ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ СЕЙСМОПРИЕМНИКА

В.И. Анисимов, А.В. Кравцов, А.В. Комяков

*Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия
Вооруженных Сил Российской Федерации», Москва, Российская Федерация*

Рассмотрены вопросы расчета характеристик цифрового фильтра для обработки сигналов от сейсмического средства обнаружения. Обоснована целесообразность применения адаптивного цифрового фильтра при обработке сейсмических сигналов от наземного мобильного объекта.

Ключевые слова: сейсмический датчик, адаптивный цифровой фильтр, спектр сигнала, сейсмическое средство обнаружения.

SUBSTANTIATION OF USING ADAPTIVE DIGITAL FILTER FOR SIGNAL PRE-PROCESSING AT THE OUTPUT OF THE SEISMIC RECEIVER

V.I. Anisimov, A.V. Kravtsov, A.V. Komyakov

*Military Educational Research Center of Ground Forces "Combined Arms Military Academy
of Armed Forces of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation*

The problems of calculating the characteristics of a digital filter for processing signals from a seismic detection means are considered. The expediency of using an adaptive digital filter when processing seismic signals from a ground-based mobile object is substantiated.

Keywords: seismic sensor, adaptive digital filter, spectrum of signal, seismic detection mean.

Сейсмические датчики относятся к пассивным датчикам скрытой установки в грунт, которые реагируют на характерные сейсмические колебания, вызываемые перемещением наземного мобильного объекта (НМО). Это достоинство сейсмических датчиков определяет их широкое применение в сейсмических средствах обнаружения (ССО) различного назначения. Дальнейшее повышение эффективности функционирования ССО предполагает, наряду с улучшением других характеристик (снижение вероятности ложных срабатываний, повышение вероятности обнаружения, времени работы и т. д.), увеличение их информативности. Под этим понимается, наряду с обнаружением НМО, его классификацией (например, человек, колесная техника, гусеничная техника, ложный сигнал), определение пеленга, определение расстояния до объекта (определение координат). В настоящее время к области создания и повышения эффективности ССО проявляется большой интерес, который нашел отражение в ряде работ авторов [1–3].

В то же время отдельным направлением является интеллектуализация ССО, которая выражается не только в обнаружении и классификации наземных мобильных объектов, но и в распознавании характера их воздействия на грунт, например, способ передвижения (бег, ходьба), выполнение земляных работ (подкоп, отрывка котлована), установка взрывных устройств с последующей засыпкой грунтом, маскировка места установки, отход диверсионной группы или организация засады.

Для обоснования рационального алгоритма обработки сейсмических сигналов с различными характеристиками предварительно необходимо определить их спектральный состав, чтобы использовать избирательные системы с соответствующей частотой настройки

и шириной полосы пропускания для эффективного выделения полезной информации и подавления помех. То есть нужно предварительно обосновать можно ли обойтись одним, но широкополосным фильтром, охватывающим спектры всех контролируемых сигналов, или предпочтительнее линейка узкополосных фильтров, полосы пропускания которых согласованы со спектрами различных сигналов, или целесообразно использовать адаптивный фильтр с настройкой на максимум частоты спектра сигнала и согласованием полосы пропускания избирательной системы с шириной спектра сигнала.

Выбор характеристик избирательной системы рассмотрен применительно к обработке трех типов сигналов: сейсмического фона, шагов приближающегося к сейсмоприемнику человека и отрывки углубления в грунте с использованием саперной лопатки. Обработка сейсмических сигналов выполнялась по их записям с выхода сейсмоприемника в полевых условиях. Модуль составляющих амплитудного спектра сигналов вычисляется по формуле (1)

$$|S(n\Delta f)| = \frac{1}{N_T T} \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{N_T} S(kT) \cos(2\pi n \Delta f k T) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{N_T} S(kT) \sin(2\pi n \Delta f k T) \right]^2} \quad (1)$$

где N_T – количество отсчетов во временной области, $k=1 \dots N_T$; T – интервал дискретизации во временной области; $n\Delta f$ – текущий отсчет спектральной составляющей с интервалом Δf .

Варианты модулей амплитудных спектров сейсмических сигналов сейсмического фона, шагов человека и отрывки углубления в грунте саперной лопаткой на выходе геофона GS-20DX с верхней частотой среза $f_b = 250$ Гц представлены на рис. 1–3.

Анализ показывает, что максимумы спектра сейсмического фона могут находиться в пределах 4... 32 Гц, шагов человека – от 12 до 24 Гц, отрывки углубления в грунте – от 12 до 46 Гц.

Рис. 1. Модуль амплитудного спектра сейсмического фона

Рис. 2. Модуль амплитудного спектра сейсмических сигналов шагов человека

Рис. 3. Модуль амплитудного спектра сейсмических сигналов отрывки углубления в грунте

При этом основная энергия полезных сигналов находится в диапазоне для шагов человека от 8 до 40 Гц, а для отрывки углубления в грунте – от 8 до 65 Гц. Причем в отдельных реализациях сигналов ширина спектров сигналов может изменяться в широких пределах, поэтому использование одного широкополосного фильтра, например, с полосой пропускания $\Delta f = 57$ Гц (от 8 до 65 Гц), при ширине спектра шагов человека 10–12 Гц, нецелесообразно из-за большого уровня помех, искажения формы полезного сигнала, снижения вероятности его правильного распознавания.

