

Выбор шага дискретизации, достаточного для решения задачи интерпретации данных сейсморазведки

■ Власов С.В., Шарин С.В., ООО «БашНИПНефть», г. Уфа

■ Щелкунов А.Е., ООО «ГНПЦ ПурГео», г. Тюмень

В статье рассмотрена проблема выбора шага дискретизации, необходимого и достаточного для регистрации и обработки с учетом конечной задачи проведения сейсморазведки - геологической интерпретации. Авторы считают, что при расчете шага дискретизации на этапе планирования работ и подбора графа обработки, следует отталкиваться от требуемой вертикальной разрешенности с учетом априорной информации о геологическом строении участка.

Вопрос выбора необходимого и достаточного шага дискретизации регулярно обсуждается в геофизической среде. Связанный с этим вопросом круг проблем хорошо известен и освещен в различных публикациях, однако однозначное мнение так и не сформировано. Мы рассмотрим проблему выбора необходимого и достаточного шага дискретизации для регистрации и обработки под углом конечной задачи проведения сейсморазведки, а именно геологической интерпретации. В таком случае все стандартно рассматриваемые ограничения о возможности восстановления спектра до частоты Найквиста и требования о недопустимости искажений, связанных с шагом квантования более 3 дБ и т.д., требуют оценки не с позиций исходного сигнала, а с точки зрения корректного восстановления отклика среды на внешнее воздействие. При такой постановке вопроса требования к шагу дискретизации обретают множество дополнительных ограничений и неопределенностей, связанных не только с математической и физической частью теоремы Котельникова, но и с техническими вопросами на всех этапах от регистрации до обработки.

Рассмотрение проблемы в таком контексте удобно в виде сверточной модели. Тогда отклик среды на внешнее воздействие [2]:

$$P(t) = R(t) \{S(t) \times s(t)\} + n(t), \text{ где:}$$

$P(t)$ - сейсмическая трасса; $S(t)$ - сейсмический сигнал; $R(t) = (R_0 + R_d + R_f)$ - поток коэффициентов отражения; $s(t)$ - обобщенная неаддитивная помеха; $n(t)$ - обобщенная аддитивная помеха; $*$ - свертка сформировавшегося импульса с отражающей способностью среды; x - искажение исходного сигнала за счет неупругих деформаций, технических недочетов и т.д.

Таким образом, задача формулируется как корректное описание сверточной функции $R(t) \{S(t) \times s(t)\}$, характеризующей отклик на внешнее воздействие. Если абстрагироваться от вопросов финитности спектров и сейсмических записей, которые достаточно детально рассмотрены во множестве источников, то остаются два основных вопроса: какой тип аппроксимации сигнала заложен в алгоритмах используемого софта и какова мощность целевых пластов, отклик от которых мы ожидаем увидеть в волновом поле.

На наш взгляд, при расчете шага дискретизации на этапе планирования работ и подбора графа обработки, следует отталкиваться от требуемой вертикальной разрешенности с учетом априорной информации о геологическом строении участка. В соответствии с такой точкой зрения оптимальным для выбора шага дискретизации будет обратный расчет, причем, отправной точкой становится глубинный масштаб результата.

Предварительный расчет шага дискретизации.

На сегодняшний день при изучении участков требуется построение сейсмологических моделей для пластов мощностью 4 метра и менее. Как правило, вертикальная разрешенность сейсморазведки недостаточна для регистрации самостоятельных отражений от кровли – подошвы такого пласта, однако идентификация и петрофизическое моделирование возможно по интерференционной картине, формирующейся на потоках коэффициентов отражений от тонких пластов. В первом приближении, при наличии акустического контраста для интерференционной картины вертикальная разрешенность (H , м) может быть оценена как одна восьмая длины волны [4]:

$$H \sim 1/8 \cdot \lambda = v/(8 \cdot f), \text{ где}$$

λ – длина волны (м); v – скорость распространения сейсмических волн (м/с); f – частота сигнала (Гц).

Тогда, обратным расчетом можно оценить необходимый диапазон частот (рис.1, табл. 1), для решения поставленных задач.

