

ДЕТЕКТОР МАЛЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ АНТЕННЫ

В.Б.Брагинский, В.И.Нанов, В.Д.Попельнюк

Отмечен фундаментальный, пороговый характер величин механических колебаний макроскопических осцилляторов, близких к $1 \cdot 10^{-17} \div 3 \cdot 10^{-18}$ см. Описана методика измерения механических колебаний, основанная на использовании высокостабильных СВЧ генераторов с узкой спектральной линией. Достигнуто разрешение амплитуды $2 \cdot 10^{-17}$ см при времени усреднения 10 сек.

Усовершенствование различных методов регистрации малых механических колебаний, которое интенсивно ведется в частности в связи с разработкой гравитационных антенн (см., например, обзоры [1, 2]), должно привести к детектируемым амплитудам Δx_{min} , сравнимым или меньшим величин, имеющих фундаментальный характер. Действительно, если Δx_{min} близка к ширине волнового пакета механического осциллятора в квантовом когерентном состоянии $\Delta x_{ког} = \sqrt{\hbar/2m\omega_M}$ (где ω_M — собственная частота, m — масса), то в полосе частот регистрации $\Delta\omega \approx \omega_M$ необходимо в принципе пользоваться квантово-состоятельными процедурами измерений (см., например, обзоры [3, 4]). Для макроскопического осциллятора с $m = 10^3$ г, $\omega_M = 10^4$ рад/сек величина $\Delta x_{ког} = 6 \cdot 10^{-18}$ см. С другой стороны, согласно астрофизическим предсказаниям [2], можно ожидать всплески гравитационного излучения длительностью $\tau_{гр} \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$ сек, имеющие безразмерную амплитуду $h \approx (2 \div 3) \cdot 10^{-19}$. Этим величинам h соответствуют отклики гравитационных антенн размером $l = \frac{1}{2} v_{зв} \tau_{гр} \approx 10^2$ см, равные $\Delta x_{гр} \approx hl \approx (2 \div 3) \cdot 10^{-17}$ см. В этой работе кратко изложено описание методики регистрации малых амплитуд механических колебаний, близких к таким критическим значениям.

В основе методики лежит один из типов параметрических преобразователей механических колебаний в электрический сигнал. На установке (см. рис. 1) регистрировались малые колебания ниобиевой диафрагмы D вблизи частоты $f_M = 8$ кГц (самая низкочастотная мода колебаний диафрагмы имела частоту ~ 40 кГц с эффективной массой ≈ 50 г). При таком выборе частот система регистрации отфильтровывала тепловые механические колебания диафрагмы, среднеквадратичная амплитуда которых равнялась $\sqrt{\Delta x_T^2} \approx 1,4 \cdot 10^{-14}$ см.

Амплитуда колебаний Δx задавалась с помощью электростатической системы калибровки (см., например, [5]). Одна из поверхностей диафрагмы представляла собой часть СВЧ резонатора клистронного типа ($f_e = 3$ ГГц). Колебания диафрагмы вызывали модуляцию емкостной части резонатора, средняя величина зазора которой d была равна

$3 \cdot 10^{-4}$ см. Добротность резонатора Q_p , также изготовленного из нибия равнялась $5 \cdot 10^4$ при $T = 4,2$ К.

Внешний источник СВЧ синусоидальных колебаний с частотой $f_\Gamma \approx f_e$ был подключен ко входу резонатора. Модуляция емкости приводит к появлению боковых компонент с частотами $f_\Gamma \pm f_M$ на выходе резонатора.

Нетрудно видеть, что мощность этих компонент $(W_{\text{ВЫХ}})_{f_\Gamma \pm f_M}$ имеет максимальное значение при $|f_\Gamma - f_e| \approx f_e / 2Q_p$ и для такой настройки равна

$$(W_{\text{ВЫХ}})_{f_\Gamma \pm f_M} \approx W_{\text{ВХ}} \frac{Q_p^2}{4} \left(\frac{\Delta x}{d} \right)^2. \quad (1)$$

Условие регистрации $W_{\text{ВЫХ}} > k T_c (\tau)^{-1}$ (где T_c - шумовая температура смесителя) выполняется для $\Delta x = 4 \cdot 10^{-17}$ см при $T_c = 500$ К, $d = 3 \cdot 10^{-4}$ см, $Q_p = 5 \cdot 10^4$ и $W_{\text{ВХ}} = 5 \cdot 10^{-4}$ Вт, если $\tau = 1$ сек.

Очевидно, что кроме этого условия для регистрации малых величин $(W_{\text{ВЫХ}})_{f_\Gamma \pm f_M}$ необходимо, чтобы СВЧ источник сигналов имел достаточно узкую естественную и техническую ширину линии. Это была одна из ключевых проблем в разработке описываемой методики.