Использование линейки из нескольких узкополосных фильтров оправдано, если разные сигналы имели бы фиксированные диапазоны спектральных составляющих. Кроме того, этот вариант построения избирательных систем усложняет обработку сигналов.

Более рациональным является использование адаптивного фильтра с настройкой на максимум спектра сигнала в каждой реализации, определением ширины его спектра и согласованием с ним полосы пропускания фильтра. На рис. 4–7 приведены графики сигналов во временной области шагов человека и сигналов отрывки углубления в грунте на выходе геофона и адаптивного фильтра.

Реализация цифрового адаптивного фильтра после определения максимума спектра сигнала и полосы пропускания фильтра заключается в вычислении соответствующих коэффициентов разностного уравнения.

Рис. 4. Реализация сигнала шагов человека на выходе геофона в полосе 250 Гц

Рис. 5. Реализация сигнала шагов человека на выходе адаптивного фильтра с частотой настройки $f_0 = 20$ Гц и эффективной полосой $\Delta f_3 = 14$ Гц

Рис. 6. Реализация сигнала отрывки углубления в грунте на выходе геофона в полосе 250 Гц

Рис. 7. Реализация сигнала отрывки углубления в грунте на выходе адаптивного фильтра с частотой настройки $f_0 = 12$ Гц и эффективной полосой $\Delta f_3 = 6$ Гц

Расчет цифрового фильтра (например, аналог – одиночный колебательный контур) с частотой настройки f_0 включает пересчет частоты настройки цифрового фильтра с учетом нелинейности Z-преобразования [4, 5]

$$\omega_0 = 2 / T \cdot \operatorname{tg}(\pi f_0 T), \quad (2)$$

где T – интервал стробирования аналогового сигнала; вычисление постоянной времени цифрового фильтра, определяющей полосу пропускания:

$$\omega_1 = 2 / T \cdot \operatorname{tg}(\pi (f_0 + \Delta f_3 / 2) \cdot T),$$

$$\omega_2 = 2 / T \cdot \operatorname{tg}(\pi (f_0 - \Delta f_3 / 2) \cdot T),$$

$$\tau = \pi / (\omega_1 - \omega_2); \quad (3)$$

вычисление коэффициентов цифрового фильтра:

$$\begin{aligned} A_0 &= 2T^2 + 4T\tau; A_1 = 4T^2; A_2 = 2T^2 - 4T\tau; \\ B_0 &= 4\tau^2 + 4T\tau + T^2 + (\omega_0 T\tau)^2; B_1 = 2T^2 - 8\tau^2 + 2(\omega_0 T\tau)^2 \\ B_2 &= 4\tau^2 - 4T\tau + T^2 + (\omega_0 T\tau)^2; \\ A_0 &= A_0/B_0; A_1 = A_1/B_0; A_2 = A_2/B_0; B_1 = B_1/B_0; B_2 = B_2/B_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Разностное уравнение для цифрового фильтра, определяющее его функционирование, имеет вид

$$S_{\text{вых}}(t) = A_0 \cdot S_{\text{вх}}(t) + A_1 \cdot S_{\text{вх}}(t - T) + A_2 \cdot S_{\text{вх}}(t - 2T) - B_1 \cdot S_{\text{вых}}(t - T) - B_2 \cdot S_{\text{вых}}(t - 2T). \quad (5)$$

После пропускания сейсмических сигналов через избирательную систему в виде цифрового фильтра необходимо определить информационные признаки, которые могут использоваться для последующего распознавания характера воздействия объекта на грунт. Если при обнаружении движущегося человека может использоваться такая информация сейсмических сигналов, как периодичность повторения, изменение уровня и частоты сигнала (приближение или удаление от средства обнаружения), то при изменении характера деятельности наземного мобильного объекта (подход к объекту, земляные работы при установке заряда ВВ, его маскировка, отход или оборудование огневых точек при организации засады) для идентификации действий противника требуется больший объем информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройство для обнаружения человека и группы людей по сейсмическим сигналам: патент РФ / Акимов Ю.С., Дудкин В.А., Захаров С.М. № 2337405 от 27.10.2008.
2. Митрохин М.А., Чистова Г.К. Методика и результаты исследования характеристик объектов военной наземной техники по сейсмическим сигналам // Известия высших учебных заведений, Поволжский регион. Серия «Технические науки». 2008. №2. С. 35–39.
3. Устройство для адаптивной сейсмической пеленгации объектов: патент РФ / Дудкин В.А. [и др.]. №2410751 от 25.05.2009.
4. Антонью А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
5. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990. 256 с.