

УДК 621.391

ОСОБЕННОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Н.Г. КУХАЛЬСКИЙ, П.И. КОЗЕКА*

*Институт пограничной службы Республики Беларусь
Калиновского, 4, Минск, 220103, Беларусь*

**Войсковая часть 01549
Бобруйская, 3, Минск, 220600, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 января 2011

Рассмотрены варианты корреляционной обработки принятого сейсмического сигнала движущихся наземных объектов и их влияние на величину отношения сигнал/шум на выходе обнаружителей, применяемых в схемах технических средств охраны различного назначения.

Ключевые слова: сейсмология, корреляция, спектр.

Введение

Физический смысл корреляционной обработки заключается в том, что принятые колебания перемножаются с опорным сигналом, соответствующим по форме и параметрам точно ожидаемому сигналу, а результаты произведения интегрируются [1]. Корреляционная обработка выявляет сходство (корреляцию) принимаемых колебаний с ожидаемыми.

Сейсмический сигнал движущегося наземного объекта, как правило, имеет неизвестные параметры по времени появления, длительности и форме огибающей, его преобладающей частоте. Такая неопределенность значительно усложняет задачу обнаружения по сравнению с вариантами выделения радиолокационного сигнала с известными параметрами, когда сигнал сначала формируется, излучается, а потом принимается и проходит корреляционную обработку относительно известной модели сформированного сигнала. Среда распространения сейсмических волн является частотнозависимой и значение преобладающей частоты сейсмического полезного сигнала может изменяться в зависимости от среды и дальности до цели от единиц до десятков Герц [2]. Поэтому примеры корреляционных обнаружителей, которые описаны во многих работах [3–5], посвященных методам обработки принятых радиолокационных сигналов, могут быть использованы для проектирования устройств обнаружения сейсмических сигналов после учета их спектрально-временных особенностей.

Особенности корреляционной обработки сейсмических сигналов

Рассмотрим пример корреляционной обработки сейсмического сигнала движущегося человека, когда в качестве опорного сигнала коррелятора используется сигнал, по положению и форме совпадающий с огибающей ожидаемого сигнала шага человека с внутренним заполнением колебаниями на преобладающей частоте принимаемого сигнала (рис. 1,а) и без (рис. 1,б).

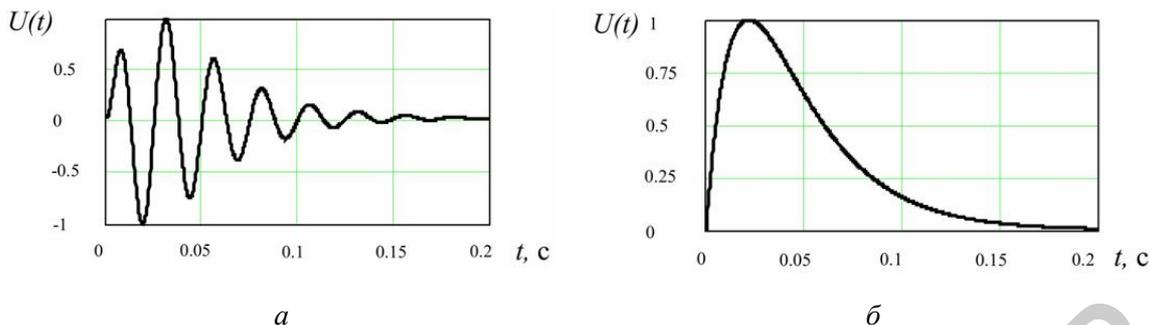


Рис. 1. Опорный сигнал: *а* – с заполнением; *б* – без заполнения

На рис. 2,*а* показан сейсмический сигнал шага человека, принятый с дальности 15 м, а на рис. 2,*б* его энергетический спектр.

