приращений, эквивалентных разности частот  $\sim 2 \cdot 10^{-17}$ , что само по себе достаточно достойно.

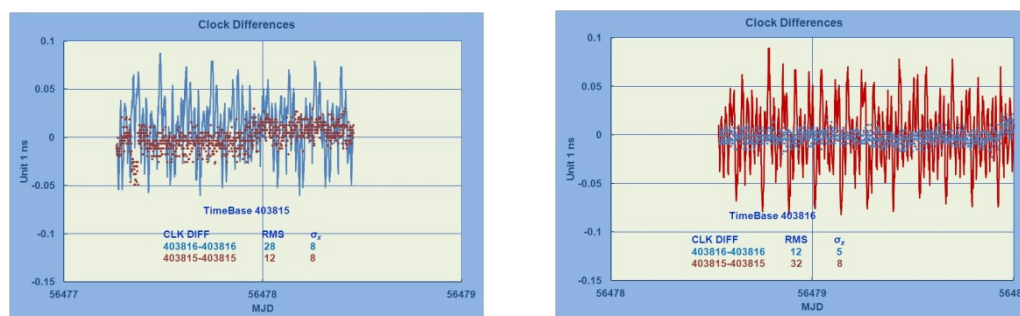


Рис. 44

С другой стороны, если посмотреть на поведение индивидуальных разностей  $(Cl_i - Cl_j)_{TIMk}$ , то четко видны источники детерминированных составляющих. Период наиболее значимых пиков около 0.13 суток. Разность частот между H-мазерами 403815 и 403816 около  $98.8 \cdot 10^{-14}$ , что соответствует набегу 85.3 нс в сутки. Частота внутренних часов SR 620 равна 90 МГц, что соответствует периоду 11.1 нс. Каждые 0.13 суток разность 1 Гц сигналов упомянутых мазеров накапливает около 11.1 нс.

Это просто означает, что очень трудно обеспечить требуемый уровень развязки между сигналами в электронном приборе.

Если необходимо провести измерительные процедуры по оценке реальной величины разрешающей способности прибора (неопределенности типа  $u_A$ ), следует принимать во внимание все возможные источники перекрестных искажений и ни при каких обстоятельствах не использовать набор когерентных (от одного и того же источника) сигналов.

В представленном случае разница в оценках величин  $u_A$  для когерентных и некогерентных сигналов может достигать трех раз. Причем, не играет роли, какие сигналы когерентны: входные 1 Гц или 1 Гц и опорный 10 МГц.

### Фазовые компараторы Принцип работы фазового компаратора

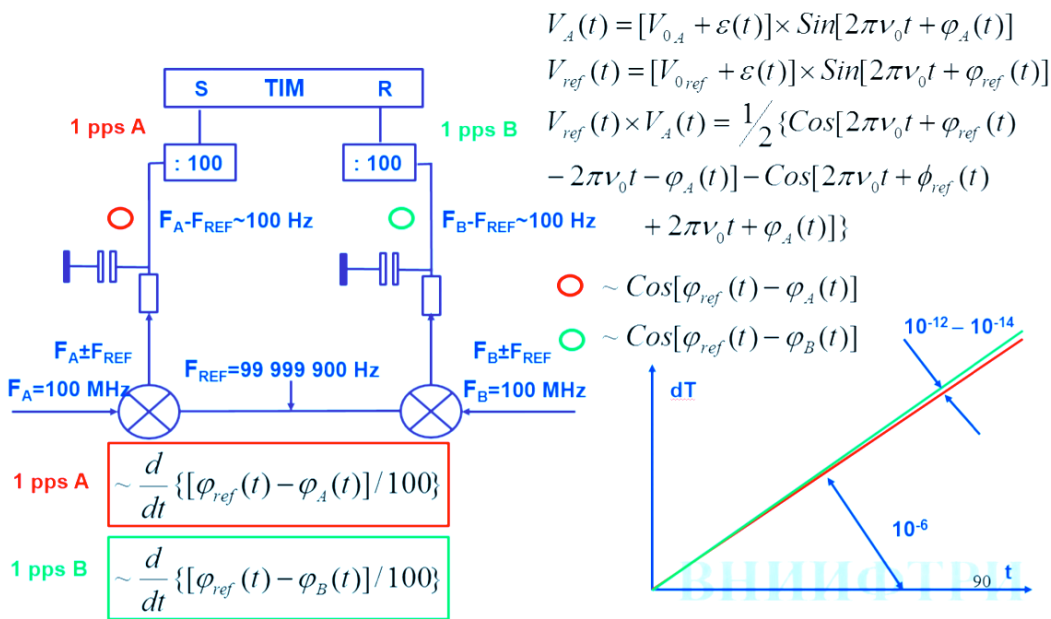


Рис. 45

Фазовый компаратор это двойной балансный смеситель, в котором происходит перенос исследуемого сигнала в низкочастотный спектральный диапазон (на примере из 100 МГц до 100 Гц) без потери девиации фазы.