Учитывая написанное выше, необходимо-достаточная дискретность может быть рассчитана согласно теореме Котельникова:

$$dt^k < 1/(2f), \text{ где } f \text{ – частота (Гц).}$$

Однако, интерполяция в обрабатываемых пакетах выполняется, как правило, с использованием полинома 2, 4 порядка, или даже линейно, тогда возможен приближенный расчет шага дискретизации [1]:

$$dt^b \sim dt^k (\sigma^b)^{1/(k+1)}, \text{ где}$$

dt^k – дискретность «по Котельникову»; σ^b – требуемая точность восстановления сигнала; k – степень полинома, используемого для интерполяции.

Точность аппроксимации сигнала

▼ Табл. 1. Расчет необходимых доминантных частот (Гц), исходя из требований вертикальной разрешенности.

H, м	Vp, м/с					
	3000	3500	4000	4500	5000	5500
2	188	219	250	281	313	344
4	94	109	125	141	156	172
6	63	73	83	94	104	115
8	47	55	63	70	78	86
10	38	44	50	56	63	69
12	31	36	42	47	52	57
14	27	31	36	40	45	49
16	23	27	31	35	39	43
18	21	24	28	31	35	38
20	19	22	25	28	31	34

▼ Рис. 1. Зависимость вертикальной разрешенности от скорости распространения волны и частоты сигнала.



обычно варьирует в интервале от 0.01 (для высококачественных данных) до 0.05 (для зашумленных данных).

На наш взгляд, выбор в качестве отправной точки параметров объекта изучения для расчета шага дискретизации

▼ Табл. 2. Расчет необходимо - достаточного шага дискретизации (мс) по Котельникову, исходя из требований вертикальной разрешенности.

H, м	Vp, м/с					
	3000	3500	4000	4500	5000	5500
2	2.67	2.29	2.00	1.78	1.60	1.45
4	5.33	4.57	4.00	3.56	3.20	2.91
6	8.00	6.86	6.00	5.33	4.80	4.36
8	10.67	9.14	8.00	7.11	6.40	5.82
10	13.33	11.43	10.00	8.89	8.00	7.27
12	16.00	13.71	12.00	10.67	9.60	8.73
14	18.67	16.00	14.00	12.44	11.20	10.18
16	21.33	18.29	16.00	14.22	12.80	11.64
18	24.00	20.57	18.00	16.00	14.40	13.09
20	26.67	22.86	20.00	17.78	16.00	14.55

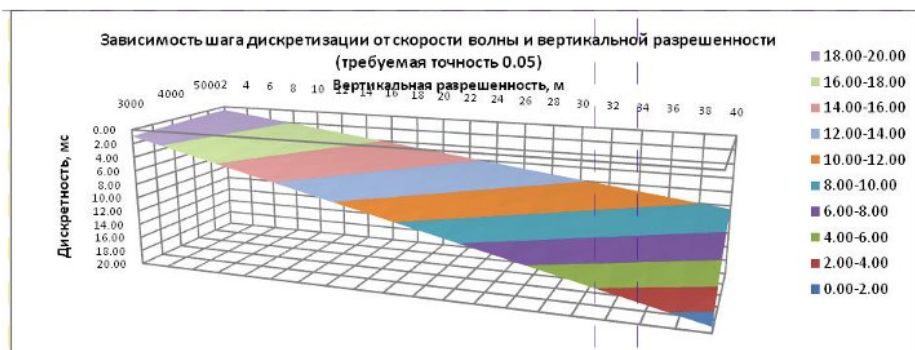


Рис. 2. Зависимость шага дискретизации от вертикальной разрешенности и скорости распространения сейсмических волн.

позволяет снизить вероятность ошибки за счет интегральных оценок отношения сигнал/шум. Важно не забывать, что на практике мы никогда заранее не можем сказать, в каком частотном диапазоне и как получится восстановить спектр отклика, а главное какой вклад в волновое поле дадут тонкие пласты.

