

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

РАДИОФИЗИКА

УДК 538.945

КВАНТОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР В РЕГЕНЕРИРОВАННОМ РЕЖИМЕ НА ГРАВИТАЦИОННОЙ АНТЕННЕ

А. В. Гусев

(кафедра научной информации МГУ)

Рекордная чувствительность квантовых магнитометров (сквидов) позволяет использовать их как перспективный вариант электромеханического преобразователя (ЭМП) в гравитационно-волновом эксперименте для гравитационного детектора (ГД) веберовского типа [1—3]. В настоящей работе теоретически исследована пороговая чувствительность ЭМП на одноконтантном гистерезисном сквиде в новом регенеративном режиме «вне плато» [4, 5].

Уравнения движения для простейшей модели ЭМП на сквиде [1, 5] в стандартных обозначениях [1, 4—6] могут быть записаны в виде

$$\begin{cases} \varphi + l \sin \varphi = \varphi_e + \varphi'_k - li_{sf}, \quad li_s = \varphi_e + \varphi'_k - \varphi, \\ \varphi''_k + \varphi_k = -Q^{-1}\varphi'_k + \gamma e_0 \cos \tau + 2\Delta\varphi_k + k^2 li'_s + \gamma(e_R + e_n), \\ I = (\gamma\sigma)^{-1}\varphi'_k + i_n, \end{cases} \quad (1)$$

$$\xi'' + \nu_\mu^2 \xi = \nu_\mu^2 (f_s + \lambda_1 i_s), \quad \varphi_e = \varphi_{e0} + \lambda_2 \xi. \quad (2)$$

Источниками шума являются 1) тепловые шумы нормального сопротивления контакта i_{sf} ; 2) тепловые шумы контура e_R ; 3) шумы предусилителя с заданной минимальной шумовой температурой $(T_n)_{\min}$ [7] e_n, i_n .

Уравнения (1) описывают сквид как флюксометр и в регенеративном режиме «вне плато» исследованы в работе [4]. Уравнения (2) определяют в терминологии [6] обратную реакцию сквида на цепь ввода сигнала.

При $\nu_\mu = \omega_\mu / \omega_p \ll 1$ (ω_μ — резонансная частота ГД, ω_p — частота накачки) в квазигармоническом приближении [4]

$$\varphi_k \approx a \cos(\tau + \vartheta), \quad \langle \varphi \rangle(a, \varphi_e) = \langle \bar{\varphi} \rangle(a, \varphi_e) + \langle \tilde{\varphi} \rangle(a, \varphi_e),$$

где $\langle \rangle$ — символическая запись усреднения по периоду накачки, $\langle \bar{\varphi} \rangle$ — среднее статистическое по ансамблю скачков, из (1), (2) находим

$$\xi'' + \Omega^2 \xi \approx \nu_\mu^2 (f_s + \lambda_1 l^{-1} S_a \tilde{a} - \lambda_1 l^{-1} \langle \tilde{\varphi} \rangle_0), \quad (3)$$

$$\Omega^2 = \nu_\mu^2 (1 - \lambda_1 \lambda_2 l^{-1} (1 - S_e)), \quad S_a = (\partial \langle \bar{\varphi} \rangle / \partial a)_0, \quad S_e = (\partial \langle \bar{\varphi} \rangle / \partial \varphi_e)_0.$$

Динамические коэффициенты $S_{a,e}$ и спектральная плотность низкочастотной составляющей внутреннего магнитного потока $\langle \varphi \rangle_0$ определены в [4]:

$$S_a \approx S_e \approx a_0^{-1} Z_0^{-1} (b^+ / a), \quad \langle \tilde{\varphi} (j\nu) \rangle_0 \approx a_0^{-1} Z_0^{-1} (b^+ / a) \sigma^{(+)}, \quad (4)$$

где $Z(A) = (1 - A^2)^{1/2}$, $b^+ \approx l$ — критическое значение внешнего магнитного потока, соответствующее скачкам внутреннего магнитного потока в интерферометре «вверх»,

$$\overline{\langle \sigma^{(+)} \rangle^2} = [l (2\pi \mu T_s / l_c \Phi_0)]^{4/3} [4, 5].$$

Из уравнений (1), (3) с учетом (4) можно определить спектральные характеристики сигнала и шума на выходе демодулятора. При амплитудном детектировании,

обеспечивающем подавление тепловых флуктуаций контура [8], отношение сигнал/шум дается формулой

$$\mu = (\pi)^{-1} \int_0^{\infty} |\tilde{I}_a(j\nu)|^2 d\nu / |\tilde{I}_a(j\nu)|^2. \quad (5)$$

Интеграл в (5) для ультракоротких всплесков $\omega_p \tau \rightarrow 0$ может быть вычислен точно. Однако общее выражение для μ оказывается громоздким и неудобным для анализа. С целью упрощения рассмотрим две предельные ситуации [1].