Таблица 5

**Performance Specification**

	5 MHz		10 MHz		100 MHz	
Input level	+3 .. +15 dBm		+3 .. +15 dBm		+0 .. +7 dBm	
... for optimal performance	+7 .. +15 dBm		+7 .. +15 dBm		+5 .. +7 dBm	
<b>Residual ADEV</b>	5 MHz		10 MHz		100 MHz	
	spec	typ	spec	typ	spec	typ
1 sec	$6.0 \cdot 10^{-14}$	$3.0 \cdot 10^{-14}$	$3.0 \cdot 10^{-14}$	$2.5 \cdot 10^{-14}$	$2.5 \cdot 10^{-14}$	$1.8 \cdot 10^{-14}$
10 sec	$1.5 \cdot 10^{-14}$	$9.1 \cdot 10^{-15}$	$6.0 \cdot 10^{-15}$	$4.3 \cdot 10^{-15}$	$3.5 \cdot 10^{-15}$	$2.3 \cdot 10^{-15}$
100 sec	$4.0 \cdot 10^{-15}$	$2.6 \cdot 10^{-15}$	$1.2 \cdot 10^{-15}$	$8.1 \cdot 10^{-16}$	$5.0 \cdot 10^{-16}$	$3.3 \cdot 10^{-16}$
1 000 sec <sup>(1)</sup>	$1.0 \cdot 10^{-15}$	$5.2 \cdot 10^{-16}$	$2.5 \cdot 10^{-16}$	$1.6 \cdot 10^{-16}$	$1.2 \cdot 10^{-16}$	$8.4 \cdot 10^{-17}$
10 000 sec <sup>(1)</sup>	$3.0 \cdot 10^{-16}$	$9.9 \cdot 10^{-17}$	$9.0 \cdot 10^{-17}$	$5.5 \cdot 10^{-17}$	$4.0 \cdot 10^{-17}$	$2.7 \cdot 10^{-17}$
100 000 sec <sup>(1)</sup>	$3.0 \cdot 10^{-16}$	$9.9 \cdot 10^{-17}$	$9.0 \cdot 10^{-17}$	$5.5 \cdot 10^{-17}$	$2.0 \cdot 10^{-17}$	$5.5 \cdot 10^{-18}$

**Phase Comparator**

6 channels, 100 MHz with 5/10 MHz Option

Part No: 10265



Рис. 46

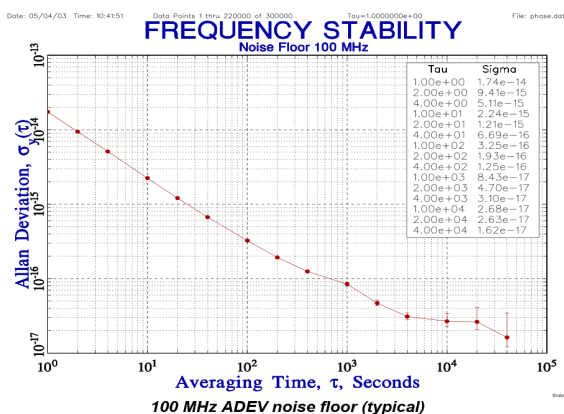


Рис. 47

(Все измерения проводились в лаборатории с температурными показателями от +18 до + 24 C°, ~4 крр (?), без работы кондиционера). Фазовый компаратор был синхронизирован на исходный источник с пассивным разветвителем.

**Методы и средства определения  
неопределенности измерений типа  $u_A$  и  $u_B$**   
(на примере фазового компаратора TimeTech 10265)

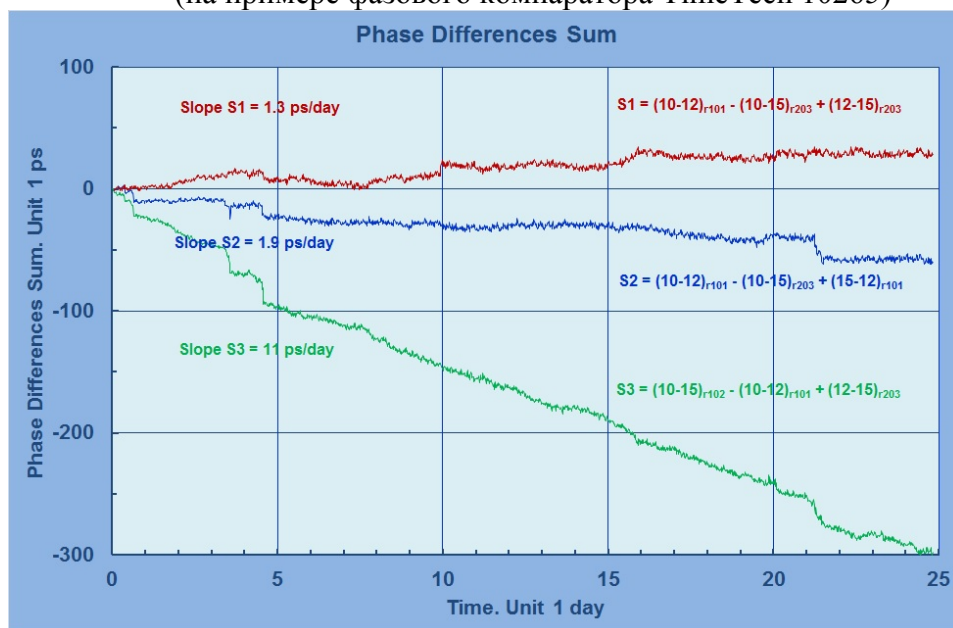


Рис. 48

Таблица 6

Room No	Ch No	Ch No	Ch No	Ch No	Ch No	Ch No REF
	1	2	3	4	5	6
101	403811	403812	403815	403810	403809	403812
102	403811		403812	403810	403815	403810
203	403816	403815	403814	403812	403810	403815

