

*Е. П. ИВАНОВА, Н. И. ИВАНОВ*, канд. физ.-мат. наук,  
*В. Ф. КРАВЧЕНКО*, канд. физ.-мат. наук

### **КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ЧАСТОТЫ РКГ**

В работе [1] рассмотрено влияние различных дестабилизирующих факторов на кратковременную нестабильность частоты КНЧ квантового стандарта частоты КСЧ с опорным рубидиевым квантовым генератором РКГ на парах  $Rb^{87}$ . При этом предполагалось, что РКГ обладает предельным значением КНЧ, неза-

висящим от выходной мощности генератора, к которому при уменьшении внутренних шумов КСЧ в пределе стремится величина КНЧ выходного сигнала КСЧ. Представляется целесообразным определение зависимости предельного значения мгновенной нестабильности частоты РКГ и, соответственно, КСЧ от выходной мощности опорного генератора.

### Естественные флуктуации частоты РКГ

Выражение для мгновенной величины среднеквадратичного отклонения от среднего значения частоты квантового генератора, возмущенного внутренним тепловым шумом, определяется следующим образом [2]:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{[\sigma \langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}]^2}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0} \left[ \frac{\pi K T (\Delta\omega)^3}{8P} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — средняя частота генерации генератора;  $K$  — постоянная Больцмана;  $T$  — эффективная шумовая температура квантового генератора;  $P$  — мощность, отдаваемая в резонатор активными частицами;  $\tau$  — время усреднения флуктуаций частоты квантового генератора;  $\Delta\omega$  — ширина спектральной линии рабочего перехода РКГ.

Можно показать, [3], что при оптимальной оптической накачке в случае, когда порог генерации существенно превышен, выражения для ширины спектральной линии атомного резонанса и максимальной мощности РКГ:

$$\Delta\omega = \frac{16\pi n \mu^2 Q a}{h}; \quad (2)$$

$$P = 8\pi\omega_0 n^2 V \mu^2 Q a^2. \quad (3)$$

Здесь  $n$  — плотность атомов рубидия при соответствующей температуре резонатора РКГ;  $\mu^2$  — квадрат матричного элемента перехода;  $V$  — объем резонатора РКГ;  $a$  — коэффициент заполнения резонатора рабочим веществом;  $h$  — постоянная Планка.

В результате подстановки (2) и (3) в (1) найдем предельное значение мгновенной нестабильности частоты РКГ на паре  $\text{Rb}^{87}$ , обусловленной внутренним тепловым шумом

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sigma \langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}}{\omega_0} = \frac{16 \pi \mu^2 Q}{\omega_0 h} \left( \frac{2K T n a}{\omega_0 h V} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Таким образом, строго доказано, что мгновенная стабильность частоты РКГ ухудшается с увеличением выходной мощности генератора, причем пропорционально  $n^{1/2}$ , т. е. на основании (3) пропорционально  $P^{1/4}$ .

Численная оценка предельной мгновенной нестабильности частоты РКГ по формуле (4) при типовых значениях:  $\mu = 10^{-20}$ ;  $Q = 3 \cdot 10^4$ ;  $V = 5 \cdot 10^2 \text{ см}^3$ ;  $T = 360^\circ \text{ К}$ ;  $\omega_0 = 4,3 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ ;  $n = 10^{10} \text{ ат/см}^3$ ;  $a = 1$  приводит к результату

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sigma \langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}}{\omega_0} = 7 \cdot 10^{-13}.$$

С увеличением выходной мощности РКГ до  $10^{-8}$  вт величина предельной мгновенной нестабильности частоты РКГ достигает величины  $2 \cdot 10^{-12}$ .

Согласно [1], (4) и приведенным численным оценкам при  $\tau \rightarrow 0$ , увеличение мощности РКГ ухудшает КНЧ выходного сигнала КСЧ.

### Технические флуктуации частоты РКГ

Полученный выше результат для естественных флуктуаций в РКГ, обусловленных тепловым шумом в полосе атомного резонанса основного состояния рубидия-87 между уровнями  $F=2$ ;  $m_F=0$  и  $F=1$ ;  $m_F=0$ , характеризует КНЧ РКГ при условии, что сигнал РКГ наблюдается или используется непосредственно с выхода генератора. Для маломощных квантовых генераторов это практически нереализуемый случай. Обычно сигнал РКГ поступает на вход усилителя или приемного устройства, обладающих собственными шумами. Поэтому необходимо знать видоизменение сигнала РКГ, которое наблюдается при его прохождении через буферные каскады.

Основной интерес представляют аддитивные шумы. Для описания влияния аддитивного шума на кратковременную нестабильность частоты РКГ может быть использована модель, в которой случайное блуждание фазы сигнала квантового генератора приписывается аддитивному шуму, находящемуся в квадратуре с несущей и имеющему одностороннюю спектральную плотность частоты, определяемую соотношением

$$S_{\omega}(\omega) = \frac{P_n}{P_c} \omega^2, \quad (5)$$

где  $P_n$  — полная мощность шума;  $P_c$  — мощность сигнала квантового генератора.

