

Адаптивное накопление сигнала с импульсными невзрывными сейсмисточниками

Поляков Д.Б., Грехов И.О., ОАО «Сибнефтегеофизика», г. Новосибирск

Одно из основных условий геолого-экономической эффективности сейсморазведки – равномерность качества по площади работ. В то же время, большинство случайных помех имеет нестационарный характер во времени и пространстве [2] по типу распределения Рэлея (кстати, данное распределение впервые было введено в связи с задачей сложения гармонических колебаний со случайными фазами, адекватно описывающей микросейсм). Параметр распределения растет с увеличением пространственного и/или временного интервала определения. Условия возбуждения и приема, т.е. уровень сигнала, также неравномерны в пространстве.

Накопление сигнала обеспечивает повышение отношения сигнал/помеха S/N . Можно выделить 2 аспекта адаптивного накопления:

- выбор алгоритма суммирования, учитывающий нестационарность шума в «малом» масштабе времени при фиксированном пространственном положении и постоянном уровне сигнала, т.е. накопление на 1 ПВ;
- выбор числа накоплений на каждом ПВ, учитывающий изменчивость как сигнала, так и помехи в пространстве и в «большом» масштабе времени.

Накопление на 1 ПВ

Сейсмограмма – матрица в пространстве (t, x) , которому соответствует пространство спектров (F, K) . Все процедуры по выделению сигнала сводятся к фильтрации в этом пространстве. Повторение сигнала добавляет еще одну размерность N . Равновесное накопление принципиально ничем не отличается от «жесткой» фильтрации в K -размерности, при которой подавляются все

гармоники, кроме нулевой (суммирование по ОГТ). Если пространство N рассматривать по аналогии со спектральным, то повторяющемуся сигналу соответствует постоянный спектр, а случайной помехе – неравномерный. Тогда наилучшее выделение сигнала достигается согласованной фильтрацией [1]. В пространстве N ее аналогом является суммирование с весами, обратными энергии шума – алгоритм получил название diversity stack (далее DS).

Покажем это наглядно. На рис. 1 слева приведены модельные уровни сигнала и шума для 16 накоплений. Повторяющийся сигнал имеет постоянный уровень, принятый за 1. Шум имеет случайный характер и распределен по Рэлею. После нормировки амплитуды к энергии шума для каждого накопления уровни принимают вид, показанный на рис. 2, справа. Хорошо видно, что для каждого накопления отношение сигнал/помеха S/N сохранилось, средний уровень сигнала также остался равным 1, но средний уровень шума упал в 2 раза.

Накопление по алгоритму DS увеличивает вклад «тихих» записей, т.е. эквивалентно смещению распределения в область меньших значений шумов. На рис. 2 слева показан этот эффект (здесь 0.5 – уровень сигнала), справа приведен фрагмент одиночной записи микросейсм (а) и записи после 4-кратного весового суммирования с увеличенным вдвое усилением (б). Визуально амплитуда участков стационарных шумов примерно та же (т.е. 4-кратное суммирование обеспечило 2-кратное снижение шума), а все «всплески» шума подавлены.

На практике доля энергии шума в записи априори неизвестна, поэтому взвешивание про-

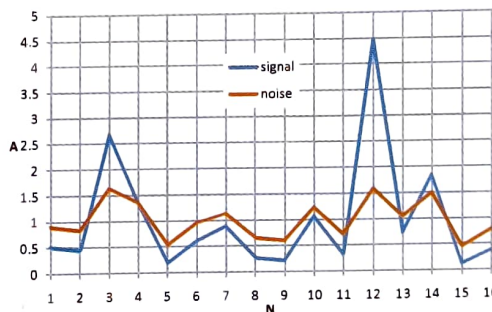
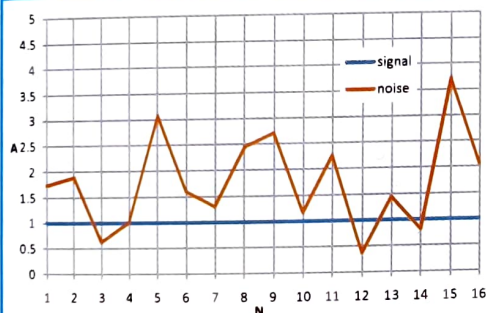


Рис. 1. Графическое представление амплитуды сигнала и шума в исходном виде (слева, сигнал принят за 1) и после весовой нормировки (справа).

