УДК 531.5:621.396.67

В. Б. БРАГИНСКИЙ, Ю. Б. ЛАНИН, В. И. ПАНОВ

ДАТЧИК ГРАВИТАЦИОННОЙ АНТЕННЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Создание второго поколения антенн для приема гравитационного излучения внеземного происхождения требует реализации датчика малых колебаний, способного регистрировать колебания детектора на частоте $\omega_\mu \sim 10^3$—10^5 с$^{-1}$ с амплитудой $\Delta x \sim 10^{-17}$—10^{-19} см [1, 2]. Основная трудность, возникающая при реализации такого датчика, — необходимость поддержания зазора между датчиком и антенной с высокой точностью Δd, такой, чтобы при наличии сейсмических помех сигнал генератора накачки удерживался на «склоне» резонансной кривой емкостного преобразователя. Для преобразователя с добротностью Q_e, имеющего емкостной зазор d между антенной и датчиком, величина Δd не должна превышать $\Delta d \sim 0{,}1 \frac{d}{Q_e}$, что составляет $\sim 10^{-9}$ см при $d = 10^{-3}$ см и $Q_e = 10^5$. Удержание зазора с такой точностью требует использования сложных следящих систем с большим коэффициентом усиления [3], применение которых существенно усложняет процедуру измерения малых колебаний.

Реакцию датчика на сейсмические помехи можно существенно уменьшить, используя конструкцию антенны, предложенную в [4], совместно со сверхпроводящим резонатором (СПР) специальной формы в качестве емкостного преобразователя (рис. 1). В предлагаемом варианте основная рабочая емкость C_0 преобразователя образована зазором d_0 между покрытыми сверхпроводящей пленкой концами диэлектрических стержней, а замыкание высокочастотного тока проходит через боковые блокирующие коаксиальные емкости $C_{бл}$. Изменение собственной частоты ω_p СПР при произвольных перемещениях такого резонатора относительно антенны может быть определено из трансцендентного уравнения [5]

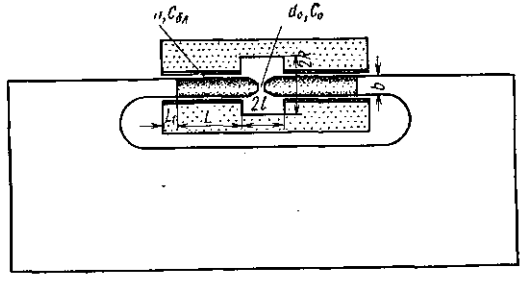

Рис. 1

$$\frac{1}{\omega_p} = \left(\frac{C_0 \cdot C_{бл}}{2C_0 + C_{бл}}\right) Z \left[\operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda}(l + \Delta l) - \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda}(l - \Delta l)\right], \qquad (1)$$

где Z — волновое сопротивление резонатора; $2l$ — его длина; Δl — продольное смещение центра резонатора относительно зазора d_0.

а. Относительные вариации частоты СПР, вызываемые продольными перемещениями ($\delta l \ll \Delta l$) $\frac{\delta\omega}{\omega_p} \simeq \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \Delta l \, \delta l + \frac{\Delta C_{бл} C_0}{L C_{бл}^2}$, здесь $\Delta C_{бл}$ — начальная неточность блокирующих емкостей; δl — вариации продольных перемещений, вызываемые сейсмическими возмущениями. Например, для

$$\lambda = 10 \text{ см}, \quad \Delta l = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}, \quad \frac{\Delta C_{бл}}{C_{бл}} \simeq 0{,}1, \quad C_{бл} = 25 \text{ см},$$

$$C_0 = 1 \text{ см и } \delta l \simeq 5 \cdot 10^{-4} \text{ см} \quad \frac{\delta\omega}{\omega_p} \sim 10^{-6}.$$

б. Вариации $\frac{\delta\omega}{\omega_p}$, вызываемые поперечными перемещениями ($\delta h \ll \Delta h$) $\frac{\delta\omega}{\omega_p} \simeq \frac{4C_0}{L} \frac{\Delta h \, \delta l}{bh}$, здесь Δh — начальная неточность зазоров блокирующих емкостей; δh — вариации поперечных перемещений. Для $L \simeq 2{,}5$ см, $b = 1$ см, $h = 2 \cdot 10^{-2}$ см, $\Delta h \simeq 5 \cdot 10^{-3}$ см и

$$\delta h \simeq 5 \cdot 10^{-4} \text{ см} \quad \frac{\delta\omega}{\omega_p} \simeq 2 \cdot 10^{-4}.$$

