



ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА УДАРОВ ИМПУЛЬСНЫХ НЕВЗРЫВНЫХ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В.А. Детков¹, М.А. Копылов¹, Г.Я. Шайдуров²

¹ОАО “Енисейгеофизика”, 660074, Красноярск, ул. Ленинградская, 68, Россия,
e-mail: v-detkov@yandex.ru, common@e-geo.ru

²Сибирский федеральный университет, кафедра радиоэлектронных систем,
660041, просп. Свободный, 79, e-mail: gshaidurov@sfu-kras.ru

Приведено описание оптимального статистического алгоритма определения числа ударов импульсных невзрывных источников сейсмических волн, позволяющего производить в автоматическом режиме остановку источника по достижении заданного отношения сигнал/шум.

Импульсная невзрывная сейсморазведка, удары, число, оптимальное статистическое правдоподобие, отношение, сигнал, помеха

OPTIMAL ALGORITHMS FOR ESTIMATING REQUIRED NUMBER OF HITS FOR IMPULSE NON-EXPLOSIVE SEISMIC SOURCES

V.A. Detkov¹, M.A. Kopylov¹, G.Ya. Shaidurov²

¹Yeniseigeophizika Ltd., Leningradskaya str., 68, Krasnoyarsk, 660074, Russia,
e-mail: v-detkov@yandex.ru, common@e-geo.ru

²Siberian Federal University, Department Radio Electronics Systems,
Prosp. Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia, e-mail: gshaidurov@sfu-kras.ru

In the article we give the description of optimal statistic algorithm for determining the number of hits for impulse non-explosive seismic source that allows to stop the source automatically after reaching the intended signal-to-noise ratio.

Pulse non-explosive seismic source, number of hits, optimal statistic plausibility, signal-to-noise ratio

Реализованные в известных зарубежных сейсмо- станциях Sersel и Input пакеты программ оперативной оценки отношения сигнал/шум, как правило, не позволяют достаточно быстро производить эту оценку после каждого удара, к тому же являются “закрытым продуктом”, не позволяющим отечественному пользователю понять ни корректность используемых алгоритмов, ни их потенциальные возможности.

Ниже даются основы статистической теории подобной оценки методом правдоподобия и алгоритмы определения необходимого числа ударов. Однако существенным преимуществом интервальной оценки величины сигнал/шум через отношение правдоподобия является надежность оценки, поскольку определение мощности одиночного полезного сигнала из-за малого интервала наблюдения всегда субъективно и требует повторения ударов.

Рассмотрим задачу повышения производительности работ импульсных невзрывных источников (ИНИ) за счет минимизации количества рабочих циклов путем оперативной оценки порогового уровня отношения сигнал/шум в процессе накопления сигнала на рабочей точке.

Поступающая комбинация сигнала и шума на произвольный j -й сейсмоприемник косы описывается как

$$U_{cj}(t_j t_i) = \sum_{i=0}^T U_c(t - t_i) + \sum_{i=0}^T U_{\Pi}(t - t_i) + U_{\text{ш}}(t - t_i), \quad (1)$$

где t – текущее время; t_i – время отсчета сигнала; T – период накопления; $U_{\Pi}(t - t_i)$ – синхронная помеха за счет акустической неоднородности среды. В отсутствие сигнала до производства первого удара на сейсмоприемнике наблюдается шумовая функция

$$U_{c\text{aj}}(t_j t_i) = U_{\text{ш}}(t - t_i). \quad (2)$$

Будем считать, что шум в виде микросейсм описывается в соответствии с [Поляков, Грехов, 2010] рэлеевским законом распределения как суперпозиция сигналов со случайными амплитудами и фазами.

В случае нормального закона распределения шума, эргодического по времени, достаточной оценкой мощности шума является его дисперсия $\sigma_{\text{ш}}^2$.

В работе [Шайдуров, Детков, 2010] показано, что при большом отношении мощности СП P_{Π} к дисперсии шума $P_{\Pi}/\sigma_{\text{ш}}^2 \gg 1$ отношение сигнал/помеха плюс шум не зависит от мощности источника сейсмосигнала (мощности удара ИНИ), и по этой причине выбор времени отсчета сигнала t_i необходимо производить на поздних временах его поступления, свободных от СП. В противном случае необходимо использовать алгоритмическую процедуру отделения полезного сигнала от СП, как показано в [Детков, Шайдуров, 2007]. Специальной задачей является определение представительской выборки сейсмоприемников косы, адекватно учитывающей складывающееся в процессе работы ИНИ отношение сигнал/шум.