1. Доминирует «технический шум». Пренебрегая в (5) для режима минимальных шумов предусилителя [7] естественными шумами контакта ($\Delta a \rightarrow 0$), находим из условия $\mu = 1$ амплитуду порогового сигнала

$$(F_0)_1 = (2/\tau) [m\chi(T_n)]_{\min} (\omega_\mu/\omega_p)^{1/2}, \quad (6)$$

где m — эквивалентная масса ГД. Такая чувствительность характерна для ЭМП на идеальном реактивном элементе. Коэффициент регенерации g [5] в формулу (6) не входит, он оказывает влияние на величину оптимальной электромеханической связи $(\lambda_1 \lambda_2)_g \approx 2(1-g)\Delta a (\nu_p \tau_s)^{-1}$.

2. Преобладает тепловой шум контакта. Для расчета потенциальной чувствительности, определяемой естественными шумами интерферометра, полагаем в (5) $|\tilde{I}_n(j\omega_p)|^2 = |e_n(j\omega_p)|^2 = 0$. Тогда получим

$$(F_0)_2 = (2/\tau) [m(I_c \Phi_0) (\omega_\mu/\omega_p) (\Delta a)^2]^{1/2}. \quad (7)$$

Согласно формуле (7) потенциальная чувствительность ЭМП в режиме «вне плато» оказывается в $1/\sqrt{\Delta a}$ раз выше, чем по оценке «на плато» в работе [1] ($1/\sqrt{a} \gg 1$).

Сравнение формул (6), (7) показывает, что технические шумы преобладают при $(T_n)_{\min} \gg (I_c \Phi_0 \chi)^{-1} (\Delta a)^2 \approx 10$ К для типичных значений параметров контакта $I_c = 10^{-3}$ А, $L_s = 10^{-6}$ Гн. Для реальных устройств СВЧ диапазона это условие можно считать выполненным [7]. Принципиальным преимуществом регенеративного усиления слабых сигналов в режиме «вне плато» является возможность использования простейших конструкций магнитомеханических преобразователей с низкой крутизной преобразования ($\delta\Phi_0/\delta x$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гусев А. В., Руденко В. Н. // ЖЭТФ. 1977. 72, № 3. С. 1218—1231.
 [2] Гусев А. В., Руденко В. Н. // ЖЭТФ. 1978. 74, № 5. С. 819—830.
 [3] Raik H. G. // J. Appl. Phys. 1976. 47. P. 1168—1172. [4] Гусев А. В., Крысанов В. А. // Радиотехн. и электроника. 1985. 30, № 3. С. 503—509. [5] Гусев А. В., Руденко В. Н. // ЖЭТФ. 1985. 88, № 1. С. 134—144. [6] Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами. М., 1978. [7] Айнбиндер И. М. Шумы радиоприемников. М., 1974. [8] Гусев А. В., Руденко В. Н. // Радиотехн. и электроника. 1976. 21, № 6. С. 1865—1873.

Поступила в редакцию
12.03.86

После переработки
16.02.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 4

УДК 539.284;621.373.424

К ТЕОРИИ АВТОДИННОГО СПИНОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Ю. С. Константинов

(кафедра радиофизики СВЧ)

Автодинный спиновый генератор (АСГ) относится к спиновым генераторам на боковой полосе с амплитудно-частотной модуляцией высокочастотного поля. Конструктивно АСГ представляет собой однокаскадный неизохронный автодин с образом в катушке контура, в котором сеточный детектор вместе со входной динамической емкостью генераторной лампы выполняют функции модулятора частоты [1]. Поэтому АСГ можно считать простейшим вариантом спинового генератора на бо-