

УДК 550.834.013

## МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОЙ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ МОРСКОЙ НЕФТЕРАЗВЕДКИ

М. С. Хайретдинов<sup>1</sup>, Н. В. Юркевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

*E-mail: marat@opg.sscs.ru*

*nicolay\_14283@mail.ru*

Рассматривается проблема повышения точности временной синхронизации процессов излучения зондирующих акустических сигналов и регистрации отражённых от морского дна импульсов, лежащих в основе морской геологоразведки углеводородов. Главным методом разведки является непрерывное сейсмическое профилирование (НСП). Метод базируется на анализе структуры отражённого от геологических слоёв акустического сигнала. При этом возможность разрешения тонкослоистых структур во многом определяется точностью временной синхронизации. Предлагается аппаратный метод повышения искомой точности. Особенность данного способа синхронизации состоит во введении динамической автокоррекции, предусматривающей внесение временных поправок в основные устройства системы НСП — блоки навигации, контроля источника и контроля записи — после каждого цикла синхронизации внешними сигналами GPS. Этот подход выгодно отличает предложенный метод от традиционного. Тестовая модель, созданная с помощью такого метода, показала, что гарантированный уровень погрешности синхронизации лежит в пределах  $\pm 2$  мкс при допустимой по техническим требованиям не хуже 1000 мкс.

*Ключевые слова:* метод непрерывного сейсмического профилирования, GPS-синхронизация, НСП-структура, тестовая модель, качество синхронизации.

**Введение.** Метод непрерывного сейсмического профилирования (НСП) является главным в сейсморазведке запасов углеводородов в морских акваториях. Достаточно указать богатейшие залежи нефти, открытые этим методом, в районе Карибского бассейна, в Северном и Охотском морях и др. Технология проведения работ данным методом достаточно полно описана в [1–3]. В его основу заложен анализ изменения структуры акустической волны при её отражении от поверхности дна (первое вступление) и от границ разделов между поддонными слоями, а также от объектов, заглублённых в донных отложениях. Измерение скорости распространения акустических волн в воде осуществляется экспериментально (1 раз в неделю) на этапе предварительной калибровки системы НСП в районах работ и в дальнейшем учитывается в виде регулярного параметра при интерпретации сейсмического разреза (картины строения морского дна). В качестве источника акустической волны используются буксируемые пневматические пушки [4], расположенные по бортам судна-буксировщика. Приёмником отражённых от дна импульсов служат буксируемые пьезокосы, каждая из которых представляет собой набор пьезодатчиков (гидрофонов), распределённых вдоль пьезокосы с определённым шагом. Главными аппаратными компонентами системы НСП являются блоки навигации, контроля источника и контроля записи. Результат наблюдений — сейсмоакустический разрез геологических слоёв вдоль профиля наблюдений в масштабе времён пробега акустических волн. Вопрос повышения разрешающей способности получаемых разрезов в целях уточнения зон месторождений

углеводородов, особенно когда они локализованы в тонкослоистых структурах, на сегодня весьма актуален. Высокие точностные характеристики метода НСП определяются разрешённостью отражённых волн во времени и пространстве и в конечном счёте точностью восстановления сейсмических разрезов, что достигается с помощью параллельно буксируемых пьезокос, охватывающих площади наблюдений с линейными размерами в несколько километров. Это требует высокой степени временной синхронизации функционирования отдельных блоков системы между собой.

Целью данной работы является создание системы временной синхронизации процессов метода непрерывного сейсмического профилирования с повышенной точностью, достаточной для ведения коммерческой геологоразведки углеводородов.

