УДК 550.34.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ КОРРЕКЦИИ СЕЙСМОГРАММ НА ПРИМЕРЕ ГЕОФОНА GS20DX

А.Н. Беседина, С.Г. Волосов, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян

В работе исследуется зависимость модифицированных с помощью метода коррекции частотных характеристик геофона GS20DX от параметров датчика и схемы коррекции. Результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования позволяют говорить о том, что на АЧХ и ФЧХ значительное влияние оказывает величина затухания геофона. Результаты можно считать достоверными в том случае, когда коррекция выполняется при той величине затухания, которое имеется в геофоне.

Введение

При решении некоторых геофизических задач прикладного характера требуется изменить характеристики имеющегося измерительного канала. Зачастую это удается сделать с помощью специальных методов коррекции. В данной работе рассматривается метод численной коррекции зарегистрированных сейсмограмм [Кабыченко и др., 2011; Беседина и др., 2011] и исследуется влияние параметров датчика и схемы коррекции на модифицированную частотную характеристику сейсмометра.

Описание исследуемого метода

Данная методика численной коррекции представляет собой применение корректирующего фильтра к сейсмическому сигналу, зарегистрированному сейсмометром. Измерительная аппаратура, как известно, вносит искажения в регистрируемый сигнал в соответствии с амплитудно- и фазово-частотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ) датчика. При этом уравнение сейсмометра описывается разностным уравнением

$$Y(n) = -\frac{a1}{a2}\cdot X(n-1) - \frac{a0}{a2}\cdot X(n-2) + \left[X(n) + \frac{b1}{b2}\cdot X(n-1) + \frac{b0}{b2}\cdot X(n-2)\right]\cdot\frac{b2}{a2}, \quad (1)$$

а уравнение цифрового корректирующего фильтра имеет следующий вид

$$Z(n) = -\frac{c1}{c2}\cdot Y(n-1) - \frac{c0}{c2}\cdot Y(n-2) + \left[Y(n) + \frac{a1}{a2}\cdot Y(n-1) + \frac{a0}{a2}\cdot Y(n-2)\right]\cdot\frac{a2}{c2}, \quad (2)$$

где $X(n)$ – сигнал на входе измерительного прибора (сейсмическая волна в точке измерения), $Y(n)$ – сигнал на выходе сейсмометра (исходная сейсмограмма, зарегистрированная сейсмометром), $Z(n)$ – сигнал на выходе корректирующего фильтра, а коэффициенты a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1 и c_2 являются функциями Fs, w_0, w_1, h и G, где Fs – частота дискретизации записи, w_0 – собственная частота сейсмомет-

ра, w_1 – новая собственная частота сейсмометра, по величине более низкая, чем w_0, h – затухание сейсмометра, G – чувствительность сейсмометра. В уравнениях (1-2) обозначено:

$$a_0 = w_0^2 + 4 \cdot Fs^2 - 4 \cdot Fs \cdot h \cdot w_0,$$
$$a_1 = -(8 \cdot Fs^2 - 2 \cdot w_0^2),$$
$$a_2 = 4 \cdot Fs + 4 \cdot h \cdot Fs \cdot w_0 + w_0^2,$$
$$b_0 = b_2 = 4 \cdot Fs^2 \cdot G,$$
$$b_1 = -8 \cdot Fs^2 \cdot G,$$
$$c_0 = w_1^2 + 4 \cdot Fs^2 - 4 \cdot Fs \cdot h \cdot w_1,$$
$$c_1 = -(8 \cdot Fs^2 - 2 \cdot w_1^2),$$
$$c_2 = 4 \cdot Fs^2 + 4 \cdot h \cdot Fs \cdot w_1 + w_1^2.$$

Стоит отметить, что описанная выше процедура коррекции записанных сейсмограмм отличается от стандартной коррекции АЧХ измерительного прибора (согласно паспортным данным). Использование предложенной нами методики позволяет значительно расширить частотный диапазон в области больших периодов. Критерием применимости данного метода является значительное превышение амплитуды регистрируемого сигнала над собственными шумами системы измерительного канала в исследуемом диапазоне периодов [Беседина и др., 2011].