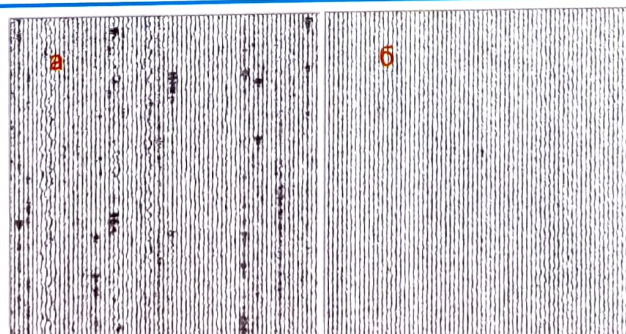
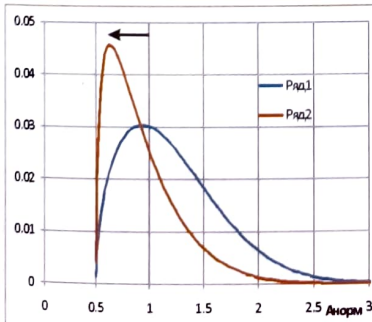


Рис. 2. Слева – смещение распределения (снижение среднего шума) при весовом суммировании. Справа – одиночная запись микросейсм (а) и после 4-кратного весового суммирования с удвоенной амплитудой воспроизведения (б).

«ВСТРЕЧИ НА ВОЛГЕ»:
ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ

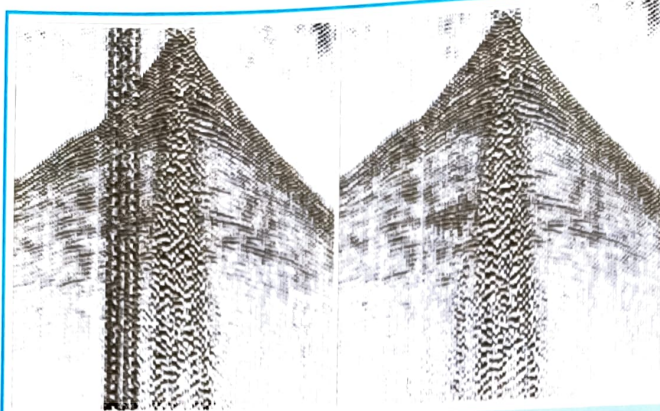


Рис.3. Сейсмограмма, записанная при движении а/м «Урал» вдоль ЛП с 4 накоплениями. Слева – равновесное суммирование, справа – DS.

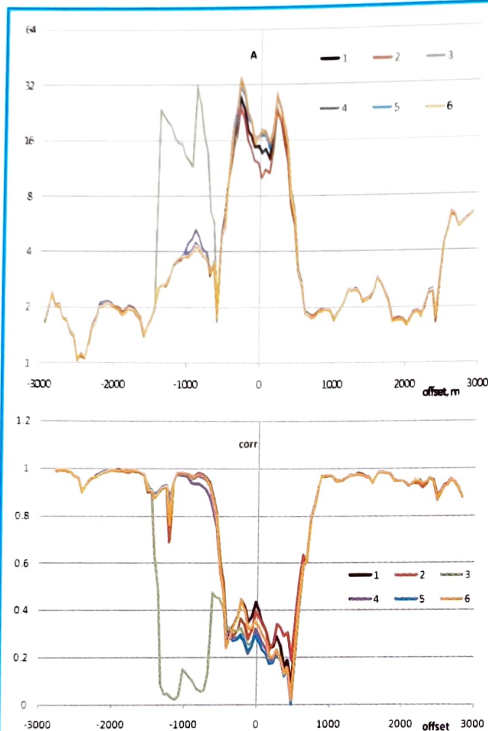


Рис.4. Сверху – графики амплитуд целевого интервала записи, показанной на рис.3, снизу – графики ФБК трасс для них же. По оси X – удаление ПВ-ПП, шифр: 1 – 4 накопления DS без а/м на линии; 2 – 4 накопления VS без а/м на линии; 3 – 4 накопления VS, в интервале -1400-600 м движется а/м «Урал»; 4, 5, 6 – 2, 4 и 8 накоплений DS соответственно при движении «Урала» на том же участке линии.