**1. Постановка задачи.** Пусть  $t_1, t_2, \dots, t_n$  — времена пробега волн вдоль лучей «источник — приёмник», наблюдаемые в результате каждого акта излучения («выстрела») зондирующих акустических импульсов. Получаемые времена обозначают вступления последовательности определённого типа волн, отражённых от границ слоистой структуры среды. Наблюдения проводятся в точках линейного профиля на удалениях  $x_1, x_2, \dots, x_n$  от источника. Время пробега волны  $t_i$  задаётся распределением скорости соответствующей волны в среде. В свою очередь, распределение скорости зависит от модели среды, например сферически-симметричной, горизонтально-слоистой либо более сложной — с криволинейными границами. В случае горизонтально-слоистой модели скорость зависит от координаты  $z$ , соответственно будем иметь распределение скорости  $V(z)$ . Дополнительное допущение состоит в том, что каждый слой является внутри себя однородным и имеет мощность (толщину) равную  $h$ . Основная задача метода НСП заключается в том, чтобы с учётом принятых ограничений найти для каждого слоя мощность  $h$  и скорость сейсмической волны  $V$  в нём по множеству измеренных значений  $t_i$ :

$$t_i = F(x_i, h, V) = \frac{\sqrt{x_i^2 + 4h^2}}{V}. \quad (1)$$

Множество  $t_i$  принято называть годографом. Рассматриваемая задача принадлежит к классу обратных задач: здесь по данным измерений времён пробега волн нужно восстановить слоистую структуру среды и определить её параметры. Прежде всего, сюда относятся нефтегазосодержащие структуры. Точность решения задачи (1) осложняется ошибками измерения времён  $t_i$ , представляющими собой невязки между истинными и измеренными временами:

$$\delta(t_i) = t_i - F(x_i, h, V). \quad (2)$$

Рассматриваемые ошибки обусловлены рядом факторов:

- аппаратными погрешностями, возникающими из-за неточности временной синхронизации моментов излучения акустических импульсов параллельно работающими пневмоисточниками и моментов регистрации отражённых волн;
- наличием внешних шумов, вносящих дополнительные погрешности в измерения;
- расхождением принятой модели среды с истинной, характеризующейся шероховатостью границ, наличием неоднородностей.

В практике обработки данных НСП снижение влияния внешних шумов достигается за счёт усреднения результатов измерений времён на основе пространственной фильтрации сигналов от датчиков, сгруппированных в пределах базы приёмной буксируемой антенны [5]. Погрешности, обусловленные расхождением принятой модели среды с истинной, компенсируются на этапе интерпретации получаемых сейсмических разрезов среды путём введения статических поправок, обеспечивающих приближение к истинным разрезам [5]. Успех в этом процессе зависит от опыта геофизика-интерпретатора. Из технологии

применения метода НСП следует, что весьма важны учёт и минимизация аппаратных погрешностей. Поэтому главной задачей данной работы является создание и реализация метода минимизации указанных погрешностей.

**2. Предлагаемый способ решения проблемы временной синхронизации системы НСП.** Первоначально оценим требование к погрешности временной синхронизации базовых устройств в методе НСП. Отметим, что ошибки (2) носят случайный характер, в связи с чем задача (1) приобретает статус обратной задачи в статистической постановке. Соответственно для её решения используются статистические методы, которые основаны на знании математической формы распределения случайных погрешностей (2). Если форма распределения подчиняется нормальному закону вида  $p(t_1, t_2, \dots, t_n; h, V)$ , то есть два пути для оценивания связи ошибок с параметрами  $h, V$  [6]: через максимизацию функции правдоподобия в виде  $\log p(t_1, t_2, \dots, t_n; h, V)$  либо через линеаризацию (2) с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Второй путь проще, поскольку для его реализации требуются лишь первые два момента распределения. Доводом в пользу принятия гипотезы о нормальности распределения для нашего случая служат данные экспериментов, показывающие, что именно по этому закону распределены ошибки синхронизации моментов излучения и регистрации (см. разд. 5).

Пусть при использовании МНК в качестве начального приближения параметров выбраны  $(h_0, V_0)$ , тогда связь погрешностей оцениваемых параметров  $\delta t, \delta h, \delta V$  будет иметь вид

$$\delta(t) = \frac{4h_0}{V_0 \sqrt{4h_0^2 + x^2}} \delta h - \frac{\sqrt{4h_0^2 + x^2}}{V_0^2} \delta V. \quad (3)$$

В частности, если излучённый и отражённый импульсы регистрируются в одной точке, что соответствует  $x = 0$ , то при известной скорости  $\delta t_0 = 2\delta h/V$ . При допустимой погрешности определения толщины слоя  $\delta h = 1$  м и типовой скорости сейсмической волны  $V = 2000$  м/с ошибка  $\delta t_0$  не должна превышать 0,001 с. Именно такое требование к допустимой погрешности на моменты излучения и регистрации принято в методе НСП [2].

