

5. Гвишиани А.Д., Жижин М.Н., Иваненко Т.И. Синтаксический анализ записей сильных движений // Компьютерный анализ геофизических полей. М.: Наука. 1990. С.235-253. (Вычисл. сейсмология; Вып. 23).
6. Das S., Aki K. Fault plane with barriers: a versatile earthquake model // J.Geophys.Res. 1977. Vol.82. P.5648-5670.
7. Гусев А. А. Модель очага землетрясения со множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. 1988, N 1. С.41-55.
8. Davis J.P., Sacks I.S., Linde A.T. Source complexity of small earthquakes near Matsushiro, Japan // Tectonophysics. 1989. Vol.166. P.175-187.
9. Peckmann J.C., Kanamori H. Waveforms and spectra of aftershocks of the 1978 Imperial Valley, California, earthquake: evidence of fault heterogeneity? // J.Geophys. Res. 1982. Vol.87. P. 10579-10597.
10. Peckmann J.C., Thorbjarnardottir B.S. Waveform analysis of two preshock-main shock-aftershock sequences in Utah // Bull. Seismol.Soc.Amer. 1990. Vol.80. P.519-550.
11. Joswig M. Pattern recognition for earthquake detection // Bull. Seismol.Soc.Amer. 1990. Vol.80. P.170-186.
12. Diday E. et al. Eléments d'analyse de données. Paris, Dunod: 1988. 256 p.
13. Bernard P. and Zollo A. Inversion of near-source S polarization for parameters of double-couple point sources // Bull. Seismol.Soc.Amer. 1989. Vol.79. P.1779-1809.
14. Hsi-Ho Liu and K.S.Fu, A syntactic approach to seismic pattern recognition // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, PAMI-4. 1982. P.136-140.
15. Fu K.S. Syntactic approach to pattern recognition / Ed. by Simon J.C. // Spoken language generation and understanding. D. Reidel Publishing Co., 1980. P.221-251.

УДК 550.34.012

К.В.Кислов. Ю.А.Колесников. А.Ю.Марченков. Ю.О.Старовойт

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МИКРОБАРОГРАФ

K.V.Kislov, Yu.A.Kolesnikov, A.Yu.Marchenkov, Yu.O.Starovoit

SEISMIC MICROBAROGRAPH

Design and operational principles of a high resolution microbarograph with capacity transducer are described. The microbarograph can be used in investigation of seismic noise caused by local fluctuation of atmospheric pressure in problems of pressure noise compensation.

Выделение сейсмических сигналов в длиннопериодной области спектра во многом осложнено сейсмической помехой барического происхождения. Микрофлуктуации атмосферного давления в диапазоне периодов

$T > 20$ с существенно влияют на уровень помехи на выходе сейсмометра. Известно несколько способов уменьшения воздействия пульсаций давления на сейсмометр.

Непосредственное влияние на вертикальный маятник колебаний давления, связанное с вариациями архимедовой силы, можно уменьшить использованием барокомпенсированных конструкций приборов [1]. Однако увеличение чувствительности современных сейсмометров в сверхдлиннопериодной области требует снижения порога барокомпенсации, либо поиска альтернативных методов подавления барической помехи.

Основной вклад в барическую помеху, действующую на горизонтальные маятники, дают наклоны почвы, причина которых в том, что микроколебания атмосферного давления обеспечивают существенную переменную нагрузку на поверхность Земли, что, в свою очередь, приводит к появлению смещений и наклонов грунта [2, 3]. Горизонтальные маятники, как известно, в области длинных периодов обладают хорошей чувствительностью к наклонам. Используя средние характеристики грунтов на глубинах 3–5 м, можно показать [4], что кажущиеся смещения, обусловленные наклонами, доминируют на записях горизонтальных приборов.

Для уменьшения помех-наклонов предложен дорогостоящий способ скважинной сейсмометрии [5]. Однако этот способ ограничивает лишь частотный диапазон помехи, в котором возможно ее подавление. Заглубление сейсмометра представляет собой по существу низкочастотную фильтрацию помехи с частотой среза тем меньшей, чем больше глубина скважины.

