

### Флуктуации частоты водородного стандарта

А.А.Беляев, Б.А.Сахаров <sup>1</sup>

ЗАО "Время-Ч", ул. Ошарская 67, Нижний Новгород 603105, Россия

А.К.Козлов, А.В.Якимов <sup>2</sup>

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского  
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия

С помощью машинно-ориентированной методики анализа флуктуаций в генераторных системах [1] определено выражение для спектра относительных флуктуаций частоты выходного сигнала водородного стандарта. Выявлено, что основной вклад в итоговые флуктуации вносят флуктуации водородного лазера, кварцевого генератора, СВЧ приемника и выходного буферного усилителя. Проанализирован спектр флуктуаций частоты выходного сигнала стандарта VCH-1003A (ВРЕМЯ-Ч, Нижний Новгород) [2]. На частотах ниже  $10^{-2}$  Гц результирующий спектр определяется водородным лазером. Флуктуации, вносимые СВЧ приемником, существенны в диапазоне частот  $10^{-2}$  – 1 Гц. Высокочастотную ветвь спектра (начиная с 1 Гц) практически полностью описывают технические и естественные шумы кварцевого генератора.

#### Введение

Проблема создания высокостабильных источников автоколебаний привела к необходимости изучения различного рода флуктуационных воздействий на подобные системы. При этом одной из наиболее важных является проблема получения стабильных и достаточно мощных автоколебаний. Существует два распространенных способа её решения:

- синхронизация мощных, но нестабильных автогенераторов эталонным сигналом – стабильным маломощным источником;
- совместная работа нескольких эталонов, взаимосвязанных таким образом, чтобы их связанные колебания оказались стабильнее свободных автоколебаний каждого из них.

Рассматриваемый в данной статье водородный стандарт частоты состоит из водородного лазера (как источника опорного сигнала) и прецизионного кварцевого генератора, который управляется с помощью весьма сложной аналого-цифровой системы фазовой автоподстройки частоты. Подобные стандарты обеспечивают, на сегодняшний день, рекордные показатели долговременной стабильности частоты. Дальнейшее улучшение стабильности наталкивается на серьезные проблемы, связанные, в частности, с недостаточным пониманием процессов, происходящих при корректировке частоты. Более того, выяснилось, что даже в неперестраиваемом

<sup>1</sup> Тел: +7-8312-354294, Факс: +7 8312-356306. E-mail: vremyach@pop.sci-unnov.ru

<sup>2</sup> Тел: +7-8312-656153, Факс: +7-8312-656416, E-mail: yakimov@rf.unn.runnet.ru

стандарте весьма мало изучены процессы, приводящие к флуктуациям частоты выходного сигнала. В этой связи возникла необходимость исследования “тонких” флуктуационных процессов, происходящих в стандарте. Целью настоящей статьи является исследование собственных шумов водородного стандарта VCH-1003A (ВРЕМЯ-Ч, Нижний Новгород) [2].

### Принцип работы стандарта

Исследуются относительные флуктуации частоты выходного сигнала активного водородного стандарта частоты [3]. Общая схема стандарта изображена на рис. 1.

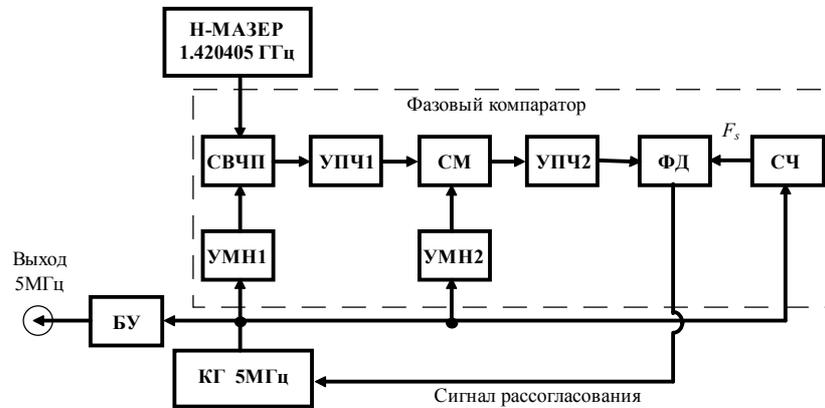


Рис. 1. Блок-схема водородного стандарта частоты

Сигналы с водородного мазера частотой немногим больше 1,4 ГГц и с кварцевого генератора “КГ” 5 МГц поступают на фазовый компаратор (на рис.1 он изображен пунктирной линией), который на основе обобщенной разности фаз этих сигналов вырабатывает сигнал рассогласования, управляющий кварцевым генератором.