в. Вариации $\frac{\delta\omega}{\omega_p}$ вследствие угловых смещений резонатора относительно антенны на угол $\delta\varphi = \frac{\delta h_\varphi}{L}$ равны $\frac{\delta\omega}{\omega_p} \simeq \frac{2}{3} \frac{C_0}{L} \frac{(\delta h_\varphi)^2}{bh}$ и при $\delta h_\varphi \simeq 5 \cdot 10^{-4}$ составляют $\frac{\delta\omega}{\omega_p} \simeq 10^{-6}$.

Полученные оценки показывают, что рассмотренный вариант емкостного преобразователя дает возможность уменьшить влияние сейсмических возмущений при регистрации колебаний антенны по крайней мере в 10^4 раз и, следовательно, существенно снижает требования, предъявляемые к системам отслеживания положений преобразователя.

Экспериментальная проверка предлагаемого варианта преобразователя была осуществлена на установке, состоявшей из описанного резонатора с параметрами ($L = 2$ см, $2l = 1{,}6$ см, $2R = 1{,}6$ см, $b = 0{,}76$ см, $h = 2 \cdot 10^{-2}$ см, $C_0 = 1$ см) и устройства, позволявшего задавать перемещения резонатора относительно модели антенны в произвольных направлениях с одновременной индикацией положения с точностью $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ см. Имитация сейсмических воздействий осуществлялась заданием квазистатического калиброванного смещения в нужном направлении. Измерение $\frac{\delta\omega}{\omega_p}$ производилось по изменению амплитуды СВЧ-колебаний на выходе резонатора, для которого частота внешней накачки совпадала со «склоном» его резонансной кривой.

Результаты проверки основных соотношений п. а и б приведены на рис. 2 *а*, *б*, соответственно. Полученные графики иллюстрируют хорошее совпадение экспериментальных зависимостей с аналитическими соотношениями.

Существенным параметром, определяющим чувствительность и коэффициент преобразования датчика, является его электрическая добротность Q_e. Высокое значение Q_e достигается применением в подобных устройствах сверхпроводящих резонаторов с малым емкостным

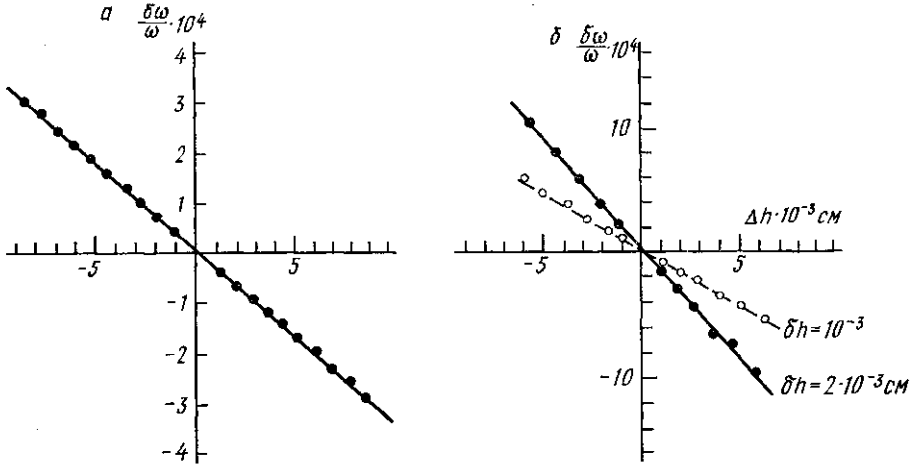

Рис. 2

зазором [6]. Для рассмотренного варианта СПР выражение для Q_e может быть представлено в виде