Вклад частотных флуктуаций вида (5) в кратковременную нестабильность частоты РКГ может быть охарактеризован величиной среднеквадратичного отклонения от среднего значения относительной девиации частоты [1, 3]

$$\frac{\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}]}{\omega_0} = \left[ \frac{1}{2\pi\omega_0^2} \int_0^{\infty} S_{\omega}(\omega) \frac{\sin^2 \omega\tau/2}{(\omega\tau/2)^2} d\omega \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Вместо величины  $1/\pi$  взята величина  $1/2\pi$ , так как используется односторонняя спектральная плотность частоты.

Если кратковременная нестабильность частоты РКГ определяется по результатам измерений в частотной области, то реализация фильтра, имеющего характеристику вида  $\sin(\omega\tau/2)/(\omega\tau/2)$ , затруднительна. На низких частотах анализа с помощью простых *RLC*-фильтров удается реализация фильтра с резким спадом

характеристики, которая близка к прямоугольной. При использовании такого фильтра величина  $\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0$  определяется следующим образом:

$$\frac{\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}]}{\omega_0} = \left[ \frac{1}{2\pi\omega_0^2} \int_0^{\omega_c} S_{\omega}(\omega) d\omega \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\omega_c$  — верхняя граничная частота полосы пропускания измерительного устройства.

Подставляя (5) в (7) и полагая  $\tau = \pi / \omega_c$ , определяем вклад аддитивного шума, находящегося вне пределов атомного резонанса, в кратковременную нестабильность частоты РКГ:

$$\frac{\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}]}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0} \left[ \frac{P_n \pi^2}{P_c 6\tau^3} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Нами проведена экспериментальная проверка соотношения (8) для РКГ. Устройство для определения влияния аддитивного шума на кратковременную нестабильность частоты РКГ описано в [1]. Эксперименты проводились с РКГ, имеющими вакуумированные медные резонаторы типа  $H_{021}$ ,  $H_{011}$ , заполненные парами  $Rb^{87}$  и азотом при давлении 11 тор. Резонаторы освещались газоразрядными лампами с  $Rb^{87}$ . В качестве оптических фильтров использовались ячейки, наполненные парами  $Rb^{85}$ . Термостатирование резонаторов и фильтров осуществлялось водяными термостатами. Сигналы РКГ через тройник поступали на вход малощумящего измерительного супергетеродинного приемника типа П5-7. Смешивание сигналов после усиления осуществлялось АМ-детектором приемника.

Если оба генератора характеризуются одинаковыми статистическими характеристиками флуктуаций частоты и корреляция между ними отсутствует, можно полагать, что все флуктуации частоты сигнала биений (среднее значение частоты около 471 гц) в  $\sqrt{2}$  превышают флуктуации частоты каждого РКГ. Сигнал биений поступал на фазовый детектор. В качестве опорного генератора использовался прецизионный кварцевый генератор с транзисторным делителем частоты регенеративного типа. Кратковременная нестабильность частоты сигнала биений определялась путем измерения селективным вольтметром мощности фазовых флуктуаций на выходе параметрического операционного усилителя.

Порядок измерения следующий: при изменении температуры резонаторов РКГ измерялась мощность  $P_c$  каждого РКГ. При этом режимы генераторов накачки выбирались из условия оптимальной накачки для данной температуры резонатора. В качестве величины  $P_n$  была выбрана пороговая чувствительность приемника П5-7. Делая большое число измерений для каждого вы-

бранного  $\tau$ , вычисляли величину  $\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0$ . Результаты расчетов, проводимых при условии равенства мощностей сигналов РКГ и  $P_n = 5 \times 10^{-12}$  вт, следующие:

$$\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0 = 2 \cdot 10^{-13} \text{ при } \tau = 1 \text{ сек, } P_c = 10^{-9} \text{ вт;}$$

$$\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0 = 6 \cdot 10^{-13} \text{ при } \tau = 1 \text{ сек, } P_c = 10^{-10} \text{ вт;}$$

$$\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0 = 2 \cdot 10^{-12} \text{ при } \tau = 1 \text{ сек, } P_c = 10^{-11} \text{ вт.}$$

Экспериментально получены такие результаты:

$$\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ при } \tau = 1 \text{ сек, } P_c = 10^{-9} \text{ вт;}$$

$$\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0 = 7 \cdot 10^{-13} \text{ при } \tau = 1 \text{ сек, } P_c = 10^{-10} \text{ вт;}$$

$$\sigma[\langle \dot{\varphi}(t) \rangle_{\tau}] / \omega_0 = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ при } \tau = 1 \text{ сек, } P_c = 10^{-11} \text{ вт.}$$

Заметим, что расчетные данные находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными. Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что зависимость (8) достаточно точно описывает действие аддитивного шума на кратковременную нестабильность частоты РКГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Н. И., Кравченко В. Ф. Флуктуации в квантовом стандарте частоты. — «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1972, 15, № 7, с. 890—894.
2. Рутман Ж. Соотношение между нестабильностью частоты и радиочастотным спектром и его применение к генератору, возмущаемому тепловым шумом. — ТИИЭР, 1971, 59, № 1, с. 106—108.
3. Иванов Н. И. Исследование кратковременных флуктуаций в системах формирования образцовых частот. Автореф. канд. дис., Харьков, 1971, с. 23.