Фазовый компаратор состоит из умножителей частоты “УМН1” и “УМН2”, усилителей промежуточной частоты “УПЧ1” и “УПЧ2”, СВЧ приемника совместно со смесителем “СВЧП”, смесителя “СМ”, синтезатора частоты “СЧ” и фазового детектора “ФД”. Сигналы с Н-мазера и кварцевого генератора, преобразованные этими блоками на частоту  $F_s$ , примерно равную 405 кГц, попадают на фазовый детектор, состоящий из смесителя и пропорционально интегрирующего операционного усилителя. С выхода детектора снимается сигнал рассогласования, пропорциональный разности фаз этих двух сигналов, определяемой на промежуточной частоте  $F_s$  синтезатора частоты. Выходной сигнал стандарта частотой 5 МГц снимается с буферного усилителя “БУ”, куда он поступает с кварцевого генератора.

**Метод анализа флуктуаций**

При исследовании флуктуаций амплитуды и фазы в данной системе применялась машинно-ориентированная методика анализа флуктуаций в генераторных системах. Подробно этот метод описан в [1]. Основная его идея заключается в представлении амплитудно-фазовых флуктуаций сигнала в виде вектор-столбца, а уравнений, описывающих флуктуационные процессы в исследуемом генераторном устройстве, – в матричном виде.

Для примера можно рассмотреть некоторый блок (рис. 2), на вход которого поступают два сигнала с флуктуациями амплитуды и фазы  $[m_1, \varphi_1]^T$  и  $[m_2, \varphi_2]^T$ . С выхода снимается сигнал с флуктуациями  $[m_3, \varphi_3]^T$ , которые зависят от входных согласно следующему выражению:

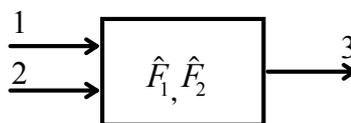


Рис. 2. Пример метода

$$\begin{pmatrix} m_3 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} = \hat{F}_1 \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix} + \hat{F}_2 \cdot \begin{pmatrix} m_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_m \\ e_\varphi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

здесь  $\hat{F}_1, \hat{F}_2$  – матрицы преобразования входных сигналов, в общем случае они могут быть разными для различных сигналов, а вектор-столбец  $[e_m, e_\varphi]^T$  составлен из амплитудно- и фазоактивных компонент собственного шума блока.

**Спектр выходного сигнала стандарта**

Используя вышеописанную методику, проанализированы все блоки фазового компаратора. Так как усилители и умножители системы довольно точно настроены на частоту сигнала (выполняется соотношение  $f_0 \ll \Pi, f_0$  – частота отстройки сигнала от собственной частоты блока,  $\Pi$  – полоса пропускания блока), то с большой точностью кросс-преобразованиями АМ–ФМ и ФМ–АМ в соотношениях вида (1) можно пренебречь. Это позволяет фазовые флуктуации рассматривать независимо от амплитудных. Здесь приводятся данные, полученные без учета инерционности усилителей и умножителей частоты, отражающие специфику эффектов фазовой синхронизации.

На основании проведенного анализа можно сказать, что основной вклад в флуктуации выходного сигнала водородного стандарта частоты вносят флуктуации лазера, СВЧ приемника (сигнала лазера), кварцевого генератора и буферного усилителя стоящего на выходе стандарта. Для спектра  $S_y(f)$  относительных флуктуаций частоты выходного сигнала получено выражение [3–4]:

$$S_y(f) = \frac{\Phi_p^2}{\Phi_p^2 + f^2} \cdot [S_{yH}(f) + S_{yR}(f)] + \frac{f^2}{\Phi_p^2 + f^2} \cdot S_{yQ}(f) + S_{yA}(f), \quad (2)$$

где  $S_{yQ}(f)$ ,  $S_{yH}(f)$  – спектры собственных относительных флуктуаций частоты кварцевого генератора и водородного лазера;  $S_{yR}(f)$ ,  $S_{yA}(f)$  – спектры относительных флуктуаций частоты, вносимых СВЧ приемником и буферным усилителем;  $f$  – частота отстройки от несущей,  $\Phi_p(f)$  – функция передачи разомкнутой системы ФАП.