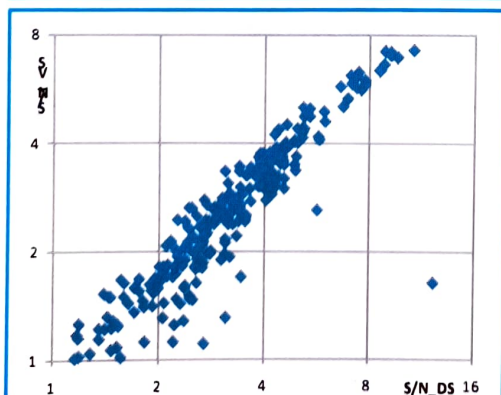


Рис. 5. Кроссплот отношений S/N на полевых записях, по оси X – DS, по оси Y – VS

изводится по полной энергии записи. Однако, если на одиночной записи до суммирования $S/N < 1$, то и такое взвешивание вполне эффективно. Особенно велик эффект при подавлении так называемых «ураганных» помех [11], например, связанных с движением транспорта. На рис.3 показано сопоставление сейсмограмм, полученных равновесным и весовым суммированием с одного ПВ во время движения вдоль приемной линии а/м «Урал». Последняя неотличима от записи, полученной в отсутствие машины.

Среди геофизиков бытует мнение, что DS – это своего рода фильтр, искажающий запись, от которого следует отказаться. Но,

как уже говорилось, любое накопление – это фильтр! В то же время сумма весовых коэффициентов постоянна для всех отсчетов t (в большинстве реализаций алгоритма принята равной 1), поэтому повторяющаяся компонента записи – т.е. полезный сигнал – не подвергается никаким искажениям в силу самой сути алгоритма. Еще одно недоразумение состоит в том, что DS называют «редактором шума», что является буквальной переводом названия Noise edit иного алгоритма шумоподавления – порогового типа.

И даже при использовании Noise edit (который мы не рекомендуем) – все равно, любая фактическая запись, в т.ч. с нелинейными искажениями, апостериори представима как линейная сумма полезного сигнала и некоторой аддитивной помехи, т.е. наличие искажений выражается в конкретных амплитудных и фазовых отличиях записи от «неискаженного» сигнала. Но ведь такие отличия возникают за счет любой помехи! Чем они меньше вообще, тем лучше решена задача получения качественной записи.

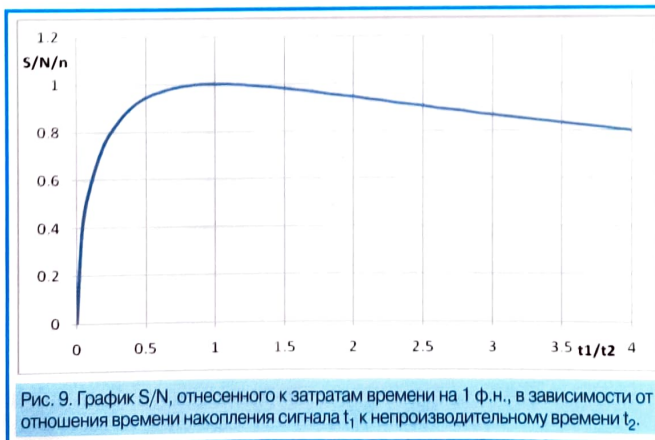
Для сейсмограмм, две из которых показаны на рис.3, были рассчитаны амплитуды и ФБК трасс. Результаты показаны на рис.4. Выделяется только запись с равновесным суммированием (VS) и, очень незначительно, запись с DS и 2 накоплениями. Записи с DS при 4 и более накоплениях в присутствии помехи от автомобиля идентичны записям в ее отсутствии при любом алгоритме суммирования. Данный опыт наглядно подтверждает полезность применения весового суммирования.