Результаты исследований

Исследование сейсмометра с расширенной частотной характеристикой в области низких частот проводилось на примере малогабаритного геофона GS20DX. Сперва выполнялось модельное построение АЧХ и ФЧХ для датчика GS20DX с параметрами f_0 = 10 Гц, h = 0,707, G = 20 В/м/с. С помощью предложенного метода коррекции было выполнено расширение частной характеристики геофона в область низких частот до собственной частоты сейсмометра СМ-3 f_1 = 0,5 Гц.

На рис. 1 представлены АЧХ и ФЧХ для величины затухания геофона, схемы коррекции и СМ-3 h = 0,707. Как мы видим при одинаковых значениях затухания геофона и корректирующего фильтра наблюдается идеальное совпадение для характеристик геофона с расширенной частотной характеристикой и сейсмометра СМ-3.

Если точно определить величину затухания геофона невозможно или используется упрощенная процедура коррекции зарегистрированных сейсмограмм, например, при величине h = 1 корректирующего фильтра, вид частотных характеристик геофона с расширенной АЧХ меняется (рис. 2). Но даже в этом случае результаты вполне удовлетворительные: на АЧХ геофона после коррекции появляется горб высотой 3 дБ, фазовая характеристика искажена в пределах 12 градусов.

На следующем этапе модифицированная фазовая характеристика геофона исследовалась в лабораторных условиях. Для этого на вибростенде «ПСВУ» в ИДГ РАН была снята ФЧХ геофона GS20DX с параметрами f_0 = 10 Гц, h = 0,707, G = = 20 В/м/с и сейсмоприемника СМ-3 (f_1 = 0,5 Гц) в частотном диапазоне 0,8–16 Гц. Далее синтезировался цифровой фильтр корректирующей схемы, и рассчитанные значения фазы суммировались с эмпирическими данными ФЧХ геофона. На рис. 3 представлены фазовые характеристики сейсмометра СМ-3, геофона GS20DX,

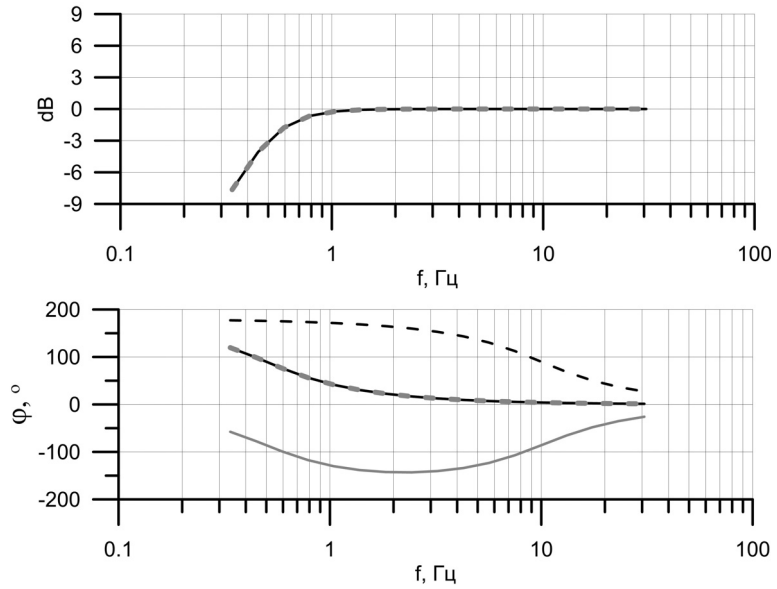

Рис. **1**. АЧХ (сверху) и ФЧХ (снизу) для геофона GS20DX и сейсмометра СМ-3 при величине затухания $h = 0{,}707$.
Черная сплошная линия – СМ-3, черная пунктирная линия – GS20DX, серая сплошная линия – схема коррекции, серая пунктирная линия – корректированный геофон GS20DX