Для достижения поставленной цели — минимизации погрешностей синхронизации основных устройств — необходимо найти источники ошибки синхронизации, которая будет обуславливаться особенностями выбранного метода синхронизации. Так, забегая вперёд, укажем, что предложенный метод в отличие от традиционных импульсных методов возлагает задачу хранения «истинного» времени на каждый из блоков системы в отдельности. Тогда характеристики внутренних таймеров блоков системы всегда будут отличаться от эталонного системного таймера, что неизбежно приводит к появлению некоторой ошибки. Следовательно, необходима регулярная корректировка всех таймеров относительно эталонного. Величина ошибки определяется исключительно техническими характеристиками используемого оборудования и будет рассмотрена далее. Величина временных задержек передачи сигнала может рассматриваться в виде двух составляющих: случайной (влияние внешних факторов на систему) и систематической (аппаратные задержки, ограничение скорости передачи сигнала и т. п.) ошибок. Таким образом, решаемая задача сводится к минимизации систематических и случайных ошибок временной синхронизации аппаратных компонентов системы.

**3. Основная структура предлагаемой системы временной синхронизации элементов НСП.** Особенностью предложенного метода является то, что задача хранения истинного времени перекладывается на каждую из синхронизируемых систем в отдельности. Данное решение, с одной стороны, явно усложняет общую модель и приводит к усложнению и удорожанию системы. С другой стороны, имея одинаковые точки отсчёта и

таймеры, каждая из систем в отдельности может прогнозировать наступление конкретного события независимо от контрольного пункта. Для успешного функционирования системы требуется, чтобы временные таймеры (часы) всех систем были синхронизированы с высокой точностью. Также необходимо выбрать высокостабильный источник эталонного времени. В качестве такого источника используется время GPS. Его точность гарантируется высокостабильными атомными часами, постоянно контролируется и, что особенно важно в нашем случае, необходимые данные доступны практически в любой точке земного шара. Так, на первом этапе работы системы эталонное время принимается со спутников системы GPS и передаётся далее на PCI-карты основных компонент системы НСП. Карты имеют встроенный осциллятор для возможности поддержания высокоточного времени в автономном режиме в случае потери его центральной системой.

Навигационная система является главным звеном управления процессом синхронизации (рис. 1). В соответствии с рассчитанным навигационной системой теоретическим временем достижения акустическим источником заданных координат система навигации посылает сетевое сообщение о времени и характере грядущего события. В момент наступления заданного времени каждая система испускает отчётный импульс, принимаемый и анализируемый системой контроля качества, которая, в свою очередь, на основании полученных сведений формирует корректирующие значения для устранения ошибок синхронизации каждой из систем. Согласно времени прихода отчётных сигналов делается заключение о величине ошибки синхронизации той или иной системы. Полученные данные о качестве синхронизации передаются навигационной системе и в случае необходимости будут включены в следующее сетевое сообщение соответствующей системы для коррекции ошибки её внутреннего таймера.

Система-хранитель эталонного времени (именно это время используется для задания момента генерации акустического импульса и содержится в сетевом сообщении, передаваемом другим системам) также выполняет функции контролирующей. За 100 мкс до наступления момента выстрела включается таймер контроля качества, отсчитывающий единицу каждые 0,05 мкс. С его помощью возможно зарегистрировать момент прихода отчётного импульса от синхронизируемых систем. Таймер останавливается через 100 мкс после момента выстрела пневмоисточника. Таким образом, система контроля качества