Скважинный способ не в состоянии также экранировать волновую помеху. Воздействие переменного поля давлений на поверхность Земли в отдельных случаях приводит к появлению не только квазистатических деформаций среды, но и к возникновению различного типа упругих волн-помех [6, 7], длины волн которых обеспечивают эффективное проникновение до глубин порядка десятков километров с большим радиусом пространственной корреляции. Это обстоятельство делает невозможным использование скважинного способа для подавления подобной помехи.

Изложенное означает, что с целью увеличения разрешающей способности сейсмометров в сверхдлиннопериодной области необходимо развитие альтернативных методов подавления барических помех.

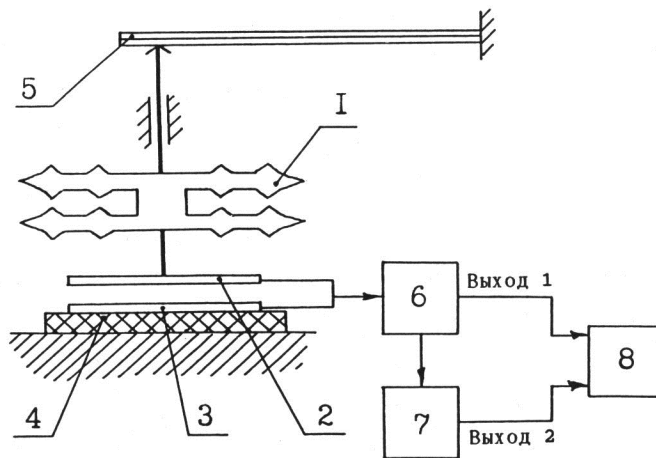
Одним из наиболее перспективных методов уменьшения уровня барической помехи является корреляционный способ ее компенсации, основанный на различных методах оптимальной фильтрации сигналов [3, 7].

Суть метода - в использовании одновременных записей в одной точке помехи сейсмометра и микроколебаний атмосферного давления, в осуществлении фильтрации давления таким образом, чтобы минимизировать, например, среднее значение квадрата разности между двумя процессами. Успех метода во многом зависит от качества информации о микроколебаниях давления.

Используемые до настоящего времени в сейсмологической практике микробарографы (например, ЭДМБ), обладают рядом существенных недостатков [8]. Во-первых, это достаточно низкая разрешающая способность, во-вторых - наличие значительной погрешности, возникающей при изменении температуры (температурное изменение упругости чувствительного элемента). Важно указать, что без дополнительной фильтрации этот прибор регистрирует скорость изменения давления, т.е. является вариомером.

В настоящей работе описан разработанный в МИТП АН СССР микробарограф с емкостным преобразователем, который обладает высокой разрешающей способностью: в его конструкцию входят элементы, уменьшающие его чувствительность к колебаниям внешней температуры. Микробарограф имеет небольшие габариты, удобен для работы в полевых условиях.

Упрощенная схема барографа представлена на рис.1. Приемником барографа служат анероидные коробки (1), соединенные вместе в бароблок. Количество коробок выбирается таким образом, чтобы при изменении атмосферного давления получить возможно большую величину общей деформации (но не выходящую за линейный участок емкостного преобразователя), имея в то же время незначительные деформации отдельных коробок. Бароблок жестко связан с роторной пластиной конденсатора (2). Статорная пластина конденсатора (3) крепится к основанию (4). Стержень с бароблоком крепится к основанию барографа через термокомпенсатор (5). Задача термокомпенсатора состоит в создании компенсирующих перемещений роторной пластины преобразователя при ее смещении под действием изменяющейся температуры элементов бароблока. Атмосферное давление уравнивается упругостью мембран вакуумных анероидных коробок (внутреннее давление менее 10^{-2} мбар). Изменение внешнего давления ΔP вызывает дополнительную деформацию мембраны коробки $\Delta \delta = \nu \Delta P$, где ν - коэффициент упругости анероидной коробки. Смещение роторной пластины конденсатора Δx , пропорциональное $N \Delta \delta$ (где N - число анероидных коробок), преобразуется в электрический сигнал преобразователем (6), который пос-



Р и с. 1. Функциональная схема микробарографа (пояснения см. в тексте)

ле фильтрации в блоке (7), поступает на вход регистрирующего устройства (8).