Интуитивно как будто ясно, что за оценку уровня полезного сигнала необходимо брать сигналы наиболее удаленного по расстоянию от ИНИ сейсмоприемника, а дисперсию шума оценивать усреднением по совокупности сейсмоприемников.

При этом авторы работы [Поляков, Грехов, 2010] рекомендуют выборочный алгоритм оценки дисперсии шума путем введения коэффициента веса, обратного дисперсии учитываемой реализации шума на выходе j -го сейсмоприемника. Подобная процедура, при условии равенства рабочего и вспомогательного времени, отводимого на проезды ИНИ и подготовку к работе, как показывают авторы статьи, эквивалентна двукратному выигрышу по мощности ИНИ, а наибольшая чувствительность при накоплении сигналов к отношению сигнал/шум достигается при $q = S/N = 0,5-2$ и оптимальное число ударов соответствует 4. Д.Б. Поляков, И.О. Грехов [2010] считают, что наряду с весовым суммированием шума можно совместить подобную процедуру с частотно-временным анализом комбинации сигнала и шума, т. е. производить дополнительную частотную фильтрацию.

При повторяющейся известной форме полезного сигнала на всей плоскости сейсмограммы t, x и неравномерном по спектру шуме естественной оптимальной процедурой обработки комбинации сигнала и шума будет согласованная фильтрация с весовой выборкой шума.

В общем случае, когда законы распределения вероятностей сигнала и шума неизвестны и могут определяться в процессе эксперимента по текущим их реализациям, необходим непараметрический алгоритм оперативной оценки отношения сигнал/шум, основанный на проверке статистических гипотез приема сигнала и шума.

А.А. Никитиным [1979] рассмотрено последовательное правило принятия решения (алгоритм Вальда), когда в процессе повтора эксперимента, в зависимости от заданных величин вероятностей пропуска сигнала и ложной тревоги, принимается решение о достаточности повторов.

Средний объем наблюдений, т. е. число повторов для нормального закона распределения комбинации сигнала и шума, определяется соотношением

$$m = \frac{2\sigma^2}{U_c^2} \left[\beta \ln \frac{\beta}{1-\alpha} + (1-\alpha) \ln \frac{1-\beta}{\alpha} \right], \quad (3)$$

где

$$\alpha = \int_{U_n}^{\infty} W(U/U_{ш}) dU \quad (4)$$

– вероятность ложной тревоги, т. е. принятие решения о наличии сигнала в выборке шума;

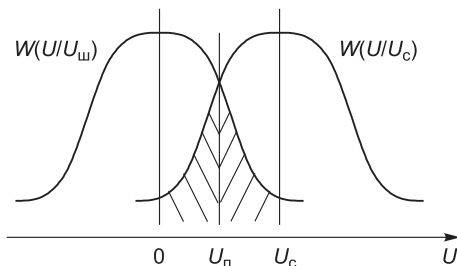


Рис. 1. Графическая интерпретация функций условных плотностей распределения вероятностей амплитуды наблюдаемой реализации (выборки).

$$\beta = \int_{-\infty}^{U_n} W(U/U_c) dU \quad (5)$$

– вероятность пропуска сигнала при его наличии в выборке; $W(U/U_c)$ – условная плотность распределения вероятности при наличии сигнала в выборке; $W(U/U_{ш})$ – условная плотность распределения вероятности при отсутствии сигнала; U – текущее значение амплитуды выборки; U_c – амплитуда сигнала; σ^2 – дисперсия шума. Вероятности правильного обнаружения сигнала соответствует величина $(1-\beta)$.

На рис. 1 изображены зависимость функций $W(U/U_c)$ и $W(U/U_{ш})$ от амплитуды наблюдаемой выборки сигнала и шума для нормального закона распределения шума, где U_n – порог принятия решения.

Функцию $\Lambda = \frac{W(U/U_c)}{W(U/U_{ш})}$ принято называть отношением правдоподобия.

Решение о наличии сигнала в выборке принимается, когда

$$\Lambda(u) \geq \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{P_{по}}{P_{лт}} > 1, \quad (6)$$

где $P_{по}$ и $P_{лт}$ соответственно вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги.

Для нормального закона распределения шума:

$$W(U/U_{ш}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2\sigma^2}},$$

$$W(U/U_c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U-U_c)^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

$$\Lambda = \frac{W(U/U_c)}{W(U/U_{ш})} = \exp \left\{ -\frac{U_c^2}{2\sigma^2} + \frac{UU_c}{\sigma^2} \right\}.$$

В статистической теории обнаружения сигналов, в частности в радиолокации, связь между функциями $P_{по}$ и $P_{лт}$ обычно определяют через отношение сигнал/шум по мощности $q = \frac{U_c^2}{\sigma^2}$ (рис. 2).