Функция передачи  $\Phi_p(f)$  зависит от параметров системы следующим образом:

$$\Phi_p(f) = \frac{1}{2} \cdot f_Q \cdot \chi_c \cdot \chi_d \cdot N \cdot |K(f)|. \quad (3)$$

Здесь  $f_Q$  – частота кварцевого генератора (выходная частота стандарта),

$\chi_c = df/dU_{упр}$  [1/В] – крутизна перестройки кварцевого генератора ( $U_{упр}$  – управляющее напряжение),

$\chi_d = 2\pi \cdot dU_{вых}/d\Delta\varphi$  [В] – крутизна фазового детектора ( $U_{вых}$  – напряжение на выходе,  $\Delta\varphi$  – разность фаз на входе фазового детектора),

$N$  – отношение частоты водородного лазера к частоте кварцевого генератора (суммарный коэффициент умножения в системе ФАПЧ),

$$K(f) = -k_0 \frac{1 + j2\pi f\tau_2}{1 + k_0 j2\pi f\tau_1} \quad (4)$$

– комплексный коэффициент передачи пропорционально интегрирующего операционного усилителя цепи ФАПЧ, изображенного на рис. 3, при  $k_0 \gg 1$  (здесь  $\tau_1 = R_1 C$ ,  $\tau_2 = R_2 C$ ). Для частот  $f > 1/k_0 \tau_1$  ( $f > 10^{-5}$  Гц) коэффициент передачи считаем равным:

$$K(f) = \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{j2\pi f\tau_1}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (5), (3) в (2) и вводя характерные частоты:

$$f_h = f_Q \cdot \chi_c \cdot \chi_d \cdot N \cdot \frac{R_2}{2 \cdot R_1}, \quad f_l^2 = \frac{f_Q \cdot \chi_c \cdot \chi_d \cdot N}{4\pi \cdot \tau_1}, \quad (6)$$

получаем окончательное выражение для спектра  $S_y(f)$  относительных флуктуаций частоты выходного сигнала стандарта:

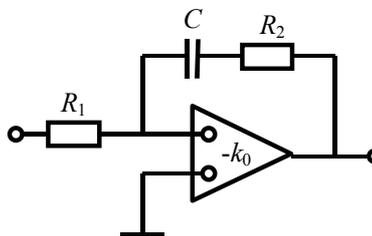


Рис. 3. Функциональная схема пропорционально интегрирующего операционного усилителя

$$S_y(f) = \frac{f_h^2 \cdot f^2 + f_l^4}{f_h^2 \cdot f^2 + f_l^4 + f^4} \cdot [S_{yH}(f) + S_{yR}(f)] + \frac{f^4}{f_h^2 \cdot f^2 + f_l^4 + f^4} \cdot S_{yQ}(f) + S_{yA}(f). \quad (7)$$

Для исследуемой системы использовались параметры:

$R_1=75$  кОм,  $R_2=110$  кОм,  $C=6,8$  мФ,  $\chi_c=0,7 \cdot 10^{-8}$  1/В,  $\chi_d=0,27$  В,  $N \cong 284$ , что дает  $f_h \cong 1,9$  Гц,  $f_l \cong 0,4$  Гц.

#### Основные источники неустойчивости

Как уже отмечалось, основной вклад во флуктуации выходного сигнала водородного стандарта частоты вносят флуктуации мазера, СВЧ приемника, кварцевого генератора и буферного усилителя. Данные для собственных шумов встроенного кварцевого генератора представлены в спецификации (данные для дисперсии Аллена и спектр относительных фазовых флуктуаций) [5].