Следует отметить, что результаты расчета рекомендуется округлять до меньшего стандартно принятого шага дискретизации, тогда для работы с тонкими пластами мощностью 4-8 метров, учитывая вышеприведенные расчеты, требуется дискретность не более 1 мс. Фактически на реальных данных самостоятельными отражениями от кровли/подошвы будут обладать пласты мощностью 12-16 метров и более. Кроме того, полученные расчеты показывают, что даже для видимых частот 60-80 Гц предпочтительным будет являться шаг дискретизации 1 мс.

Передискретизация при обработке.

Нередко практикуется передискретизация в процессе обработки в угоду машинному ресурсу, особенно при деконволюции и миграции. При этом многие обработчики пользуются выкладками по «Котельникову», объясняя, что потерь нет и быть не может. Ведь для восстановления исходного сигнала достаточно 2 мс, а то и 4 мс. На наш взгляд, здесь также лучше отталкиваться от конечной цели проведения сейсморазведки. Простой математический расчет для проверки не

подходит, наиболее корректно проверку влияния можно сделать на модельных данных.

Итак, для проверки создана относительно простая тонкослоистая модель на базе одной скважины и структурного каркаса по 2D линии (рис.3).

Далее выполнено моделирование в Tesseral Pro в формате 2D elastic и получены сейсмограммы с дискретностью 1 мс. Для моделирования использовался импульс Риккера с несущей частотой 60 Гц. После подготовки данных выполнена поверхностно-согласованная деконволюция с исходной дискретностью и при дискретности 2 мс, после чего данные

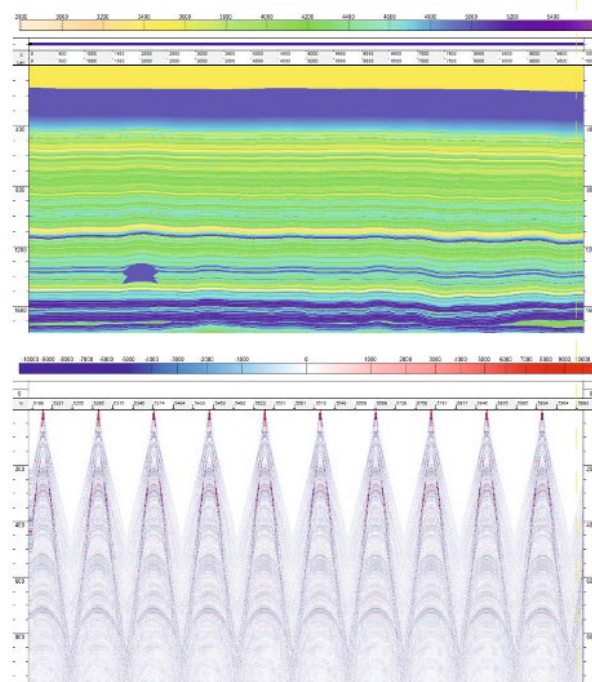


Рис. 3. Геолого-геофизическая модель и результаты моделирования для отдельной части профиля.