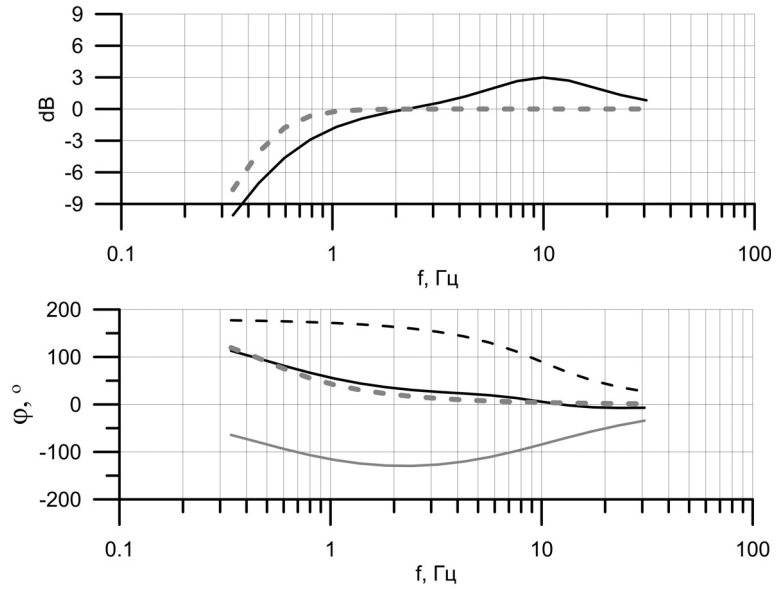

Рис. **2**. АЧХ (сверху) и ФЧХ (снизу) для геофона GS20DX и сейсмометра СМ-3 при величине затухания геофона и СМ-3 $h = 0{,}707$ и при затухании $h = 1$ корректирующего фильтра.
Черная сплошная линия – геофон GS20DX с расширенной частотной характеристикой в области низких частот, черная пунктирная линия – GS20DX, серая сплошная линия – схема коррекции, серая пунктирная линия – СМ-3

полученные экспериментально, а также ФЧХ геофона, после коррекции до нижней граничной частоты 0,5 Гц для значения затухания в корректирующей схеме h = 0,707. На рис. 4 представлены аналогичные зависимости с той лишь разницей, что величина затухания в схеме коррекции h = 1.

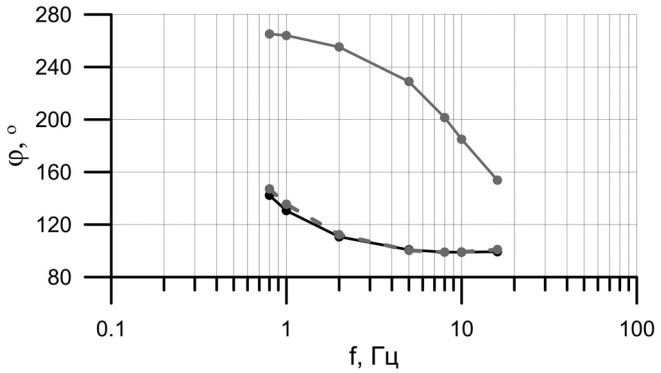

Рис. 3. ФЧХ сейсмометра СМ-3 (черная линия), геофона GS20DX (серая сплошная линия) и корректированного геофона до частоты 0,5 Гц (серая пунктирная линия) при значении затухания в корректирующей схеме h = 0,707

«Новая» фазовая характеристика (пунктирная линия на рис. 3) хорошо согласуется с ФЧХ сейсмометра СМ-3, в то время как на рис. 4 показано значительное расхождение модифицированной фазовой характеристикой геофона (пунктирная линия на рис. 4) с ФЧХ СМ-3. На частотах 0,8–5 Гц фазовый сдвиг между геофоном с расширенной частотной характеристикой и СМ-3 составляет 12–18 градусов при затухании h = 1, а при h = 0,707 величина фазовой задержки на частотах 0,8–2 Гц составляет 1,5–5 градусов, что при частоте опроса измерительного канала 200 Гц соответствует всего 1–3 отсчетам (см. Таблицу).

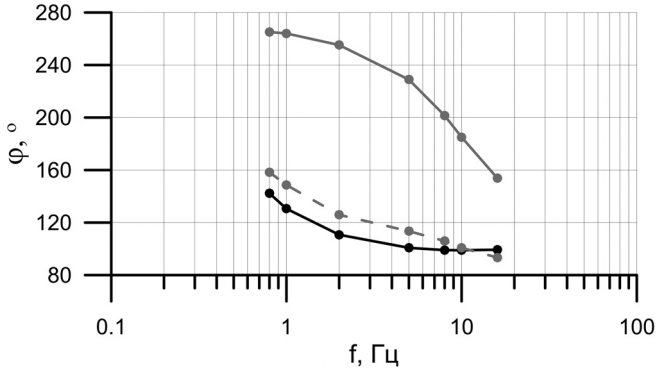

Рис. **4**. ФЧХ сейсмометра СМ-3 (черная линия), геофона GS20DX (серая сплошная линия) и корректированного геофона до частоты 0,5 Гц (серая пунктирная линия) при значении затухания в корректирующей схеме h = 1

Таким образом, для более точного проведения коррекции и получения надежных результатов необходимо знать величину затухания геофона. Для этого надо провести калибровку электродинамического датчика.