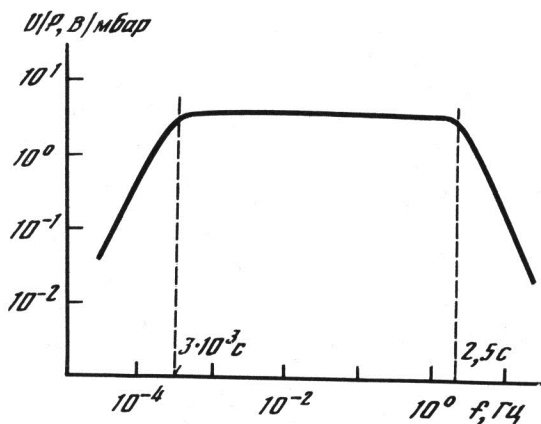
В электрической схеме барографа (рис.2) используются следующие принципы формирования сигналов.Переменный конденсатор C_0 включен в одно из плеч мостовой схемы, представленной высокочастотными колебательными контурами, в которые входят также конденсатор C_1 и две индуктивности L_1, L_2 . Для возбуждения колебаний в контурах служит кварцевый генератор (КГ), сигнал с которого поступает в возбуждающую обмотку L_0 . В электрическую схему преобразователя входят также дискриминаторы с диодами D_1, D_2 , конденсаторами C_2, C_3 и масштабный усилитель с коэффициентом усиления K .

Изменение зазора $\Delta\delta$ при фиксированной частоте Ω_0 кварцевого генератора приводит к изменению амплитуды колебаний на емкостях C_0 и C_1 двух колебательных контуров мостовой схемы емкостного преобразователя.Происходит перемещение резонансной кривой вдоль оси частот относительно неподвижной частоты Ω_0 . при этом рабочая точка перемещается по склону резонансной характеристики относительно некоторого среднего значения U_c .

Крутизна (чувствительность) преобразования перемещений подвижной пластины в электрическое напряжение определяется из выражения [9]:

$$\frac{\Delta U_c}{\Delta\delta} = \frac{U_g Q^2}{2\sqrt{2} \delta_0} = \alpha,$$

где δ_0 - среднее значение зазора между обкладками конденсатора, U_g - напряжение сигнала кварцевого генератора, Q - добротность контура.



При этом, как известно, для последовательного контура

$$Q = \sqrt{L/RC} ,$$

где R - активное сопротивление обмотки индуктивности L_0 .

Применение балансной (мостовой схемы) двух колебательных контуров позволяет скомпенсировать постоянное напряжение на входе масштабного усилителя для среднего значения зазора δ_0 подбором C_0 . Этим достигается снижение уровня помех и уменьшение погрешности измерений.

На выходе микробарографа регистрируется сигнал U , пропорциональный амплитуде барических колебаний:

$$U = \alpha \Delta \delta K = \alpha \varepsilon \Delta P .$$

Современная малозумящая электроника, высокостабильный кварцевый генератор с автоматической регулировкой амплитуды и термостатированием кварцевого резонатора, примененные в электронной схеме преобразователя, дают существенный выигрыш в чувствительности, стабильности и разрешающей способности по сравнению с известными конструкциями барографов.

При неблагоприятных температурных условиях и повышенной влажности прибор защищается герметичным колпаком, имеющим отверстие, закрытое тонкой эластичной пленкой. В конструкции предусмотрено наличие пассивного термостата в виде "домика" из пенопласта, что устраняет резкие перепады температуры внутри барографа и неравномерный нагрев элементов его конструкции.

Барограф предложенной конструкции представляет собой сложную механическую колебательную систему, обладающую набором собственных частот. Самая низкая собственная частота определяется упругостью материала барокоробок и массой роторной пластины преобразователя.