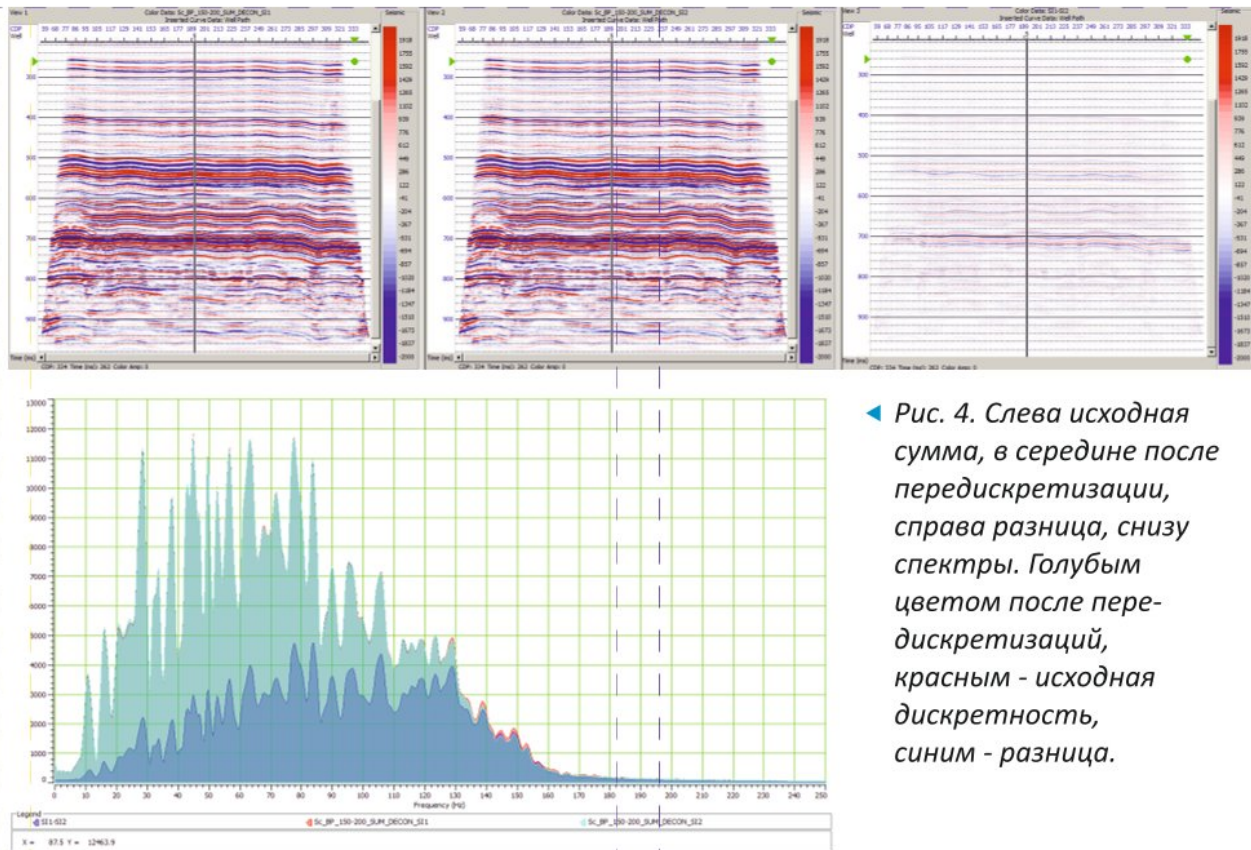


Рис. 4. Слева исходная сумма, в середине после передискретизации, справа разница, снизу спектры. Голубым цветом после передискретизаций, красным - исходная дискретность, синим - разница.

просуммированы и приведены к дискретности 1мс. Обработка выполнена в Geovation. Результаты представлены на рис. 4.

Очевидно, что передискретизация перед деконволюцией приводит к некоторым искажениям в данных. Причем эта разница, как и ожидалось, максимальна для «высоких» частот. Кроме того, явно видно, что основная ошибка накапливается на участках от 0-перехода до максимума/минимума, что, очевидно, особенно критично в случае интерпретации интерференционного волнового поля. Конечно, для структурной интерпретации разница не критична. Так горизонты, прокоррелированные по идентичным фазам, отличаются не более, чем на 0.5 мс. Однако не стоит забывать - это модельные данные, свободные от помех. Что касается динамической интерпретации, то для проверки по обеим суммам выполнена акустическая инверсия с идентичными параметрами, по стандартно принятому графу.

Привязка сейсмических данных к скважинным, дефазировка и акустическая инверсия.

Результаты привязки в рамках сверточной модели ожидаемо получились идентичными для обеих сумм, Ккор~0.85. А вот определение значения фазовой коррекции разошлось на 2-5 градусов, в зависимости от окна оценки. Значения, конечно, лежат в допуске стандартно используемых +/- 15-20°, однако, опять же, не стоит забывать, что мы исходим из того, что шумоподавление производилось при исходной дискретности в 1мс и передискретизация выполнена перед деконволюцией.

В противном случае значения «разбежки» могут быть и больше принятого допуска. Итак, по результатам привязки нам потребовался фазовый поворот на угол +77 градусов.