В практике работ алгоритм определения отношения сигнал/шум через q реализуется проще чем (6), однако при условии точного знания амплитуды сигнала и априори известной гипотезы о нормальном законе распределения шума.

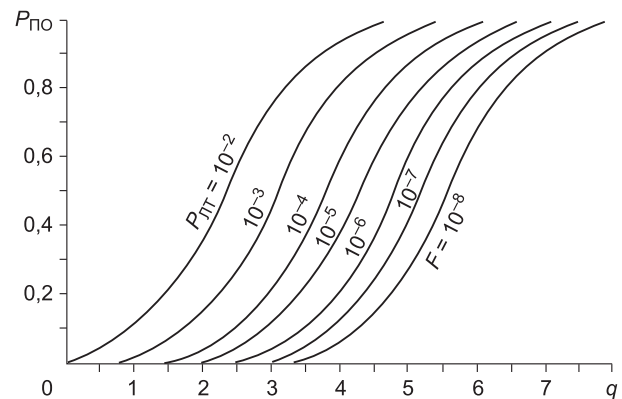


Рис. 2. Зависимость между функциями $P_{по}$ и $P_{лт}$, q для нормального закона распределения реализации сигнала и шума [Радиотехнические системы, 1968].

**Выигрыш последовательного правила принятия решения
в зависимости от числа реализаций выборки (m) при заданных вероятностях ошибок (α и β)**

$\alpha = \beta, \%$		m при отношении U_c^2/σ^2 , равное						m/\bar{m}
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	
5	\bar{m}	21,2	5,3	2,35	1,33	0,85	0,59	2,0
	m	42,5	10,6	4,7	2,66	1,70	1,18	
1	\bar{m}	36,2	9,0	4,0	2,25	1,44	1,00	2,41
	m	86,5	21,6	9,6	5,40	3,46	2,40	
0,5	\bar{m}	42,0	10,5	4,7	2,63	1,68	1,17	2,58
	m	108,0	27,0	12,0	6,75	4,30	3,00	

Преимущество алгоритма (6) заключается в возможности автоматического определения текущего значения отношения правдоподобия $\Lambda(u)$ в процессе наблюдений экспериментальной реализации выборки сигнала и шума при произвольном их законе распределения вероятностей.

Последовательное правило в принятии решения Вальда о наличии сигнала в выборке (3) позволяет определять порог принятия решения в процессе эксперимента, повторяя число сейсмических ударов ИНИ до тех пор, пока отношение $P_{\text{ПО}}/P_{\text{ЛТ}}$ не превысит заданной величины.

Выигрыш последовательного правила принятия решения в зависимости от числа реализаций выборки (m), т. е. количества ударов при заданных вероятностях ошибок α и β , приведен в таблице, взятой из работы А.А. Никитина [1979].

В этой таблице m определяется из (3), а среднее значение \bar{m} при $\alpha = \beta < 0,5$ из соотношения

$$\bar{m} = 2 \frac{\sigma^2}{U_c^2} (1 - 2\alpha) \ln \frac{1 - \alpha}{\alpha}. \quad (8)$$

Таким образом, последовательное правило позволяет минимально двукратно сократить число ударов и при этом гарантировать наличие полезного сигнала в выборке. Оно не исключает использование выборочной процедуры, описанной Д.Б. Поляковым,

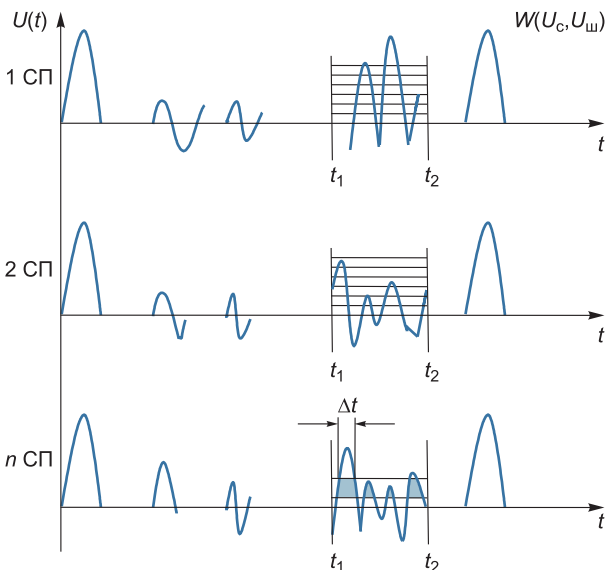


Рис. 3. Выборочные реализации комбинации сигнала и шума на выходе группы сейсмоприемников.