На рис.5 показано сопоставление отношения S/N для DS и VS. Суммирование выполнялось камерально по записям всех накоплений (производственные работы в отсутствие техногенных шумов). Видно, что результат колеблется от равноценного до улучшения в 2-3 раза при использовании DS, особенно при низком S/N . На рис.6 показан рост S/N в зависимости от числа накоплений от 1 до 24. Усиление шума в период примерно с 6 по 20-е накопление привело к падению эффективности S/N на 3-4 дБ по сравнению с DS.

При всех достоинствах весового суммирования, его результат зависит от параметров настройки. Поскольку возможны ошибки при настройке DS в поле, «на ленту» следует записывать не только сумму, но и все одиночные накопления для обеспечения возможности последующего камерального суммирования – современные емкие носители типа NAS дают такую возможность.

Рассмотрим подробнее зависимость уровня шума от числа накоплений. Для глубокого подав-

На рис.10 для площади 3D, отработанной с источниками «Енисей», показаны (сверху вниз): амплитуда сигнала, микросейсм и их отношение S/N . Очевидна резкая дифференциация и сигнала, и шума, тогда как S/N гораздо однороднее по площади. При этом, на карте шумов почти не проявляется блоковая структура отработки, обычно хорошо заметная и связанная с изменчивостью микросейсм – сегодня тихо, а завтра ветрено, и т.д.



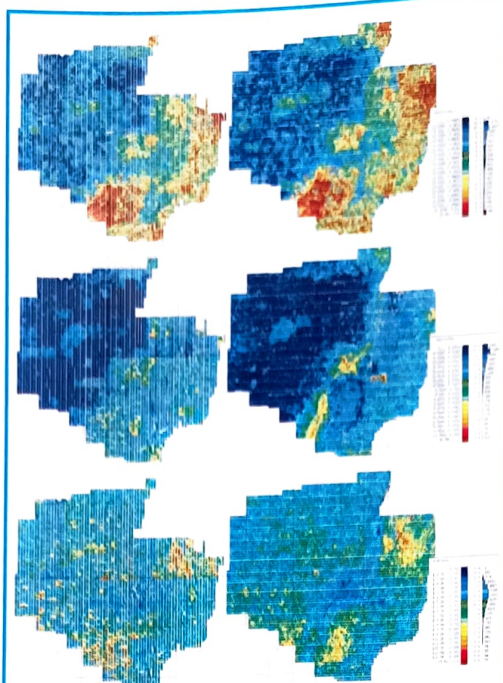


Рис.10. Карты атрибутов для площади 3D, отработанной с источниками «Енисей». Сверху вниз: амплитуда сигнала, амплитуда шума, S/N ; слева – выборка ОПВ, справа – ОПП.

Эта картина – результат адаптивного выбора числа накоплений в зависимости от уровня сигнала и помехи [2]. Поскольку суммирование DS производится с нормировкой к числу накоплений n , амплитуда сигнала здесь отражена объектив-