Не останавливаясь на детальном разборе параметров инверсионных преобразований, отметим только, что они иден-

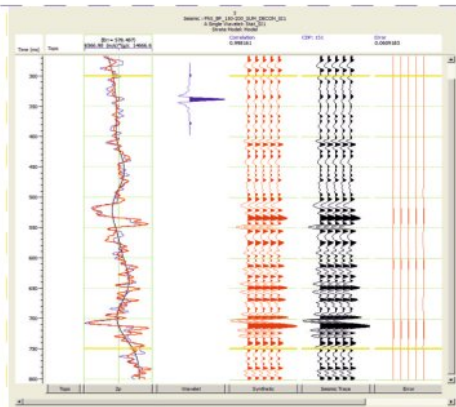


Рис. 6. Результаты контроля инверсии в точке скважины для сейсмике после передискретизации ($K_{кор} \sim 0.62$).

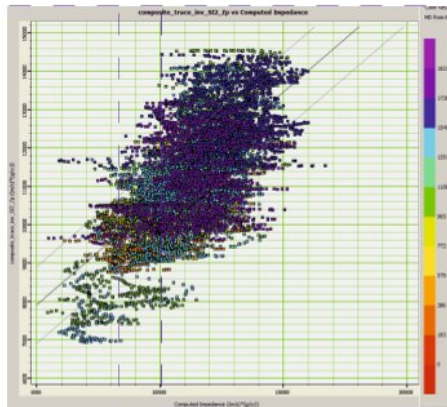
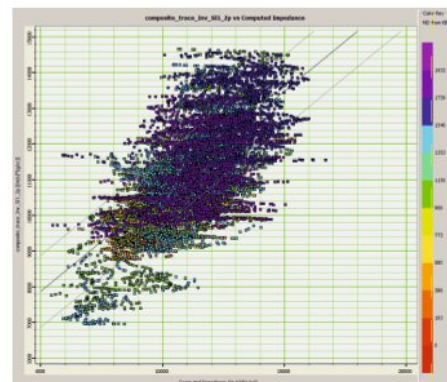
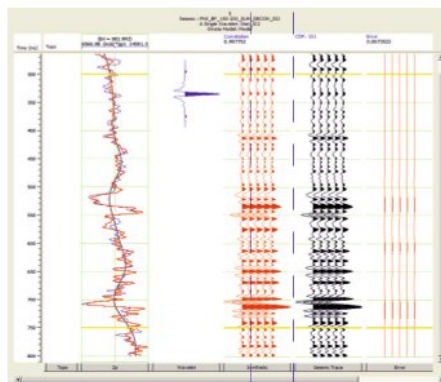


Рис. 5. Результаты контроля инверсии в точке скважины для сейсмике после передискретизации ($K_{кор} \sim 0.62$).



тичны для обеих сумм. Проведем сопоставление результатов (Рис.5-6).

Визуально результаты смотрятся идентично, но при ближайшем рассмотрении все количественные характеристики в случае сейсмике после передискретизации хуже, чем для исходной сейсмике на 2-7% в относительном эквиваленте. Те же 2-7% остаются и при приведении данных ГИС к дискретности сейсморазведки.

Можно ли однозначно утверждать, что передискретизация при обработке на укрупненный шаг и потом возврат к исходному шагу дискретизации снизит качество динамической интерпретации? В рамках этого эксперимента наверно нет, но тенденция уверенно устанавливается, а степень влияния при синхронной инверсии требует отдельного рассмотрения. Однозначно видно одно: акустическая инверсия не позволит решить тонкие задачи на количественном уровне, а полученные $K_{кор}$ и ошибки определения импедансов вообще ставят под вопрос

возможность решения задач динамической интерпретации даже на качественном уровне, в случае интерференционного волнового поля.

Влияние дискретности на выделение коллектора.

Оценка влияния шага дискретизации выполнена по материалам реальной скважины, где были рассчитаны модельные сейсмограммы с разным шагом дискретизации 1 и 2 мс, (рис. 7).

Далее по модельным сейсмограммам выполнена инверсия и построены матрицы классификации.