Рис. 1. Принципиальная схема предлагаемого метода

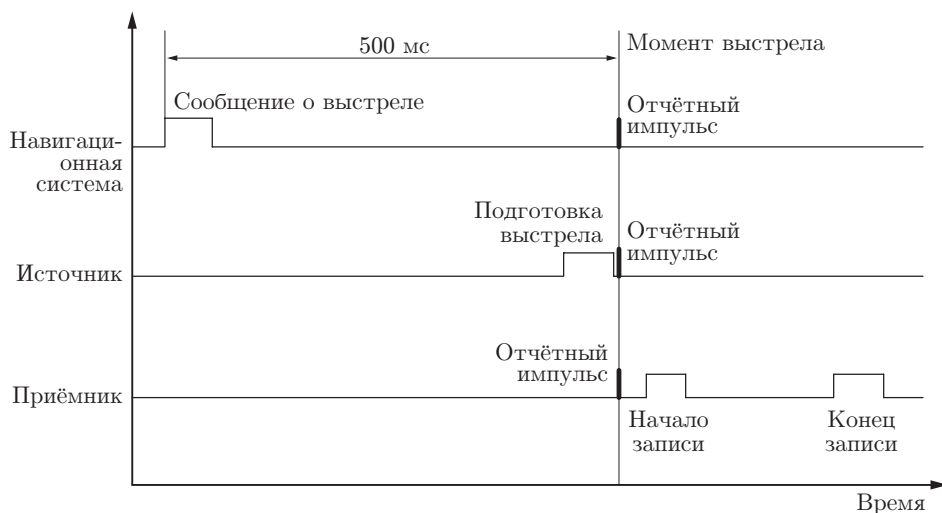


Рис. 2. Временная схема работы системы

определяет отклонение систем от эталонного времени в пределах  $\pm 100$  мкс с разрешением 0,05 мкс (рис. 2).

**4. Эталонный источник времени.** Высокостабильный и общедоступный источник эталонного времени — система GPS — передаёт данные о времени в формате IRIG-B (Inter Range Instrumentation Group). Код передаёт 100 бит данных с частотой 1 Гц, содержит синхронизационный бит, маркерный бит и два слова временного кода (двоичной кодировки и BCD — Binary Coded Decimal).

Узловым звеном предлагаемой структуры синхронизации является высокоточный интегрированный приёмник времени со встроенным осциллятором, который обеспечивает возможность применения технологии сетевых сообщений, синхронизируя внутренние часы различных блоков системы НСП с высокой точностью. Хранителем же внутреннего времени каждой системы является PCI-карта, принимающая сигнал эталонного времени от GPS-приёмника. PCI-карта также оснащена осциллятором, обеспечивающим стабильность таймера при потере сигнала центральной системы (работа в автономном режиме).

Структура интегрированного приёмника времени ITR (Integrated Timer Receiver) модели "Symmetricon XL-DC (XLi)" представлена на рис. 3.

Поддержание времени обеспечивается высокостабильным осциллятором, синхронизированным со временем GPS. Точность работы осциллятора  $2 \cdot 10^{-10}$  за 100 с. В отсутствие сигнала спутника отклонение в 1 мкс составило 83 мин. Модульная высокоточная система частотно-временной синхронизации XLi — наиболее универсальное и гибкое решение, связанное с измерением и синхронизацией времени. Модульность XLi обеспечивается различными легко конфигурируемыми дополнительными платами. Большое количество дополнительных плат позволяет легко адаптировать систему почти для всех возможных выходов и входов, необходимых для приложений времени и частоты путём объединения до десяти дополнительных модулей, модернизации генератора и двух GPS-приёмников в расчёте на единицу устройства.

**5. Оценка качества предлагаемого метода.** Качество синхронизации оценивается методом статистической обработки данных системы контроля качества. Исходными данными для задачи статистической оценки является экспериментально полученная выборка отклонений систем позиционирования, контроля источника и контроля записи от эталонного времени (рис. 4). Рассмотрим механизм оценки качества на примере выборки из 1841 эксперимента (1841 определяет цикл работы системы). Как видно из графика, выборки



Рис. 3. Схема работы системы частотно-временной синхронизации XLi

зашумлены. Источником фиксируемых пиковых отклонений является характеристика отчётного импульса систем, подразумевающая его длину 5 мкс. На практике же в результате дискретизации импульса его длина оценивается или в 5 мкс, или в 4 мкс. Соответственно экспериментальные данные для некоторых элементов выборки отличаются от реальных на 1 мкс. Для устранения погрешности данные подверглись фильтрации (рис. 5). Значение каждого элемента выборки, имеющего отклонение от среднего за предыдущие пять циклов, превышающее по модулю 0,6 мкс, увеличивалось на 1 мкс.