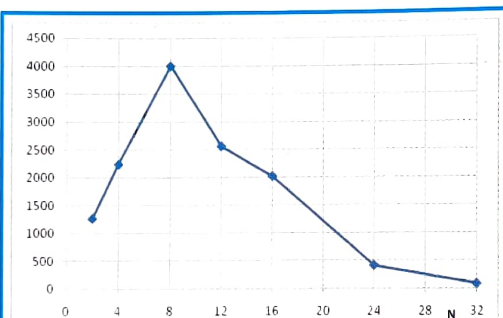


Рис.11. График распределения числа ф.н. с разным количеством накоплений

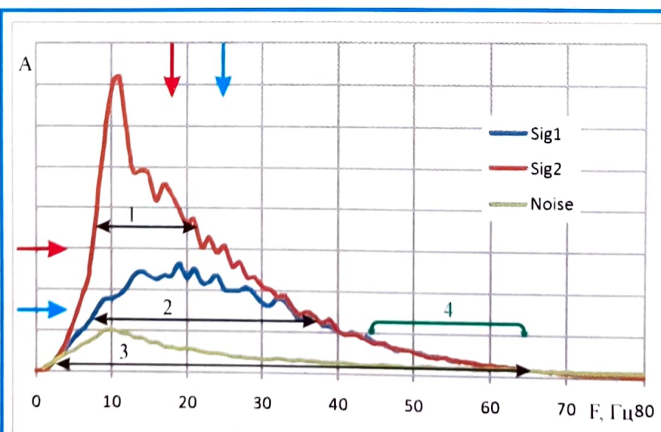


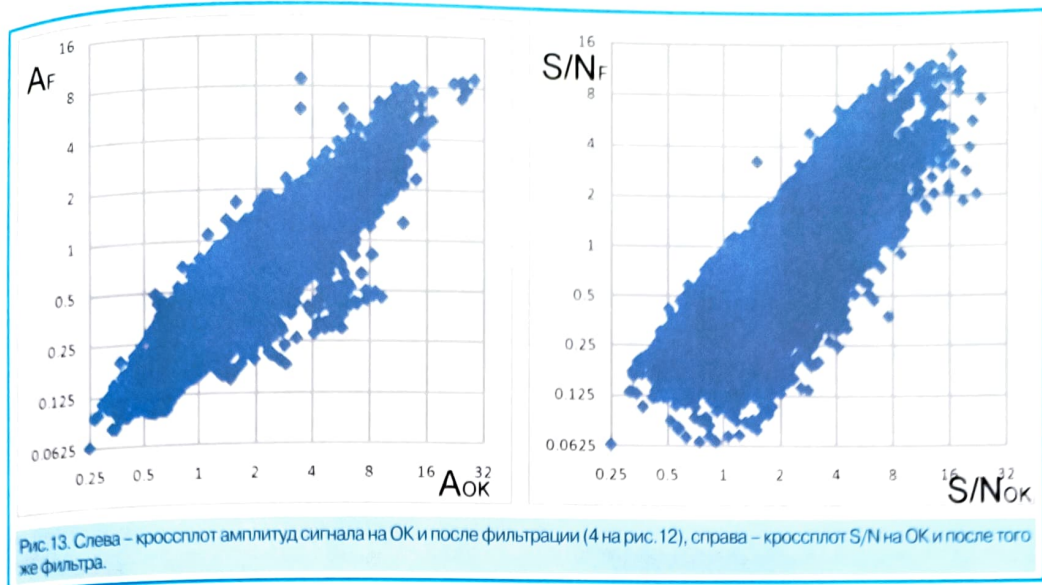
Рис.12. Спектры целевых отражений для 2 сейсмограмм и спектр микросейсм. Цветными стрелками показаны средняя амплитуда и видимая частота. Номерные стрелки: 1, 2 – ширина спектров сигнала по уровню 0.5, 3 – полоса частот с $S/N > 1$, 4 – полоса фильтрации для расчета амплитуды высокочастотной компоненты.

но, а уровень шумов – обратно пропорционально $\sqrt{n}$. Число n выбиралось так, чтобы обеспечить заданное отношение S/N при всей изменчивости условий. Для этого специалист-геофизик на сейсмостанции оценивал полученные записи практически в реальном времени и при необходимости корректировал накопление. Распределение ф.н. по числу накоплений показано на рис.11. Видно, что оно также имеет вид распределения Рэлея; диапазон n составил от 2 до 32 при среднем 10-11. Таким образом, для площади в целом соблюден критерий оптимальности « $t_1 \approx t_2$ » и получен однородный по качеству материал, а в итоге – качественный разрез, несмотря на объективно невысокое $S/N=3-6$ на полевых записях.

Малые участки вариации S/N на рис.10, внизу, связаны с локальными поверхностными неоднородностями, предсказать которые в процессе работы было сложно. Преобладают участки с повышенным S/N , т.к. на таких участках число накоплений не снижалось во избежание брака. Более того, при ухудшении материала n увеличивалось либо сразу же (переотработка ПВ), либо на следующем пикете. Два более крупных поля повышенных S/N (на юге и на востоке) связаны с необходимостью накапливанием довести S/N до приемлемого уровня на участках ЛП, расположенных в зоне пром.помех от дорог и коммуникаций, тогда как в среднем по расстановке оно оказалось завышенным. Все это, в т.ч. расположение коммуникаций, хорошо видно на оценках по ОПП (рис.10 снизу).