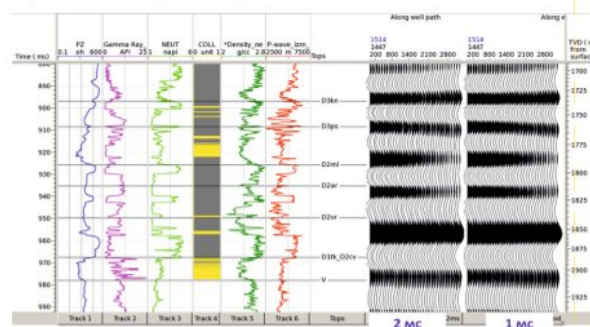
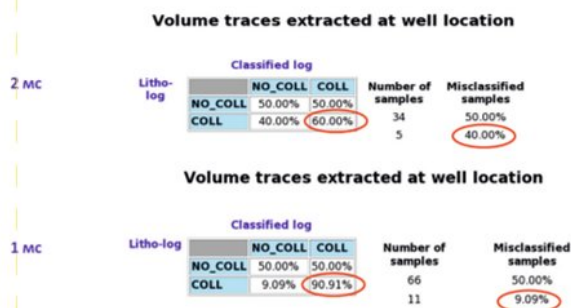


Рис. 7. Модельные сейсмограммы, рассчитанные с шагом дискретизации 1 и 2 мс.

Оценка погрешности прогноза коллектор/неколлектор приведена на рис. 8.



▲ Рис. 8. Матрица классификации по результатам инверсии, рассчитанные по скважине с шагом дискретизации 1 и 2 мс.

Как видно из рисунка, точность прогноза с шагом дискретизации 1 мс выше на 30% по отношению к данным с 2 мс, что связано, как минимум, с наличием качественной статистики.

Заключение.

Проанализировав все данные, полученные в результате изучения вопроса выбора шага дискретизации, можно было бы сказать, что на каждом этапе ошибки минимальны и лежат в общепринятых допусках. Но реальная ситуация такова, что ошибки накапливаются, накладываясь последовательно друг на друга, и к моменту перехода от сейсмоки к геологии данные становятся некондиционными.

Согласно [5] - «Слишком большой шаг дискретизации дает два эффекта:

- спектр непрерывного сигнала ограничивается максимальной частотой, которая представляет собой частоту Найквиста;
- спектр цифрового сигнала осложняется высокими частотами за пределами частоты Найквиста, которая могла присутствовать в непрерывном сигнале.

Если с первой проблемой ничего нельзя сделать, то вторая проблема представляет практическую важность. Чтобы сохранить полосу восстанавливаемых частот между нулем и частотой Найквиста, свободной от

зеркальных частот, в поле перед преобразованием сигнала из аналоговой формы в цифровую применяется антиалиасинговый ФНЧ (high-cut antialiasing filter). Этот фильтр устраняет те частотные составляющие, которые при оцифровке могут дать зеркальные частоты. Обычно антиалиасинговый ФНЧ имеет частоту среза, которая равна 0.75 или 0.5 частоты Найквиста. Этот фильтр обеспечивает ослабление частот выше частоты Найквиста...

...Интерполяция не восстанавливает частоты, потерянные при квантовании; она только формирует дополнительные выборки».

Фактически, первым шагом к ответу на вопрос выбора шага дискретизации является четко и грамотно поставленная геологом задача. Так, если требуется лишь структурная интерпретация, а мощность пластов большая, действительно можно работать с укрупненным шагом дискретизации. Если же требуется динамическая интерпретация, петрофизическое моделирование, то расчет шага дискретизации лучше делать обратным расчетом, исходя из необходимой вертикальной разрешенности. При этом смена шага дискретизации на укрупненный в процессе обработки крайне не желательна.

Литература

1. Денисов М.С. О выборе шага дискретизации при цифровой регистрации сейсмических трасс// Геофизика, 2013. №3. С.68-74.
2. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. – Тверь: изд.ГЕРС, 2006г. – 480с.
3. Череповский А.В. Теорема отсчетов – камень преткновения между наукой и практикой?// Приборы и системы разведочной геофизики, 2015. №1(51). С.91-94.
4. Widess M.B. How thin is a thin bed?// Geophysics, 1973. 36. P.1176-1180.
5. Yilmaz O. Seismic data processing. – SEG, 1986.