И.О. Греховым [2010] путем введения весовых коэффициентов, обратных дисперсии шума, однако применение согласованной или дополнительной частотной фильтрации полосовыми фильтрами перед статистической обработкой по получению функций правдоподобия может снизить объективную оценку достигнутого отношения сигнал/шум по причине возможного отклонения экспериментально получаемого закона распределения шума от нормального, ибо функция правдоподобия содержит всю необходимую информацию о сигналах и помехах.

Далее перейдем к вопросу о машинной реализации рассмотренного алгоритма последовательного анализа и принятия решения.

На рис. 3 изображены выборочные реализации комбинации сигнала и шума на выходе группы сейсмоприемников, где $(t_1 - t_2)$ – временной интервал выборки по обработке этих реализаций, а на рис. 4 приведена их потенциальная сейсмограмма.

Для получения текущих плотностей вероятности реализации $W(U/U_c)$ и $W(U/U_{\text{ш}})$ предлагается использовать следующую процедуру до первого удара:

$$W(U/U_{\text{ш}}) = \frac{1}{t_1 - t_2} \sum_i^{i+1} \Delta t_i, \quad (9)$$

где Δt_i – текущая ширина времени пребывания амплитуды шума на i -м амплитудном кванте его реализации.

При 24-разрядном квантовании амплитуд сигналов, принятом в современных сейсмостанциях, общее число подобных амплитудных квантов будет равно соответственно $n = 24$ [$i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$].

Аналогичный алгоритм оценки $W(U/U_c)$ используется при обработке реализации после очередного m -го удара.

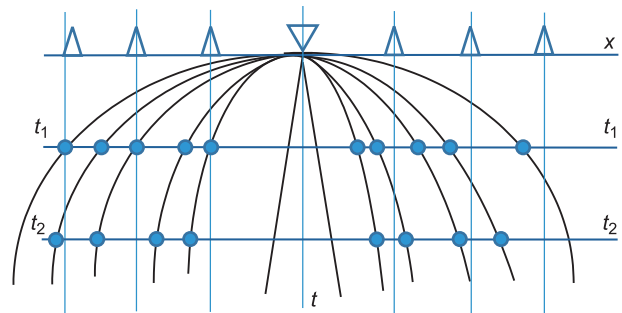


Рис. 4. Иллюстрация к выбору времени наблюдения комбинации сигнала и шума.

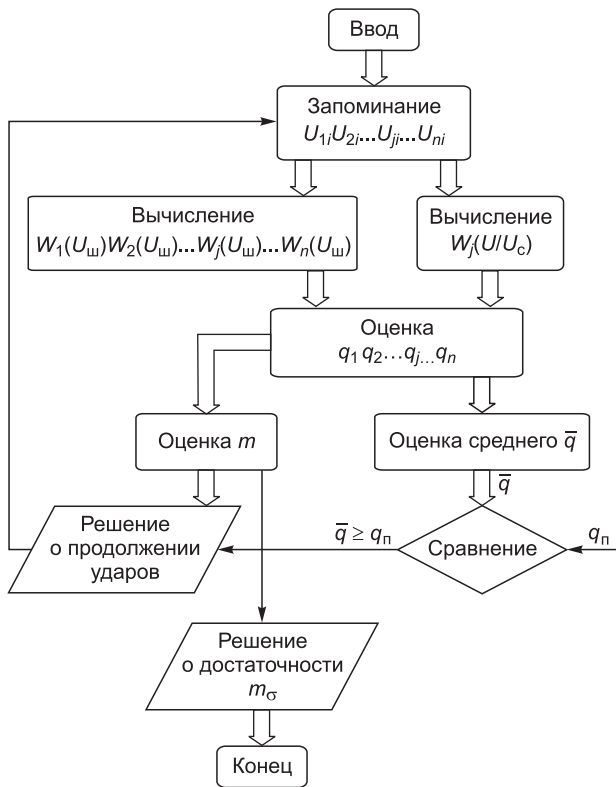


Рис. 5. Алгоритм оперативной оценки достаточного числа ударов ИНИ.