При таком подходе, однако, встает вопрос о системе оценок [5, 6, 11, 12]. На рис.12 приведены спектры целевого интервала записи для 2 сейсмограмм и усредненный спектр микросейсм, все в истинном соотношении амплитуд. Видно, что спектры сигнала различаются только в области $S/N \gg 1$, что для конечных задач обработки несущественно [14]. В то же время, для одной сейсмограммы «видимые» частоты составляют 18 Гц, для другой – 25 Гц (стрелки сверху). Их средние амплитуды различаются вдвое (стрелки слева), то же самое касается частот максимума спектра и, так называемой, ширины спектра (стрелки 1, 2). Оценки могут различаться еще больше, если в целевом интервале записи присутствуют среднескоростные помехи. Поэтому дополнительно использовалась оценка амплитуды сигнала и шума в правой трети того диапазона частот, где $S(f) > N(f)$ (3 на рис.12), и заведомо правее максимума спектра. Для этого перед расчетом амплитуды выполнялась узкополосная фильтрация (4 на рис.12). Конкретная полоса частот для анализа, как и параметры накопления, выбирались на этапе опытных работ. Такая оценка практически свободна от влияния среднескоростных волн и низкочастотных резонансов системы источник-грунт, изменяющих на оценки на открытом канале. Кроме того, она позволяет точнее определить диапазон частот, в котором $S(f) > N(f)$, что, пожалуй, наиболее существенно для конечного результата.

Заметим еще, что в отличие от взрывного источника, дающего возможность влиять на АЧХ выбором глубины и массы заряда, АЧХ поверхностного источника практи-



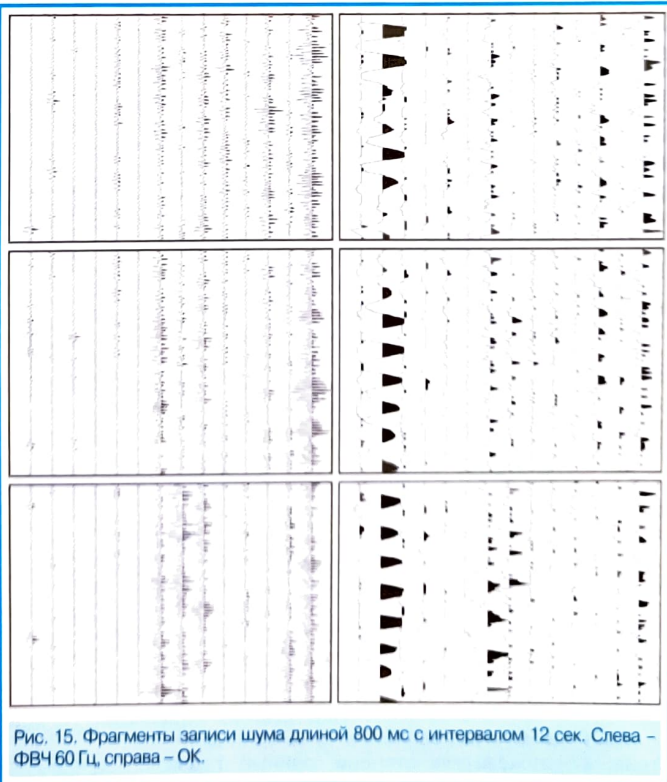
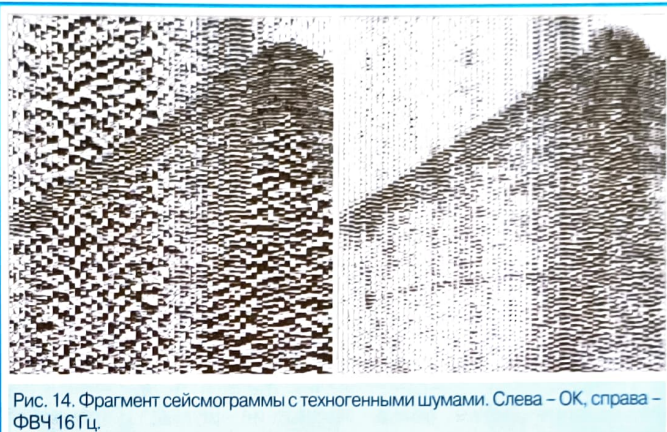
чески неуправляема и сильно зависит от свойств верхнего слоя грунта на данном ПВ [8–11]. «Давать оценку» полученной с ним записи на основании частотных характеристик просто бессмысленно. То же касается уровня регулярных помех, связанных с источником. Единственное, что зависит от исполнителя работ – накопление сигнала.