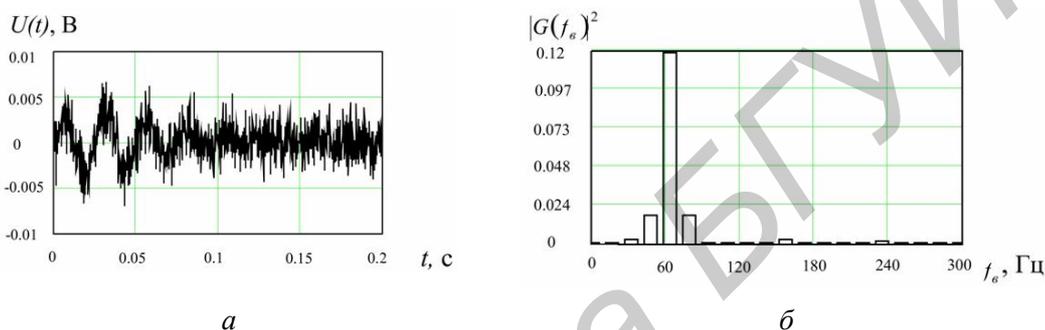


Рис. 2. Принятый сейсмический сигнал одного шага человека (*а* – сейсмограмма полезного сигнала с шумом; *б* – энергетический спектр полезного сигнала и шума)

Преобладающая частота полезного сигнала, изображенного на рис. 2,*а* составляет около 60 Гц.

Рассмотрим обработку принятого сейсмического сигнала корреляционным обнаружителем с одним квадратурным каналом (рис. 3).

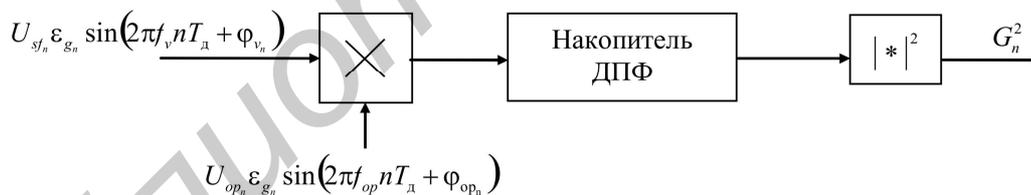


Рис. 3. Коррелятор с одним квадратурным каналом

В этом случае при совпадении частоты f_{op} и фазы ϕ_{op} опорного сигнала и преобладающей частоты f_v и фазы ϕ_v принятого (рис. 4,*а*), после перемножения происходит перенос сигнала по частоте (рис. 4,*б*) на величину разности и суммы частот перемножаемых сигналов согласно выражению:

$$U_{sf_n} \epsilon_{g_n} \sin(2\pi f_v n T_d) \cdot U_{op_n} \epsilon_{g_n} \sin(2\pi f_{op} n T_d) = \frac{1}{2} U_{sf_n} U_{op_n} \epsilon_{g_n}^2 (\cos 2\pi n T_d (f_v + f_{op}) - \cos 2\pi n T_d (f_v - f_{op})),$$

где U_{sf_n} – принятый сейсмический сигнал; ϵ_{g_n} – огибающая сигнала на выходе сейсмоприемника; n – номер дискретного отсчета; T_d – частота дискретизации; U_{op_n} – опорный сигнал.

Отношение сигнал/фон в данном случае увеличивается на 6–7 дБ, в том числе за счет совпадения огибающих принятого и опорного сигналов по положению.

На рис. 8 (график 1) показана зависимость изменения отношения сигнал/фон ρ_{sf} после перемножения от величины расстройки частоты опорного сигнала. Анализ графика показывает,

что при отклонении частоты опорного сигнала от частоты принятых колебаний на $\Delta f_e = \pm 3$ Гц, отношение сигнал/фон увеличивается на 5–6 дБ; при отклонении на $\Delta f_e = \pm 5$ Гц отношение сигнал/фон увеличивается на 3–4 дБ, при отклонении частоты на $\Delta f_e = \pm 7$ Гц – на 0,8-1 дБ, при отклонении фазы опорного сигнала от фазы принятых колебаний на $\Delta \varphi_{op} = \pm \frac{\pi}{4}$ радиан отношение сигнал/фон увеличивается на 2,9–3,1 дБ, а при отклонении на $\Delta \varphi_{op} = \pm \frac{\pi}{2}$ – на 0,3–0,5 дБ соответственно (рис. 9, график 1).