Принцип, аналогичный рассмотренному ранее для измерителей интервалов времени, – замыкание треугольника. Можно ожидать, что круговые замыкания типа  $(Cl_i - Cl_j) + (Cl_j - Cl_k) + (Cl_k - Cl_i) \equiv 0$ . Видимые наклоны говорят о наличии систематики, которая ограничивает неопределенность типа  $u_B$  измерений частоты. Типичные величины  $u_B \sim 2-3 \cdot 10^{-17}$ . Наряду с этим для канала 5 в к. 203 компаратора величина  $u_B$  составляет  $\sim 1.5 \cdot 10^{-16}$ .

На приведенных ниже рисунках даны оценки  $u_A$  на основе того же источника данных. Очевидно, что использование когерентных сигналов даёт явно завышенные некорректные оценки разрешающей способности измерений.

Следует напомнить: в ежедневной измерительной практике фазовые компараторы используются для оценки нестабильности частоты источников относительно друг друга либо измерений разностей частот часов, то есть работают с принципиально некогерентными сигналами.

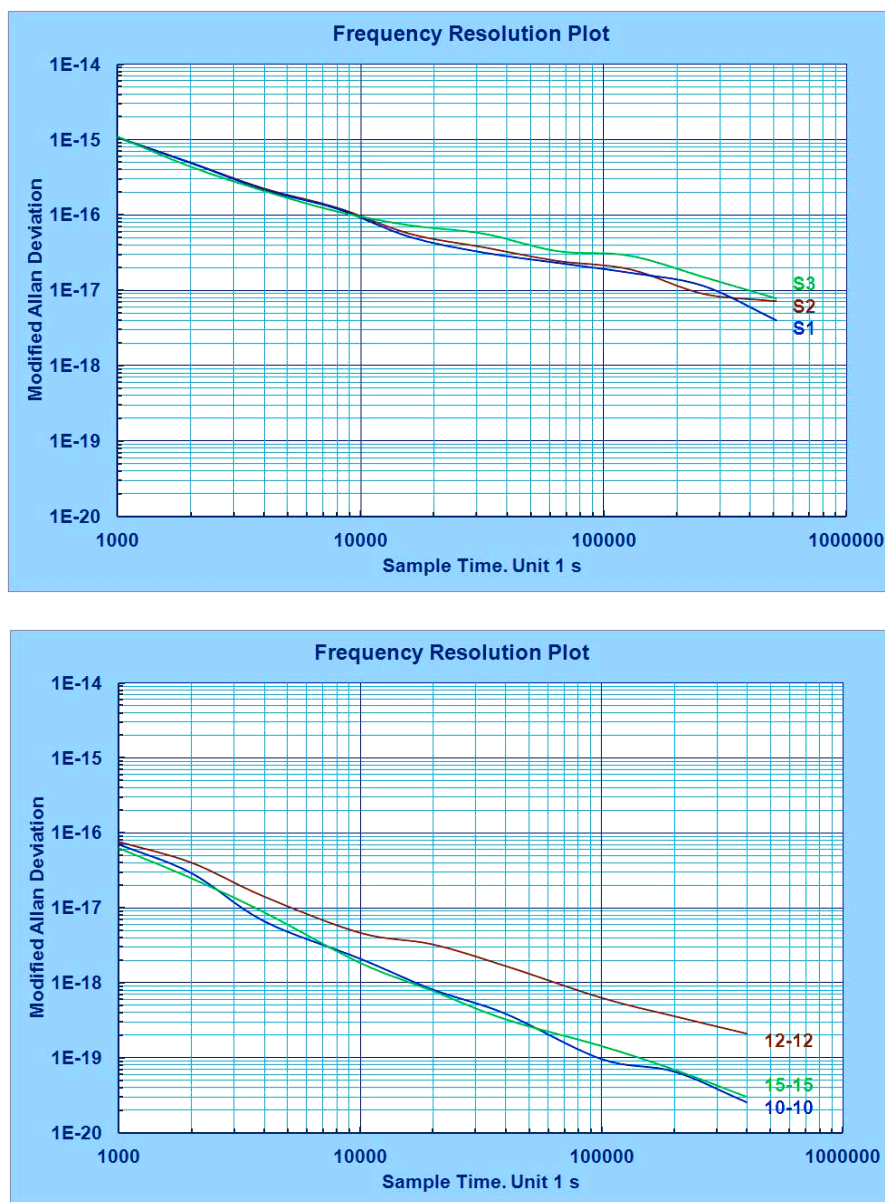


Рис. 49