Таким образом, использовались 2 оценки S/N – на открытом канале и после узкополосной фильтрации. Критерием выбора накоплений было требование превысить заданный порог по обеим оценкам. При этом по одной из них превышение могло оказаться значительным. На рис. 13 слева приведен график соответствия этих 2 оценок. Очевидна как сильная корреляция, так и значительный, в несколько раз, разброс вокруг основного тренда. Для отношения S/N , приведенного к 1 накоплению делением на $\sqrt{n}$ (рис. 13 справа), этот разброс еще больше вследствие непостоянства спектра помех. Это свидетельствует о недопустимости полагаться только на одну из этих оценок. Заметим, крайние оценки S/N различаются на два порядка. Что после этого можно сказать о работе с постоянными параметрами накопления или рекомендациях типа «12 накоплений в лесу, 14 – на болоте»!

Другие аспекты спектрального состава сигнала и шума

Из предыдущего раздела можно также сделать вывод о том, что применение алгоритма DS на открытом канале не полностью раскрывает его возможности, хотя в целом он работает, благодаря корреляции между уровнем шума на открытом канале и в отдельных частях спектра.

На рис. 14 приведен фрагмент сейсмограммы на ОК и с ФВЧ 16 Гц. Видно, что фильтрация подавила в левой части шум от



дороги, но не повлияла на более высокочастотный шум ближе к ПВ. На ОК шум от дороги интен-

«ВСТРЕЧИ НА ВОЛГЕ»: ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

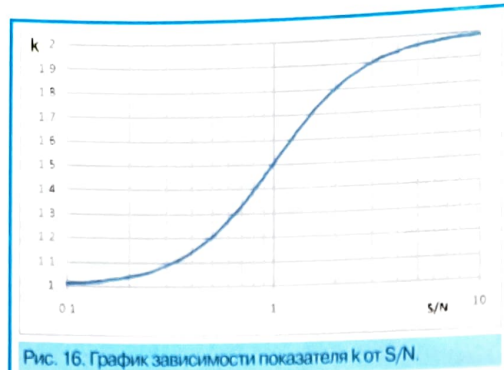


Рис. 16. График зависимости показателя k от S/N .

сивнее целевых отражений, но после фильтрации энергия последних доминирует на записи. Из вида спектров сигнала и микросейсм на рис 12 также ясно, что всплески высокочастотного шума, энергия которых сосредоточена в правой части частотного диапазона, «пропущены» алгоритмом DS, т.к. основная энергия записи сосредоточена на более низких частотах. Т.е. в первом случае снижение «веса», обусловленное низкочастотной помехой, неоправданно для большей части частотного диапазона, а во втором – наоборот, оно не произойдет даже при значительном увеличении шума в этой части спектра.

На рис.15 показаны 3 фрагмента записи шума длительностью 800 мсек, записанные с интервалом 12 сек – слева с ФВЧ 60 Гц, справа на ОК. В основном, более шумные каналы одни и те же на ОК и с фильтрацией, но есть и несоответствия. Так вторая слева трасса выделяется шумом только на ОК, а девятая наоборот. 2-я и 7-я трассы более нестабильны на ОК. У остальных шумных трасс более изменчивы высокие частоты. Кроме того, для разных трасс налицо разное соотношение шума и разное положение «шумных» и «тихих» интервалов на ОК и после фильтрации.

Приведенные примеры показывают, что наилучшей работы алгоритма DS можно добиться если «взвешивание» производить не просто во временных, а в частотно-временных окнах. Окна должны отвечать условию $dT/dF=5\div10$ [13]. Более высоким частотам должны отвечать более короткие и широкополосные окна. Эксперименты по суммированию одиночных полевых записей показывают, что такое частотно-избирательное весовое суммирование позволяет поднять $S(f)/N(f)$ на 3-8 дБ, что примерно эквивалентно удвоению (!) мощности источника.