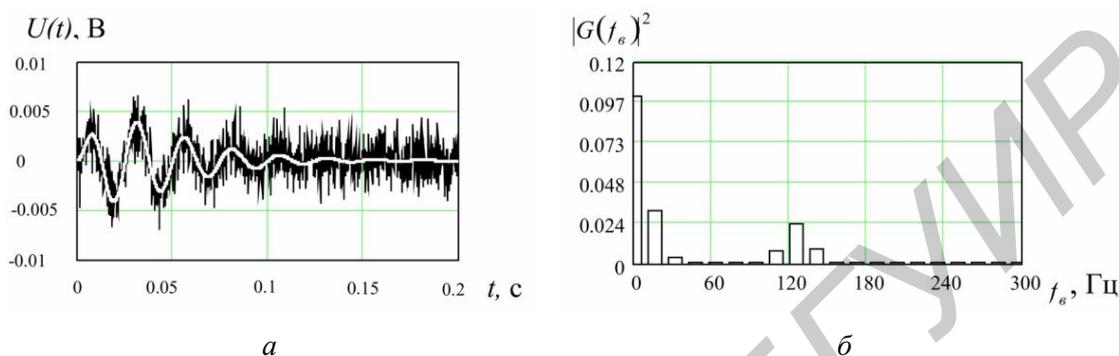


Рис. 4. Сейсмический сигнал после перемножения (а – принятый сигнал и сигнал опорного генератора; б – энергетический спектр сигнала после перемножения)

Для исключения потери полезного сигнала из-за априорной неопределенности его начальной фазы в схеме обнаружителя могут использоваться два квадратурных канала (рис. 5).

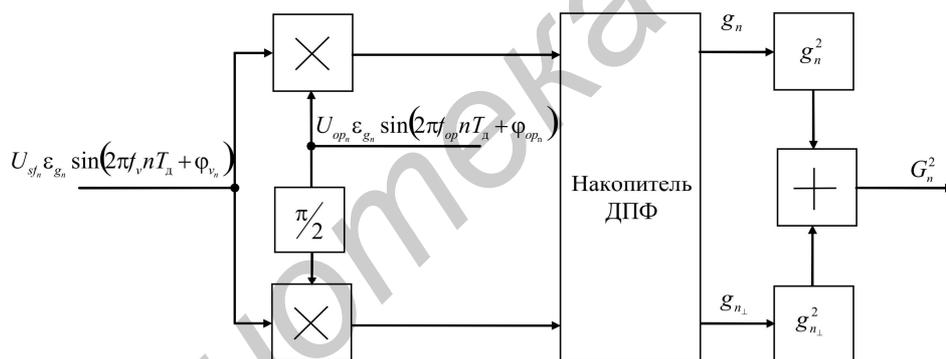


Рис. 5. Коррелятор с двумя квадратурными каналами

Принятый сигнал перемножается с опорным сигналом с ожидаемой частотой и фазой в первом канале и с фазой, сдвинутой на $\frac{\pi}{2}$, во втором канале. На вход устройства ДПФ (дискретного преобразования Фурье) поступают две квадратурные составляющие g и g_{\perp} . Над ними проводится операция ДПФ согласно выражениям:

$$g_n = \text{Re } G_n = \sum_{l=0}^{N_{FT}-1} \left(u_{sf_l} \cos\left(\frac{2\pi nl}{N_{FT}}\right) + u_{sf_{l\perp}} \sin\left(\frac{2\pi nl}{N_{FT}}\right) \right),$$

$$g_{n\perp} = \text{Im } G_n = \sum_{l=0}^{N_{FT}-1} \left(u_{sf_{l\perp}} \cos\left(\frac{2\pi nl}{N_{FT}}\right) - u_{sf_l} \sin\left(\frac{2\pi nl}{N_{FT}}\right) \right),$$

где G_n – значения спектральных составляющих обрабатываемого сигнала; N_{FT} – размер спектральной выборки.

Совокупность значений двух ортогональных составляющих g_n и $g_{n\perp}$ определяет значения спектральных составляющих обрабатываемого сигнала G_n .

Как и в предыдущем случае при совпадении частоты и фазы опорного сигнала и преобладающей частоты и фазы принятого, после перемножения происходит перенос сигнала по частоте на величину разности и суммы частот перемножаемых сигналов, отношение сигнал/фон в данном случае увеличивается на 6–7 дБ (рис. 6).