Рассчитаем тепловые шумы [6], вносимые СВЧ приемником и буферным усилителем. Их эквивалентная схема изображена на рис.4. Тепловые шумы прибора рассчитываются исходя из формулы Найквиста:

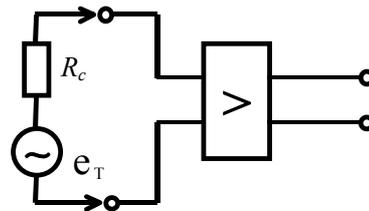


Рис. 4. Эквивалентная схема

$$\langle e_T^2 \rangle_f = 4kT \cdot R_N = 4kT \cdot R_c \cdot F_N, \quad (8)$$

где  $R_N$  – шумовое сопротивление,  $R_c$  – сопротивление нагрузки,  $F_N$  – коэффициент шума [7].

Вносимые флуктуации фазы описываются спектром

$$\langle \varphi_{in}^2 \rangle_f = \frac{2 \cdot 4kTR_c \cdot F_N}{V_{in}^2}, \quad (9)$$

где  $V_{in}$  – входное напряжение блока (в случае с СВЧ приемником известна входная мощность  $P_{in} = V_{in}^2 / 2R_c$ ).

Таким образом, для спектра относительных флуктуаций частоты блока получается выражение:

$$S_y(f) = \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \cdot \langle \varphi_{in}^2 \rangle_f \quad (10)$$

здесь  $f_0$  – частота выходного сигнала блока.

Расчет тепловых шумов СВЧ приемника (при  $F_N = 1,2$  дБ,  $P_{in} = 2 \cdot 10^{-13}$  Вт) дает  $S_{yR}(f) = f^2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-21}$  дБ/Гц; для буферного усилителя ( $F_N = 2$  дБ,  $V_{in} = 0,1$  В,  $R_c = 50$  Ом) спектр  $S_{yA}(f) = f^2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-33}$  дБ/Гц. Эти спектры, с учетом выражения (7), приведены на рис. 5. Спектр флуктуаций частоты СВЧ приемника – пунктирная линия (3), буферного усилителя – штрих-пунктирная (4).

Сплошной жирной линией (1) на рис. 5 изображен спектр относительных флуктуаций частоты выходного сигнала водородного стандарта VCH-1003A (ВРЕМЯ-Ч, Нижний Новгород) [2]. Этот спектр синтезирован по данным о дисперсии Аллена (для времен усреднения  $\tau = 1 \div 10^5$  с) и спектре относительных флуктуаций фазы стандарта (для частот  $f = 1 \div 10^4$  Гц). Наличие именно таких данных оправдано тем, что, как правило, при исследовании стабильности стандартов частоты пользуются этими двумя характеристиками: дисперсия Аллена [8,9] – во временной области, спектр фазовых или частотных флуктуаций – в частотной области. Выбор той или иной характеристики определяется удобством пользования. На частотах менее 1 Гц, то есть на временах более 1 с, пользуются дисперсией Аллена, на частотах более 1 Гц используют спектральный язык.

Спектр относительных частотных флуктуаций кварцевого генератора (на рис. 5 – пунктирная линия (2)), синтезирован по данным представленных в спецификации [5] о дисперсии Аллена ( $\tau = 1 \div 10^4$  с) и спектре относительных флуктуаций фазы ( $f = 10 \div 10^4$  Гц).

Система фазовой автоподстройки частоты формирует переходную область в полосе частот  $10^{-1}$ –10 Гц. Система ФАП компенсирует собственные флуктуации кварцевого генератора на частотах ниже  $f \cong 1$  Гц, а флуктуации водородного мазера и СВЧ приемника на частотах выше 1 Гц.

На частотах отстройки ниже  $10^{-2}$  Гц результирующий спектр флуктуаций частоты определяется водородным мазером ( $S_{yH}(f) = f^{-1} \cdot 2,9 \cdot 10^{-30}$  Гц $^{-1}$ ). Вид спектра в диапазоне  $10^{-2}$ – $10^{-4}$ , по-видимому, обусловлен импульсной подстройкой резонатора мазера, а на частотах менее  $10^{-4}$  механизмами старения мазера. Флуктуации, вносимые СВЧ приемником, существенны в диапазоне частот  $10^{-2}$ –1 Гц. Высокочастотную ветвь спектра (начиная с 1 Гц) практически полностью описывают технические и естественные флуктуации кварцевого генератора. Как видно из рис. 5, тепловые шумы буферного усилителя не оказывают особого влияния на спектр выходного сигнала стандарта.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 00–15–96620, 01–02–16666 и Отделения Науки НАТО, программа “Наука для Мира”, грант SfP-973799 Semiconductors.