Перспективы

Адаптивный выбор числа накоплений по оценкам уже (только что) полученных записей все же недостаточно гибко, учитывает только медленные вариации шума и крупную зональность условий возбуждения. Он требует некоторого «запаса прочности» по числу накоплений и непрерывной работы еще одного специалиста, кроме оператора сейсмостанции.

В то же время, повторение сигнала при накапливании дает уникальную возможность истинной оценки отношения сигнала и случайного шума в одном и том же окне. Ведь для первого суммируются амплитуды, а для второго – энергии; это выражается в отношении

$$A_{n+1}^2 / A_n^2 = ((n+1)/n)^k \quad (1),$$

где A – амплитуда записи, n – номер воздействия, k – показатель степени, равный 1 для некоррелированного шума и 2 – для строго повторяющегося сигнала.

При весовом суммировании вместо нату-

ральных n выступают суммы весов соответствующих n воздействий. Разумеется, практический смысл в этих оценках будет лишь в том случае, если они выполняются программным обеспечением сейсмостанции в реальном времени.

Для записи, включающей сигнал и шум, зависимость k от S/N показана на рис 16. Видно, что наибольшую чувствительность, порядка 0.05 дБ, показатель k имеет в диапазоне S/N примерно от 0.5 до 2. Для оценки на ОК при $S/N \gg 1$ он мало пригоден. Однако, оценку k , как и взвешивание, можно и нужно сделать частотно-избирательной. Учитывая вид спектров сигнала и микросейсм (см рис.12), достаточно потребовать $k > 1.5$ для нескольких частотных диапазонов подряд, образующих возможно более широкую полосу частот (типа 3 на рис.12) с $S(f)/N(f) > 1$.

Определение границ этой полосы, реально достижимых с учетом принципа « $1/2T$ », и есть работа геофизика-методиста. Оценка же текущих сейсмограмм по указанному критерию должна осуществляться станцией автоматически в процессе накоплений, прерываемых по достижении необходимого значения оценки.

Остается высказать пожелание производителям сейсмостанций – разработать программное обеспечение, которое позволило бы осуществить все это на практике. Авторы убеждены, что по эффективности предложенная технология равноценна внедрению источников вдвое большей мощности. А учитывая, что последние уже достигли разумных пределов (некоторые, типа Nomad-90, даже перешагнули их), это вообще один из уже очень немногих резервов развития невзрывной сейсморазведки.

Литература.

1. Винер Н. Кибернетика. М., 1983. 343 с.
2. Грехов И.О. Методическая оптимизация полевых работ МОГТ. // Приборы и системы разведочной геофизики. 2009. №4. с 28-38.
3. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. М., Недра, 1980. 551 с.
4. Дроздов А.П., Грехов И.О. Опыт применения сейсмоисточников «Енисей» в ОАО «Сибнефтегеофизика». Приборы и системы разведочной геофизики, 2005, №2, с.23-25.
5. Закариев Ю.Ш., Марутян В.Г., Плешкевич А.Л. и др. Методика количественного анализа опытных работ на примере вибросейсмических работ в Западном Казахстане. // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006, №2(16), с.44-50.
6. Закариев Ю.Ш., Марутян В.Г., Мусаралиев М.З. и др. оценка качества полевых сейсмических данных и основные факторы, влияющие на него // Геофизика, 2007, №4, с.82-92.
7. Потапов О.А. Технология полевых сейсморазведочных работ. М., Недра, 1987. 309 с.
8. Притчетт У. Получение надежных данных сейсморазведки. М., Мир, 1999. 448 с.
9. Смирнов В.П. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда «Енисей». // Приборы и системы разведочной геофизики. 2003. №1, с.21-25.
10. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. М., Мир, 1987.
11. Шнейерсон М.Б., ред. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки. М., Недра, 1998.
12. Kerekes A.K. Seismic field parameters – our neglected science. // The leading edge, 1997 no.1.
13. Walden A.T., White R.E. 1990. Estimating the statistical bandwidth of a time series. Biometrika, 77, 699-707.
14. Yilmaz Ozdogan. Seismic data processing SEG. 1994.