На рис. 8 (график 2) показана зависимость изменения отношения сигнал/фон после перемножения от величины расстройки частоты опорного сигнала для схемы обнаружителя с двумя квадратурными каналами. Анализ графика показывает, что при отклонении частоты опорного сигнала от частоты принятых колебаний на $\Delta f_e = \pm 3$ Гц, отношение сигнал/фон увеличивается на 5,8–6 дБ, при отклонении на $\Delta f_e = \pm 5$ Гц отношение сигнал/фон увеличивается на 5,2–5,5 дБ, при отклонении частоты на $\Delta f_e = \pm 7$ Гц – на 4,5–5 дБ, при отклонении фазы опорного сигнала от фазы принятых колебаний на $\Delta \varphi_{op} = \pm \pi/4$ радиан отношение сигнал/фон увеличивается на 5,7–6 дБ, при отклонении на $\Delta \varphi_{op} = \pm \pi/2$ – на 5,4–5,6 дБ соответственно (рис. 9, график 2).

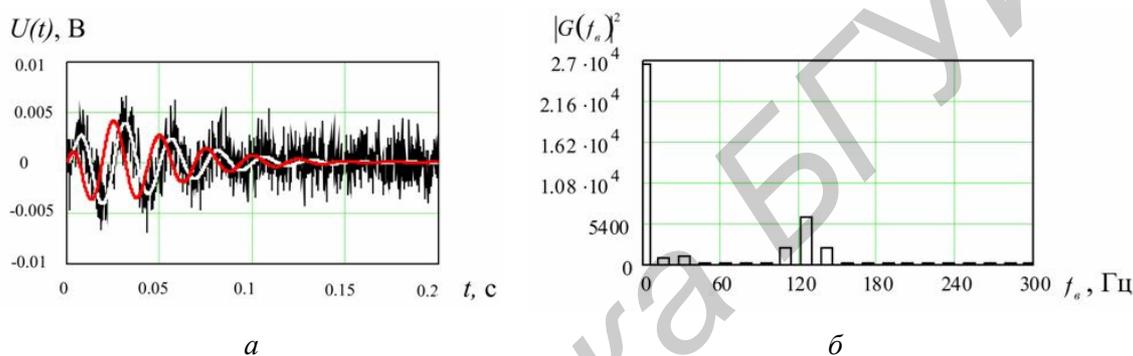


Рис. 6. Сейсмический сигнал после перемножения (*a* – принятый сигнал и опорные сигналы; *б* – энергетический спектр сигнала после перемножения)

Для устранения априорной неопределенности относительно значений преобладающей частоты и фазы принимаемого сейсмического сигнала после перемножения в схеме устройства корреляционной обработки в первом и во втором случае необходимо предусмотреть многоканальную обработку.

Для снижения аппаратных затрат, позволяющих устранить априорную неопределенность относительно преобладающей частоты принимаемого сейсмического сигнала, а также его начальной фазы, предлагается использовать в качестве опорного сигнала коррелятора сигнал, по форме и положению совпадающий с огибающей ожидаемого сигнала шага человека без внутреннего заполнения (рис. 7,*a*).

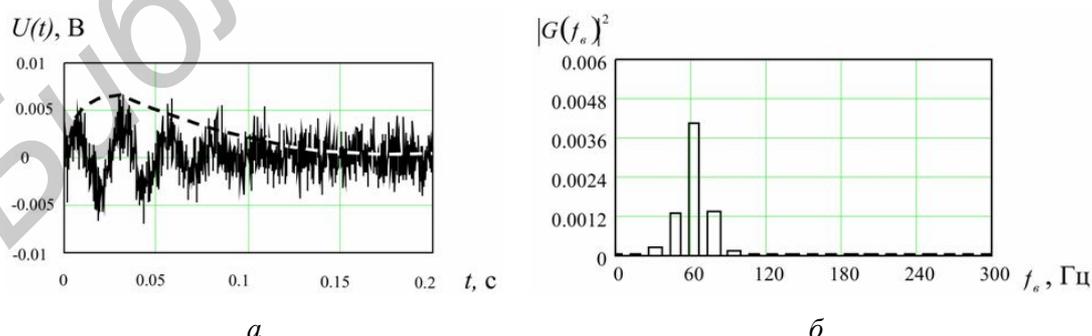


Рис. 7. Сейсмический сигнал после перемножения (*a* – принятый сигнал и сигнал опорного генератора без заполнения; *б* – энергетический спектр сигнала после перемножения)

В этом случае значение отношения сигнал/фон после перемножения инвариантно преобладающей частоте (рис. 8, график 3) и фазе (рис. 9, график 3) принимаемого сейсмического сигнала. Отношение сигнал/фон в данном случае увеличивается на 3–4 дБ за счет совпадения огибающих принятого и опорного сигналов по положению (рис. 7,*б*).