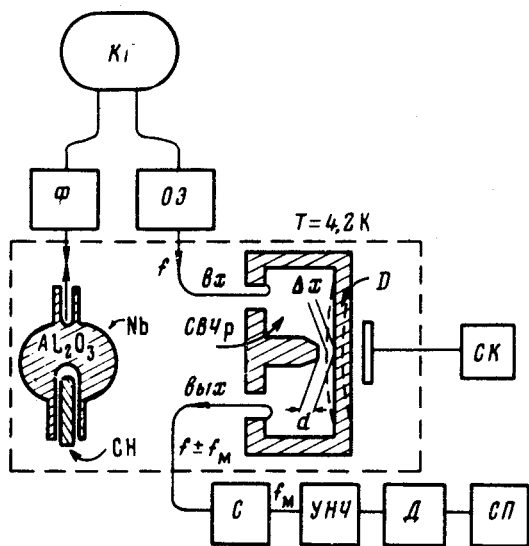


Рис.1. Схема измерений малых колебаний диафрагмы: D - диафрагма, СВЧ р - резонатор преобразователя, КГ - клистронный генератор, Ф - фазовращатель, ОЭ - однонаправленный элемент, d - емкостной зазор, СН - стержень настройки, С - смеситель, УНЧ - усилитель, Д - детектор, СП - самопишущий прибор, СК - система калибровки

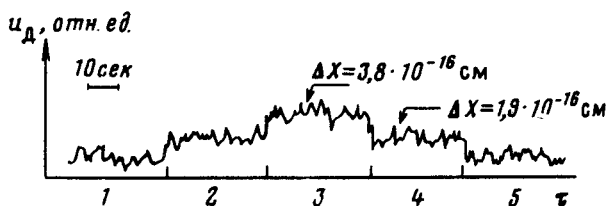


Рис.2. Запись отклика системы регистрации на колебания диафрагмы

В качестве СВЧ источника был использован отражательный клистрон, стабилизированный методом затягивания частоты с помощью перестраиваемого сверхпроводящего резонатора на сапфире [6]. Стабилизирую-

ший резонатор с добротностью $Q_{\Gamma} = 2 \cdot 10^7$ также как и датчик был помещен в вакуумный криостат с температурой 4,2 К. Этот резонатор с помощью сапфирового стержня можно было перестраивать в пределах $\Delta f_{\Gamma} \approx 0,1 f_e$. Подбором связей резонатора клистрона и фазы отраженного от резонатора сигнала удалось реализовать коэффициент стабилизации $\gg 10^4$, при котором компонента энергетического спектра флуктуаций амплитуды источника не превышала $2 \cdot 10^{-18}$ Гц⁻¹ при отстройке 8 кГц от f_{Γ} , а компонента энергетического спектра флуктуаций частоты при такой же отстройке составляла $3 \cdot 10^{-8}$ Гц²/Гц. Эти характеристики СВЧ источника вместе с тщательной антисейсмической и акустической изоляцией основных элементов установки позволили достигнуть уровня регистрации малых величин Δx , который иллюстрирован типичной записью на рис.2. Шумовая дорожка "1" и "5" — запись системы регистрации колебаний диафрагмы в отсутствие калибровочной силы. На участках "2" и "4" к диафрагме была приложена сила, вызвавшая амплитуду колебаний $\Delta x = 1,9 \cdot 10^{-16}$ см, на участке "3" — величина $\Delta x = 3,8 \cdot 10^{-16}$ см. Статистическая обработка показывает, что $\Delta x_{min} = 6 \cdot 10^{-17}$ см при $\tau = 1$ сек и $\Delta x_{min} = 2 \cdot 10^{-17}$ см при $\tau = 10$ сек по уровню одного стандартного отклонения.

В заключение целесообразно отметить, что достигнутое описанным методом разрешение Δx_{min} на три с лишним порядка лучше, чем в оптическом датчике, использующем узкие резонансы [7] и многоходовом интерферометре Майкельсона [8].

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
17 марта 1981 г.

Литература

- [1] R.Weiss. In "Sources of Gravitational Radiation" L.Smarr, ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 1979).
- [2] K.S.Thorne. Rev. Mod. Phys., 52, 285, 1980.
- [3] G.M.Caves, et. al. Rev. Mod. Phys., 52, 341, 1980.
- [4] V.B.Braginsky, Y.I.Vorontsov, K.S.Thorne. Science, 209, 547, 1980.
- [5] В.Б.Брагинский, В.И.Панов, В.Г.Петников, В.Д.Попельнюк. ПТЭ, №1, 234, 1977.
- [6] V.B.Braginsky, V.I.Panov, IEEE Trans. Mag. MAG-15, 30, 1979.
- [7] С.И.Багаев, А.С.Дычков, В.П.Чеботаев. Письма в ЖЭТФ, 33, 85, 1981.
- [8] K.Maischberger, A.Budiger, R.Shilling, L.Schnupp, S.Winkler, H.Billing. Preprint, MPI-PAE/ASTRO, 209, 1979.