$$\frac{1}{Q_e}=\frac{1}{Q_1}+\frac{1}{Q_2}+\frac{1}{Q_3}, \tag{2}$$

здесь $Q_1=\frac{G(d_0)}{R_s}$ — значение добротности, определяемое величиной поверхностного сопротивления R_s сверхпроводника ($G(d_0)$ — геометрический фактор СПР); $Q_2=\frac{\Delta}{8\varepsilon\xi\,\mathrm{tg}\,\delta}$ — добротность, зависящая от потерь в диэлектрических пленках, блокировочных емкостей и основного зазора резонатора (Δ — величина зазора, ξ — толщина пленки, ε и $\mathrm{tg}\,\delta$ — ее диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь); $Q_3\simeq\frac{2Z(\varepsilon_0)}{G(d_0)}\times$ $\times\left(\frac{C_{бл}}{C_0}\right)^2\left(\frac{\lambda}{\pi b}\right)^2\alpha$ — величина добротности, определяемая излучением из запредельных участков резонатора ($\alpha\simeq e^{-\frac{4\pi}{\lambda}\cdot 6{,}85L_1}$, $Z(\varepsilon_0)$ — волновое сопротивление пространства, заполненного диэлектриком с проницаемостью ε_0, L_1 — длина запредельного участка). Анализ формулы (2) показывает, что при заданных параметрах добротность СПР может достигать величины $Q_e\gtrsim 10^6$.

Измерение параметров СПР производилось на резонаторе, изготовленном из монолитного ниобия трехкратной электронно-лучевой переплавки чистоты 99,99%. Резонатор и ниобиевые стержни были механически полированы и химически очищены. Ниобиевые стержни жестко закреплялись на сапфировых цилиндрах, с помощью которых изменялся зазор резонатора.

В процессе измерений резонатор размещался в криостате при температуре $T=2$—$4{,}2$ К. Связь резонатора с внешними цепями осуществлялась подвижными индуктивными петлями. Величина связи регулировалась глубиной погружения петель в полость СПР. При изменениях СПР включался как проходной элемент. Добротность Q_e измерялась

по декременту затухания колебаний. Экспериментальная зависимость Q_e от собственной частоты СПР и величины зазора d_0 представлена на рис. 3. (*1*, *2* при $T=2$К и *1'*, *2'* при $T=4{,}2$К; пунктиром представлена зависимость $Q_e(f_{рез})$, штрих-пунктиром $Q_e(d_0)$). Из приведенных результатов следует, что $Q_e \sim \sqrt{d_0}$ и достигает максимального значения $Q_{0e}=2{,}8\cdot10^6$ при $d_0=2{,}5\cdot10^{-3}$ см и $T=2K$. Подобное поведение может быть объяснено независимостью остаточного поверхностного сопротивления R_s СПР от частоты.

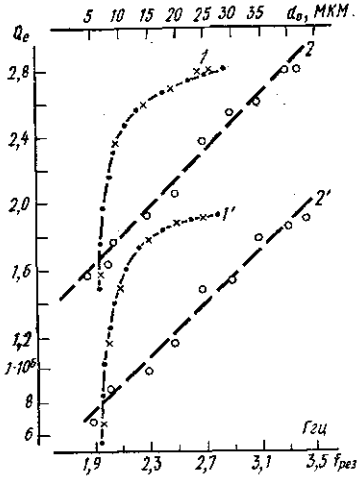

Рис. 3

Важной характеристикой СПР является также величина электрического поля в зазоре E_{max}, при котором резонатор нагружается автоэмиссионным током, что приводит к резкому снижению его добротности. Для описанного СПР E_{max} составляло $\sim$ 18 мВ/м на частоте 2,1 Гц при $Q_e=1{,}9\cdot10^6$.

Приведенные результаты иллюстрируют перспективность применения предлагаемого преобразователя в качестве датчика, регистрирующего малые колебания гравитационной антенны, и позволят существенно упростить процедуру измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Braginsky V. B., Rudenko V. N. «Physics Reports», 1978, **46**, N 5.
2. Брагинский В. Б., Панов В. И., Петников В. Г., Попельнюк В. Д. «Приборы и техника эксперимента», 1977, № 1, 234.
3. Blair P. G. Operation of prototipe niobiom gravitational radiation antenna with microwave parametric accelerometer, report LT IS. Grenoble, sept., 1978.
4. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. и др. «Письма ЖЭТФ», 1972, **16**, 157.
5. Орлов С. И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов. М., 1970.
6. Kolesow V. V., Panov V. I., Petnicov V. G. «Cryogenics», 1977, 17, N 5, 299.

Кафедра
физики колебаний

Поступила в редакцию
11.12.78