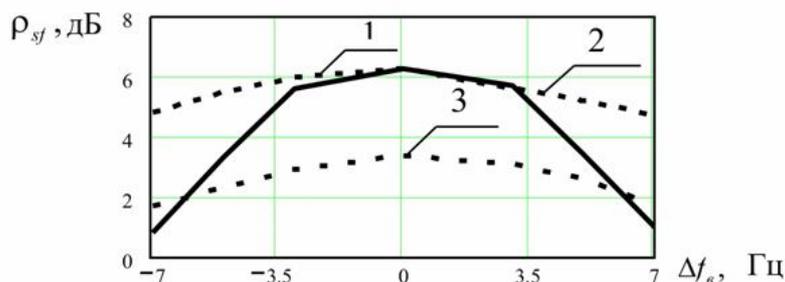


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/фон после перемножения от расстройки по частоте опорного сигнала: 1 – график, соответствующий опорному сигналу с заполнением в схеме с одним квадратурным каналом; 2 – график, соответствующий опорному сигналу с заполнением в схеме с двумя квадратурными каналами; 3 – график, соответствующий опорному сигналу без заполнения

Анализ графика показывает, что при отклонении частоты опорного сигнала от частоты принятых колебаний на $\Delta f_0 = \pm 3$ Гц отношение сигнал/фон увеличивается на 2,8–3 дБ, при отклонении на $\Delta f_0 = \pm 5$ Гц отношение сигнал/фон увеличивается на 2,2–2,5 дБ.

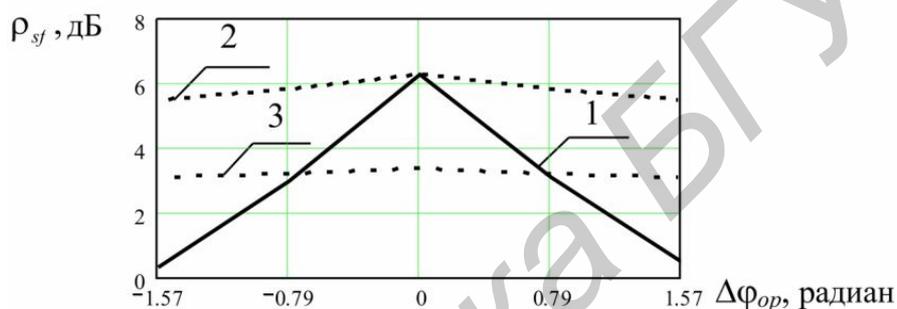


Рис. 9. Зависимость отношения сигнал/фон после перемножения от расстройки по фазе опорного сигнала: 1 – график, соответствующий опорному сигналу с заполнением в схеме с одним квадратурным каналом; 2 – график, соответствующий опорному сигналу с заполнением в схеме с двумя квадратурными каналами; 3 – график, соответствующий опорному сигналу без заполнения

Заключение

Проведенные исследования показали, что максимально возможные потери в отношении сигнал/фон при использовании в качестве опорного сигнала без внутреннего заполнения, позволяющего снизить аппаратные затраты при построении коррелятора, по сравнению с опорным сигналом, совпадающим по форме и положению и имеющим внутреннее заполнение, составляют около 5 дБ, а в среднем, из практики, 1–3 дБ и менее.

Для осуществления обработки сигнала с неизвестным временем запаздывания волнового пакета необходимо использовать многоканальные схемы, устраняющие априорную неопределенность относительно этого параметра.

FEATURES OF SEISMIC SIGNALS CERELATION PROCESSING

N.G. KUKHALSKI, P.I. KOZEKA

Abstract

The variants of the seismic signal correlation processing of moving ground targets and their impact on the ratio of signal to noise at the output of detectors used in the schemes of technical means of protection for different purposes, are studied.

Литература

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., 1981.
2. Кухальский Н.Г. // Докл. БГУИР. 2008ю № 3. С. 116–118.
3. Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М., 1960.
4. Охрименко А.Е. Основы радиолокации. М., 1983.
5. Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н. и др. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. М., 1998.

Библиотека БГУИР