Таким образом, алгоритм обработки реализаций сигнала сводится к следующим процедурам:

1) определение функций правдоподобия – до первого удара $W(U/U_{ш})$ и после каждого очередного удара $W(U/U_c)$ на интервале времени $(t_1 - t_2)$ для каждого сейсмоприемника косы;

2) вычисление вероятностей правильного обнаружения сигнала по алгоритму (5):

$$P_{ПО} = 1 - \beta = \int_{U_n}^{\infty} W(U/U_c) dU,$$

и ложной тревоги по алгоритму (4):

$$P_{ЛТ} = \alpha = \int_{U_n}^{\infty} W(U/U_{ш}) dU;$$

3) вычисление отношения $q_j = \frac{P_{ПО}}{P_{ЛТ}}$, соответствующего в некоторой мере искомому отношению сигнал/шум по каждому j -му сейсмоприемнику из их общего числа в косе – n ;

4) вычисление среднего значения

$$\bar{q} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n q_i; \quad (10)$$

5) сравнение \bar{q} с заданным порогом обнаружения \bar{q}_n ;

6) определение номера удара m_0 по алгоритму (3), достаточного для обеспечения критерия (6).

Программа оперативной оценки m_0 изображена на рис. 5.

ОЦЕНКА ТРЕБУЕМОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Вначале выполним предварительную оценку требуемого быстродействия программы при обработке сигнала с одного сейсмоприемника. Будем считать, что полезный сигнал имеет длительность два полных периода колебаний частоты 20 Гц, что соответствует его длительности $T_c = 100$ мс.

В этом случае, при установке длительности выборки сигнала $t_2 - t_1 = 1$ с перед очередным ударом, на этом интервале может быть сформировано 10 отраженных сигналов.

Период квантования по времени оценим через верхнюю частоту шумов $f_{вш} = 200$ Гц, следовательно, по теореме Котельникова на интервале $t_2 - t_1 = 1$ с уложится 400 квантов сигнала по 24 двоичных разряда каждый. Всего это составит $N_{\Sigma} = 400 \times 24 = 9600$ операций суммирования для определения функций $W(U/U_c)$ и $W(U/U_{ш})$.

Для определения вероятностей $P_{ПО}$ и $P_{ЛТ}$ вычислительным методом необходимо реализовать операцию цифрового интегрирования:

$$P_{ПО} = \sum_{i=1}^n W(U_i/U_c), \quad (11)$$

$$P_{ЛТ} = \sum_{i=1}^n W(U_i/U_{ш}) \text{ при } n = 24. \quad (12)$$

В итоге число операций суммирования увеличится до $N_{\Sigma n} = N_{\Sigma} \cdot n = 9600 \times 24 = 230\,400$.

При использовании представительной выборки из 100 сейсмоприемников потребуются минимальное быстродействие программы $100 N_{\Sigma n} \approx 23 \cdot 10^6$, или 23 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе последовательного правила Вальда с оперативной оценкой отношения вероятностей правильного обнаружения сигнала и ложной тревоги обоснован алгоритм минимально необходимого числа ударов импульсных невзрывных источников сейсморазведки, позволяющий повысить производительность этих источников.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального конкурсного проекта П218.

Литература

Детков В.А., Шайдунов Г.Я. Частотно-импульсный режим возбуждения сейсмических волн группой импульсных невзрывных источников // Приборы и системы разведочной геофизики. 2007. № 4. С. 11–13.

Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.

Поляков Д.Б., Грехов И.О. Адаптивное накопление сигнала с импульсными невзрывными источниками // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Вып. 34, № 4. С. 45–50.

Радиотехнические системы / Под ред. Ю.М. Казаринова. М.: Сов. радио, 1968. 496 с.

Шайдунов Г.Я., Детков В.А. Об оптимизации зондирующих сигналов и приемников по критерию отношения сигнал/помеха плюс шум при работе с импульсными невзрывными источниками сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Вып. 31, № 1. С. 35–39.

Поступила в редакцию 3 ноября 2011 г., в окончательном варианте – 25 декабря 2012 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДЕТКОВ Владимир Алексеевич – управляющий директор ОАО “Енисейгеофизика”, кандидат технических наук.

Тел.: 8-904-895-29-81, e-mail: v-detkov@yandex.ru

КОПЫЛОВ Михаил Александрович – главный геофизик ОАО “Енисейгеофизика”.

Тел./факс (391) 298-56-75, e-mail: common@e-geo.ru

ШАЙДУРОВ Георгий Яковлевич – профессор кафедры радиоэлектронных систем СФУ, доктор технических наук.

Тел.: (391) 291-22-51, (391) 253-89-09, e-mail: gshaidurov@sfu-kras.ru