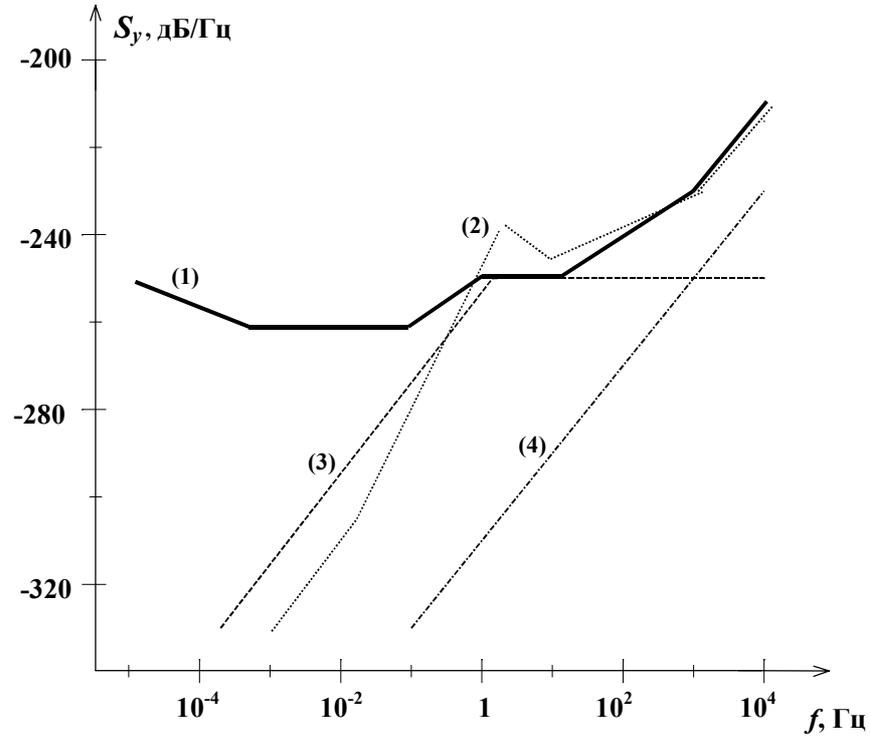


Рис. 5. Спектр относительных флуктуаций частоты

#### *Литература*

- [1] Якимов А.В. Машинно-ориентированная методика анализа флуктуаций в генераторных системах //Радиотехника и электроника. 1985. Т.30, № 12. С.2361.
- [2] Стандарт частоты и времени водородный VCH1003A, ЯКУР 411141.004 ТУ.
- [3] Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов /А.И.Пихтелев, А.А.Ульянов, Б.П.Фатеев и др.; под ред. Б.П.Фатеева. –М.: Сов. Радио, 1978, 304 с.
- [4] Козлов А.К., Якимов А.В. Исследование фазовых флуктуаций в водородном стандарте частоты /Труды 3-й Научной конференции по радиофизике. Нижегородский госуниверситет. –Н.Новгород, 1999. С. 215.
- [5] Кварцевый генератор М32001 “АСТРА”, технические характеристики /ОНИИП.
- [6] Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. –М.: Сов. радио, 1977, 416с.

- [7] Белоусов А.П., Каменецкий Ю.А. Коэффициент шума. –М.: Радио и связь, 1981, 112с.
- [8] Аллен. Статистические характеристики атомных стандартов частоты // ТИИЭР. 1966. Т.54, №2. С.132–142.
- [9] Время и частота: Тематический выпуск //ТИИЭР. 1972. Т60, №5.
- [10] Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. –М.: Наука, 1967, 660с.
- [11] Клибанова И.М., Малахов А.Н., Мальцев А.А. Флуктуации в многочастотных генераторах (Обзор) //Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1971. Т.14, № 2. С.173.
- [12] Barnes J.A., Chi A.R., Cutler L.S. and others. Characterization of frequency stability. //IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-20, p.105–120, May 1971.
- [13] Ораевский А.Н. Молекулярные генераторы. –М.: Наука, 1964, 295с.