Таблица

Фазовый сдвиг в градусах и отсчетах (при частоте опроса 200 Гц) между геофоном с расширенной частотной характеристикой и сейсмометром СМ-3

f, Гц	*h* = 0,707		*h* = 1	
	Δφ, °	Δφ, отсчеты при шаге 0,005 с	Δφ, °	Δφ, отсчеты при шаге 0,005 с
0,8	4,8047	3,3366	16,0558	11,1499
1	4,9150	2,7306	18,0283	10,0158
2	1,5839	0,4400	15,2024	4,2229
5	–0,4232	–0,0470	12,6901	1,4100
8	–0,1078	–0,0074	6,9479	0,4825
10	0,1497	0,0083	1,8203	0,1011
16	1,6127	0,0560	–5,9383	–0,2062

Суть данной процедуры состоит в следующем: если пропустить через рабочую катушку сейсмоприемника постоянный ток I_0 определенной величины, который сместит ее в магнитном зазоре на величину Δy, а затем резко отключить ток и зарегистрировать напряжение переходного процесса на рабочей катушке, то по первым двум фазам (рис. 5) можно вычислить затухание h, собственную частоту ω_0 и чувствительность G сейсмоприемника – величину напряжения на рабочей катушке, обусловленную единицей скорости грунта.

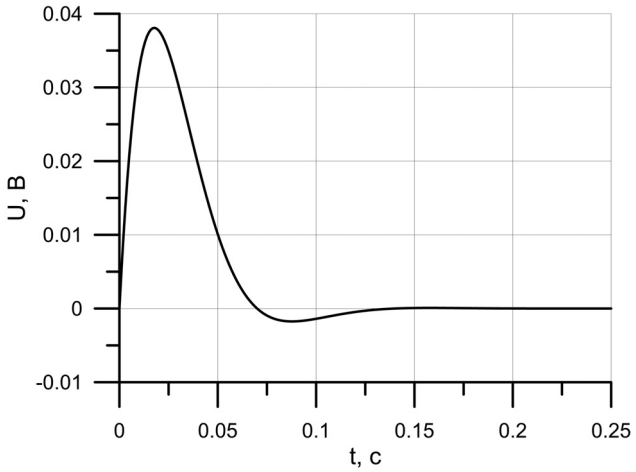

Рис. 5. Напряжение на катушке сейсмометра при калибровке ступенькой тока

Затухание датчика h при этом вычисляется по формуле:

$$h = \frac{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}}, \qquad (3)$$

где U_1 и U_2 – первый (положительный) и второй (отрицательный) экстремумы сигнала с выхода рабочей катушки сейсмоприемника. Для затухания h = 0,707 справедливо следующее соотношение для амплитуд колебаний катушки

$$U_1/U_2 = 23.$$

При проведении полевых измерений и установки датчиков измерительный канал включает в себя также операционный усилитель, который может вносить дополнительные фазовые искажения. Поэтому при выборе усилителя нужно учитывать его характеристики не только в штатном частотном диапазоне измерительного прибора, но и в предполагаемом расширенном (с помощью коррекции) диапазоне частот.

Заключение

В статье рассматривается метод численной коррекции применительно к геофону GS20DX и последующее сравнение фазовых и амплитудных характеристик модифицированного геофона и сейсмометра СМ-3. Исследована зависимость частотной характеристики геофона с расширенной частотной характеристикой от параметров датчика и схемы коррекции. Результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования позволяют говорить о том, что на АЧХ и ФЧХ оказывает влияние величина затухания геофона. При этом результаты можно считать достоверными в том случае, когда коррекция выполняется при той величине затухания, которое имеется в геофоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-05-00780-а, № 13-05-00950-а), гранта НШ-231.2012.5 по поддержке ведущих научных школ РФ и ОНЗ РАН (Программа № 6).

Литература

Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Численная коррекция сейсмограмм и шумы измерительного канала // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 2.: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2011. С. 100–108.

Кабыченко Н.В., Беседина А.Н., Павлов Д.В. Патент полезной модели «Устройство для коррекции частотной характеристики датчика» № 2011119205/28 МПК G01V/00(2006.01) 13.05.2011.