В качестве обоснования принятия гипотезы о нормальности распределения случайных погрешностей (2) синхронизации моментов излучения зондирующих акустических импульсов и регистрации отражённых волн (см. разд. 2) на рис. 6 представлена гистограмма распределения (эмпирическая плотность) погрешностей, полученная на реально работающей системе НСП. На неё наложена теоретическая плотность распределения, соответствующая виду нормального распределения. Приведём обоснование такого построения.

5.1. *Подбор теоретического распределения и его параметров.* Характер теоретического распределения задаётся видом гистограммы, построенной следующим образом. Вначале весь интервал изменения данных  $[x_{\min}, x_{\max}]$  нужно разбить на участки одинаковой длины. Сколько участков взять? Есть несколько подходов к определению числа участков разбиения  $k$ . Один из них — это использование формулы Стёрджесса  $k = \lceil 1 + 3,322 \lg n \rceil$ , где  $\lceil \dots \rceil$  — операция округления до ближайшего целого. Другой подход базируется на следующих предпосылках. С одной стороны, число участков разбиения должно быть как можно больше, а с другой — в каждый из этих участков должно попадать как можно больше значений  $x_i$ . Компромисс между этими требованиями приводит к тому, что обычно выбирают число участков  $k$  для построения гистограммы как ближайшее целое к корню квадратному из  $n$ :  $k = \lfloor \sqrt{n} \rfloor$ . В нашем случае объём генеральной совокупности  $n = 1841$ , поэтому число участков разбиения  $k = 43$ . Отсюда ширина интервала для построения гистограммы  $\Delta = (X_{\max} - X_{\min})/43$ . Для случайных погрешностей (2) синхронизации моментов излучения зондирующих акустических импульсов и регистрации отражённых волн  $\Delta = 0,04302325581395349$  мкс. Далее определяют число попаданий в каждый из участков разбиения и строят соответствующую гистограмму распределения (рис. 6).

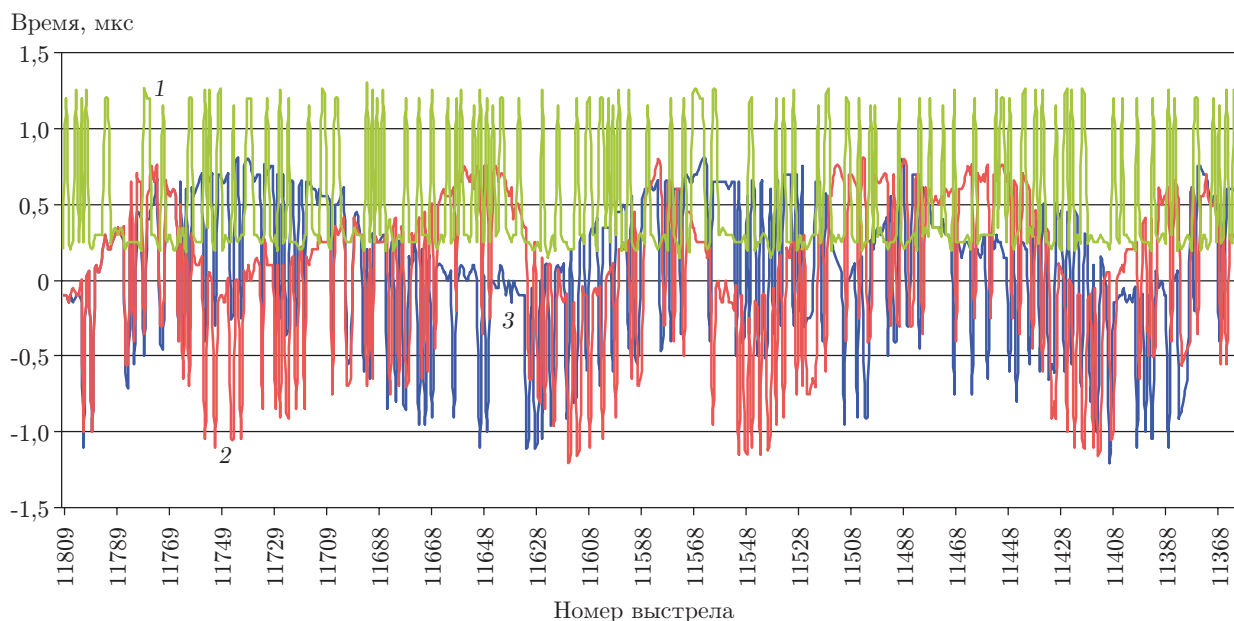


Рис. 4. Нефильтрованные экспериментальные данные синхронизации метода НСП (кривая 1 — позиционирование, 2 — источник, 3 — регистратор)