### Frequency fluctuations in a hydrogen standard <sup>\*)</sup>

A.A.Belyaev, B.A.Sakharov <sup>3</sup>

*“VREMYA-CH” Joint Stock Company,  
Osharskaya Street 67, Nizhni Novgorod 603105, Russia*

A.K.Kozlov, A.V.Yakimov <sup>4</sup>

*Radiophysics Faculty, Nizhni Novgorod State University,  
Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia*

The aim of this report is to investigate the relative frequency noise in the output signal of an active hydrogen frequency standard. The operation of the system occurs as follows. Signals from a hydrogen maser (frequency of a bit more than 1.4GHz) and from 5MHz crystal oscillator are mixed in a phase comparator, which produces a mismatch signal on the basis of the generalized difference of phases. This signal is used for the tuning of the crystal oscillator. The output signal (with frequency 5MHz) is got from a buffer amplifier, to which it comes from the crystal oscillator.

In our research the non-traditional computer-aided method of the analysis of fluctuations in oscillatory systems was used. All the blocks of the phase comparator were analyzed. Only simplified data are presented here. These data were obtained without taking into account of inertia of frequency multipliers.

The expression for the resulting spectrum  $S_y(f)$  of the relative frequency noise in the output signal was obtained (7)

Here  $f$  is an analyzing frequency,  $S_{yO}(f)$  and  $S_{yH}(f)$  are spectra of the intrinsic relative frequency noise of the crystal oscillator and the hydrogen maser;  $S_{yR}(f)$ ,  $S_{yA}(f)$  – spectra of the relative frequency noise added in the microwave receiver (of the maser sig-

<sup>\*)</sup> Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 1st Workshop. Nizhni Novgorod, 2001

<sup>3</sup> Phone: +7-8312-354294, Fax: +7 8312-356306. E-mail: vremyach@pop.sci-nnov.ru

<sup>4</sup> Phone: +7-8312-656153, Fax: +7-8312-656416, E-mail: yakimov@rf.unn.runnet.ru

nal) and the buffer amplifier,  $f_h, f_l$  – frequencies characterizing the efficiency of the PLL. For the system under discussion  $f_h \cong 1,9$  Hz,  $f_l \cong 0,4$  Hz.

On the basis of this expression the spectrum of the frequency noise of the hydrogen standard VCH-1003A (“VREMYA-CH” JSC, Nizhni Novgorod) was analyzed, in view of the data from the specification for the built-in crystal oscillator and circuit parameters. All components of the relative frequency noise spectrum are shown in the fig.5 as an illustration of the result obtained. Here (1) – output of the standard, (2) – crystal oscillator, (3) – microwave receiver, (4) – buffer amplifier.

The phase locking loop forms a transitive area in the band  $10^{-1}$ –10Hz, and compensates the crystal oscillator noise at frequencies below 1Hz, and the noise of the hydrogen maser and microwave receiver – at frequencies higher than 1Hz. At frequencies lower than  $10^{-2}$ Hz the resulting spectrum of the frequency noise is determined by the hydrogen maser. The noise added in the microwave receiver is essential in the range  $10^{-2}$ –1Hz. At frequencies higher than 1Hz the resulting spectrum is caused by  $1/f$  and natural noise of the crystal oscillator. As it can be seen from the figure, the thermal noise of the buffer amplifier does not affect the spectrum of the output signal of the standard.

The spectrum of the intrinsic relative frequency noise of the hydrogen maser,  $S_{yH}(f) = f^{-1} \cdot 2,9 \cdot 10^{-30} \text{Hz}^{-1}$  was obtained. The shape of the spectrum may be caused by the impulse method of the tuning of the maser cavity. The spectra of the noise added in the receiver  $S_{yR}(f) = f^2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-21} \text{Hz}^{-1}$  and in the buffer amplifier  $S_{yA}(f) = f^2 \cdot 6,4 \cdot 10^{-33} \text{Hz}^{-1}$  were determined as well.

This work was supported by grants RFBR No. 00-15-96620, 01-02-16666, and NATO SfP-973799 Semiconductors.