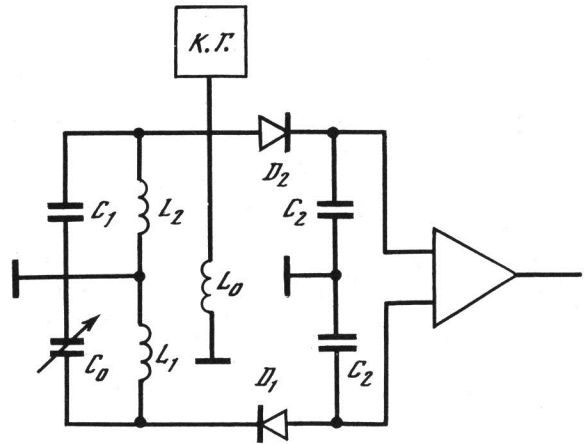
Рассматривая свободновисящий бароблок, имеющий опору на упругий элемент термокомпенсатора, как маятник с несколькими степенями свободы, с помощью [10] можно оценить низшую из резонансных частот по формуле

$$F_0 = \frac{A}{2\pi RN} \sqrt{\frac{H}{(m+M/N)}}$$

где R - внешний радиус анероидных коробок; m - масса анероидной коробки; M - масса подвижной обкладки конденсатора и соединительной стойки; A - постоянная, зависящая от формы барокоробки (в нашем случае $A=25,6$); $H=Eh^2/12(1-\mu^2)$ - цилиндрическая жесткость мембраны коробки, где h - толщина мембраны, E - модуль упругости материала мембраны, μ - коэффициент Пуассона.

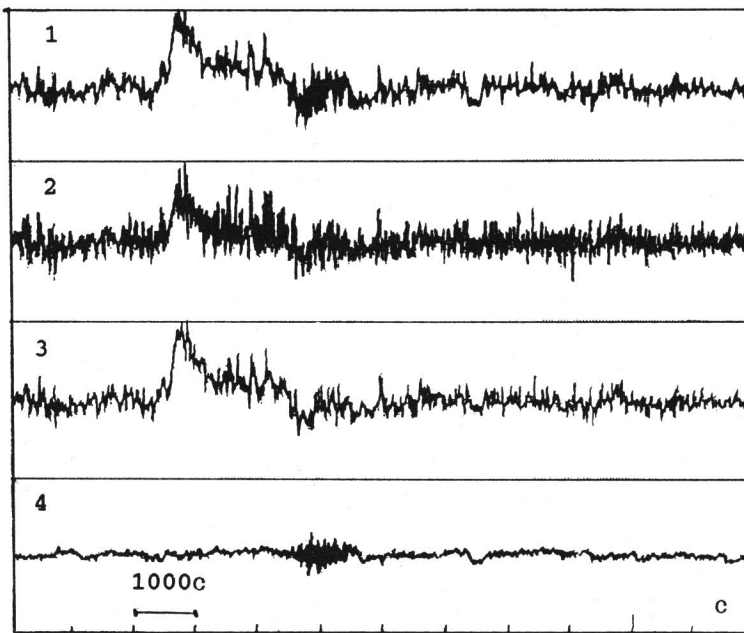
Оценка резонансных свойств конструкции барографа свидетельствует о том, что низшая из его собственных частот $F_0=20$ Гц лежит за пределами интересующего нас диапазона баровариаций; тем самым обеспечивается защита микробарографа от воздействия вибраций грунта в области сейсмических частот. Вариант одной из амплитудно-частотных характеристик микробарографа представлен на рис. 3.

Р и с. 3. Амплитудно-частотная характеристика на выходе микробарографа



Разработанный микробарограф был успешно применен для подавления сейсмических помех на записях широкополосных сейсмометров. На рис. 4 показан пример записи слабого сейсмического сигнала, осложненного сейсмической помехой, и параллельная ей запись колебаний атмосферного давления, являющихся источником помехи.