Для приближения теоретического нормального распределения вида

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/2\sigma^2}$$

к выборочному используется метод моментов. В нём параметры, входящие в выражения для плотности  $f_x(x)$ , подбираются таким образом, чтобы вычисленные по этим параметрам математическое ожидание и дисперсия совпали с выборочными. Так, для нормального распределения параметры  $m$  и  $\sigma$  берём равными соответственно выборочным математическому ожиданию и среднеквадратичному отклонению:  $m = m_{x\sim}$ ;  $\sigma = \sigma_{x\sim}$ .

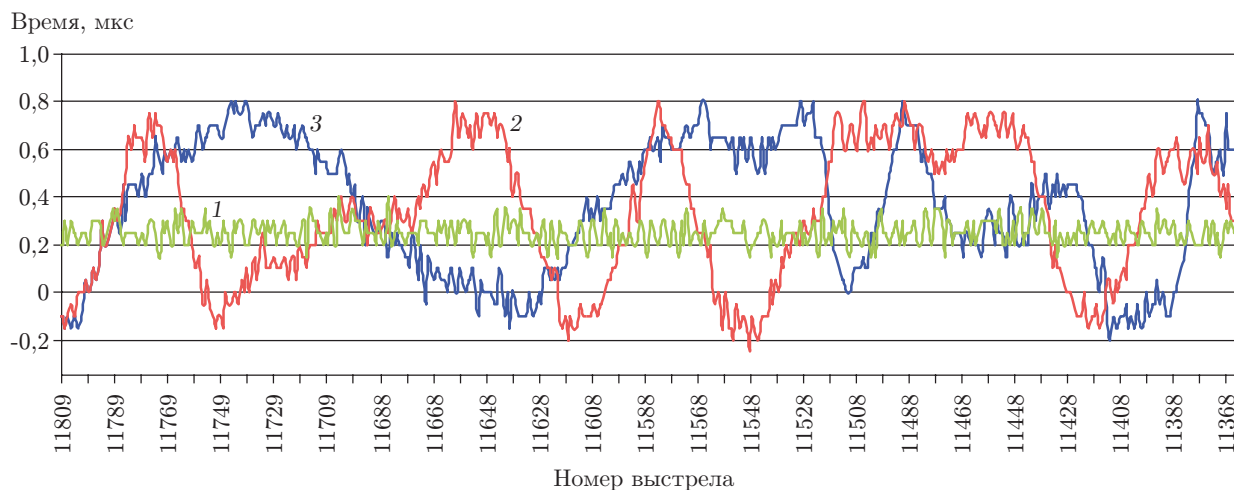


Рис. 5. Экспериментальные данные синхронизации после фильтрации (обозначения кривых, как на рис. 4)

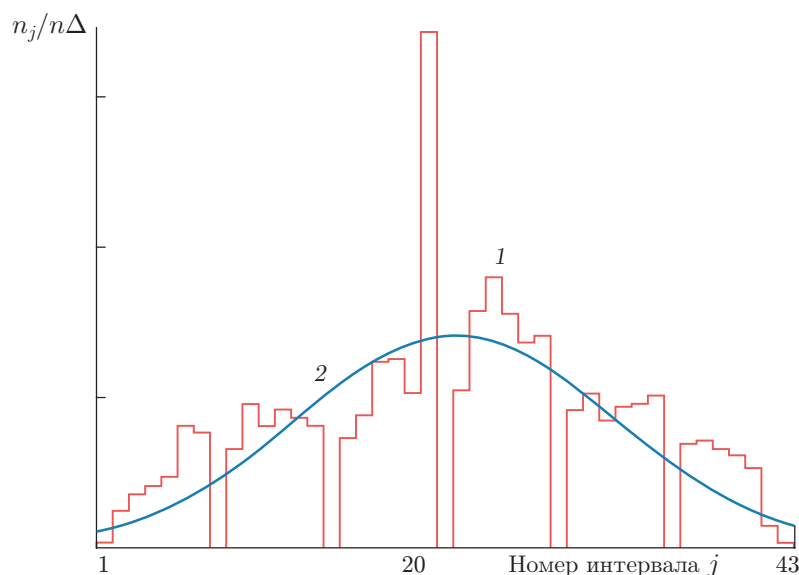


Рис. 6. Распределение погрешности ошибки разницы систем контроля источника и записи (1 — эмпирическая, 2 — теоретическая плотности распределений)

5.2. *Доверительные оценки генеральных параметров распределения (интервальные оценки).* По выборочным параметрам распределения можно найти доверительные интервалы для генеральных параметров. Доверительный интервал для генерального математического ожидания  $m_x$  имеет вид

$$m_x - \frac{\sigma_x t_{(1+p)/2}(f)}{\sqrt{n}} \leq m_x \leq m_x + \frac{\sigma_x t_{(1+p)/2}(f)}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где  $t_p(f)$  — квантиль  $t$ -распределения Стьюдента, соответствующая вероятности  $p$  (табличные данные [7]);  $m_x$  — выборочное математическое ожидание;  $\sigma_x$  — выборочное среднеквадратичное отклонение;  $n$  — объём выборки;  $f = n - 1$  — число степеней свободы выборки.

Доверительный интервал для генеральной дисперсии  $D_x$  вычисляется по формуле

$$\frac{f D_x}{\chi_{(1+p)/2}^2(f)} \leq D_x \leq \frac{f D_x}{\chi_{(1-p)/2}^2(f)}, \quad (5)$$

где  $\chi_p^2(f)$  — квантиль  $\chi^2$ -распределения Пирсона, соответствующая вероятности  $p$  (табличные данные [7]);  $D_x$  — выборочная дисперсия. Формулы (4), (5) имеют место, только если исходная величина  $X$  распределена по нормальному закону. Из графика на рис. 6 с учётом (4), (5) и доверительной вероятностью 0,95 оценён максимум погрешности синхронизации на штатной системе НСП, который лежит в пределах 0,034–0,072 мкс.

**Заключение.** В данной работе для штатной технологии непрерывного сейсмического профилирования, используемой в морской сейсморазведке нефти и газа, предложен и исследован метод уменьшения погрешностей временной синхронизации функционирования основных блоков системы НСП: навигации, контроля источника и контроля записи. Особенностью метода является то, что задача хранения истинного времени перекладывается на каждый из синхронизируемых блоков системы НСП в отдельности, что позволяет заранее прогнозировать наступление конкретного момента начала события, связанного с актами зондирования среды независимо от контрольного пункта.



Спроектирована принципиальная схема предлагаемой системы с учётом требований технического задания и на базе доступных на момент разработки технологических решений. Собранный модель системы позволила произвести сбор тестовых данных для оценки качества её работы. Проведён статистический анализ качества рассматриваемого метода. Показано, что погрешности синхронизации основных блоков системы НСП по отношению к эталонному времени лежат в пределах  $\pm 2$  мкс при допустимой по техническим требованиям не хуже 1000 мкс, т. е. имеем улучшение в 500 раз.

Предложенный метод обеспечивает повышение разрешающей способности получаемых сейсмических разрезов для уточнения зон месторождений углеводородов, особенно когда они локализованы в тонкослоистых структурах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980. 550 с.
2. Потапов О. А. Технология полевых сейсморазведочных работ. М.: Недра, 1987. 307 с.
3. Урупов А. К. Основы трехмерной сейсморазведки: Учеб. пособие для вузов. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ», РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. 584 с.
4. Акустические подводные низкочастотные излучатели. Л.: Судостроение, 1984. 181 с.
5. Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. М.: Мир, 1989. 212 с.
6. Яновская Т. Б., Порохова Л. Н. Обратные задачи геофизики: Учеб. пособие. С.-Пб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2004. 213 с.
7. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 415 с.

*Поступила в редакцию 21 января 2013 г.*

---