В качестве критерия оптимальности фильтрации сигнала давления был выбран критерий минимума среднего квадрата разности между процессом на выходе сейсмометра и отфильтрованным сигналом давления. Процедура компенсации сводилась к линейной фильтрации колебаний давления P_t и вычитанию результата фильтрации из смеси сигнала с



Р и с. 4. Пример использования микробарографа для подавления сейсмической помехи и выделения слабого сигнала

1 - запись сейсмической помехи, осложненной помехой барического происхождения; 2 - исходная запись колебания атмосферного давления; 3 - запись барических колебаний на выходе оптимального фильтра; 4 - разность записей 1 и 3

помехой. Как известно [11], сигнал E_t на выходе оптимального фильтра определяется из соотношения

$$E_t = \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_l P_{t-l}.$$

а коэффициенты C_l представляются в виде

$$C_l = \int_{-\pi}^{\pi} S_{xp}(k) S_{pp}^{-1}(k) \exp(-ikl) dk,$$

где $S_{pp}(k)$ - энергетический спектр процесса на выходе барографа, $S_{xp}(k)$ - взаимный спектр процессов на выходе сейсмометра и барографа. Применение метода оптимальной фильтрации, как это видно из рис. 4, позволило снизить уровень барической помехи примерно на 20дБ и надежно выделить сейсмический сигнал.

В заключение приведем технические данные сейсмического микробарографа.

Коэффициент преобразования по смещениям

роторной пластины преобразователя $1,8 \cdot 10^2$ В/м

Коэффициент преобразования по давлению

выход 1 $1,3 \cdot 10^{-1}$ В/мбар

выход 2 (в рабочей полосе частот фильтра)7,9 В/мбар

Разрешающая способность $2,0 \cdot 10^{-4}$ мбар

Температурная погрешность (не хуже) $5,0 \cdot 10^{-3}$ мбар/градус

Динамический диапазон измерений90 дБ

Испытания макета микробарографа в полевых условиях показали надежность и стабильность его параметров, что открывает перспективу его использования для исследования сейсмических помех и их связи с микроколебаниями атмосферного давления.

Литература

1. Колесников Ю.А., Мациевский С.А. Шумы вертикальных длиннопериодных сейсмометров. Методы их уменьшения // Теория и анализ сейсмологических наблюдений. М.: Наука, 1979. С.125-143. (Вычисл. сейсмология; Вып.12).
2. Ziolkowski A. Prediction and suppression of long-period non-propagating seismic noise // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1973. Vol.63, N6. P.937-958.
3. Sorrells G.G. A preliminary investigation into relationship between long-period seismic noise and local fluctuation in the atmospheric pressure field // Geophys. J.Roy.Astron.Soc. 1971. Vol.26. P.71-82.
4. Sorrells G.G., Goforth T.T. Low-frequency earth motion generated by slowly propagating partially organized pressure fields // Bull. Seismol.Soc.Amer. 1973. Vol.63, N5. P.1583-1601.
5. Peterson J., Orsini N.A. Seismic research observatories // Trans. Amer.Geophys.Union. 1976. Vol.57, N8. P.548-556.
6. Sorrells G.G., Douze E.J. A preliminary report on infrasonic waves as a source of long-period seismic noise // J. Geophys. Res. 1974. Vol.79, N32. P.4908-4917.
7. Douze E.J., Sorrells G.G. Prediction of pressure generated earth motion using optimum filters // Bull.Seismol. Soc. Amer. 1975. Vol.65, N3. P.637-650.
8. Пасечник И.П., Федосеев Н.Е. Электродинамический микробарограф с гальванометрической регистрацией // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. N7. С.121-130.
9. Колесников Ю.А., Мациевский С.А. Применение емкостных преобразователей линейных перемещений в сейсмометрии // Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли. М.:Наука, 1978. С.142-179. (Вычисл. сейсмология; Вып.11).
10. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Б.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 285с.
11. Кушнир А.Ф., Писаренко В.Ф., Рукавишникова Т.А. Компенсация помех в многомерных геофизических наблюдениях. Теория и методика обработки данных // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных. М.: Наука, 1980. С.146-151. (Вычисл. сейсмология; Вып.13).