

УДК 550.834.013

## **Технология высокоточной временной синхронизации для метода непрерывного сейсмического профилирования\***

**М.С. ХАЙРЕТДИНОВ, Н.В. ЮРКЕВИЧ**

Рассматривается проблема повышения разрешающей способности морской нефтеразведки за счет введения метода высокоточной временной синхронизации процессов излучения зондирующих и регистрации отраженных от морского дна акустических импульсов. Метод создан для технологии непрерывного сейсмического профилирования (НСП) морского дна, направленной на обнаружение и локализацию нефтяных залежей. Предлагаемый метод временной синхронизации отдельных блоков системы НСП, в отличие от традиционного метода, возлагает задачу хранения «истинного» времени на каждый из них в отдельности путем введения внутренних высокостабильных таймеров и их динамической автокоррекции. Тестовая модель, основанная на предложенном методе, показала, что гарантированный уровень погрешности синхронизации лежит в пределах  $\pm 2$  микросекунд при допустимой по техническим требованиям не хуже 1000 мкс.

**Ключевые слова:** морская сейсморазведка, метод НСП, GPS-система, система НСП, высокоточная распределенная временная синхронизация, тестовая модель, качество синхронизации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Метод непрерывного сейсмического профилирования (НСП) является основным методом морской сейсморазведки запасов углеводородов на морских акваториях. Технология проведения работ этим методом описана в [1, 2, 3]. В основу метода заложен принцип изменения структуры акустической волны при ее отражении от границ разделов сред (поддонные слои, объекты, заглубленные в донные отложения). В качестве источника акустической волны используются буксируемые пневматические пушки [4]. В качестве приемника отраженных импульсов используются буксируемые пьезокосы, каждая из которых представляет собой набор пьезодатчиков (гидрофонов), распределенных вдоль пьезокосы с определенным шагом. Основными аппаратными компонентами системы НСП являются блоки навигации, контроля источника и контроля записи. Результатом наблюдений является сейсмоакустический разрез геологических слоев вдоль профиля наблюдений в масштабе времен пробега акустических волн. Вопросы повышения разрешающей способности получаемых разрезов с целью уточнения зон месторождений углеводородов, особенно когда они локализованы в тонкослоистых структурах, является на сегодня весьма актуальным. Высокие точностные характеристики метода НСП определяются разрешенностью отраженных волн во времени и пространстве и, в конечном счете, точностью восстановления сейсмических разрезов. Это определяет требование высокой степени временной синхронизации функционирования отдельных блоков системы НСП между собой.

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

---

\* *Статья получена 21 ноября 2012 г.*

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – времена пробега волн вдоль лучей «источник-приемник». наблюдаемые в результате каждого акта излучения («выстрела») зондирующих акустических импульсов. Получаемые времена отражают вступления последовательности определенного типа волн, отраженных 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  $t_i$  определяется распределением скорости соответствующей волны в среде. В случае горизонтальной-слоистой модели скорость будет зависеть от координаты  $z$  и, 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 состоит в том, чтобы с учетом принятых ограничений определить для каждого слоя мощность  $h$  и скорость сейсмической волны  $V$  в нем 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 относится к классу обратных задач: здесь по данным измерений времен пробега волн нужно восстановить слоистую структуру среды и определить ее параметры. Прежде всего, сюда относятся нефтегазосодержащие структуры. Точность решения задачи (1) осложняется ошибками измерения времен  $t_i$ , 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:

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

В практике обработки данных НСП снижение влияния *внешних шумов* достигается за счет усреднения результатов измерений времен на основе пространственной фильтрации сигналов от датчиков, сгруппированных в пределах базы приемной буксируемой антенны [5]. Погрешности, обусловленные расхождением принятой модели среды от истинной, компенсируются на этапе интерпретации получаемых сейсмических разрезов среды путем введения статических поправок, обеспечивающих приближение к истинным разрезам [6]. Успех в этом процессе зависит от опыта геофизика-интерпретатора. Из технологии проведения метода НСП следует, что весьма важны учет и минимизация *аппаратурных погрешностей*. С учетом этого основной задачей настоящей работы является разработка и реализация метода минимизации указанных погрешностей.

## 2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ НСП

Прежде всего, нужно отметить, что ошибки (2) носят случайный характер, в связи с чем задача (1) приобретает статус обратной в статистической постановке. Соответственно, для ее решения используются статистические методы, которые основаны на знании математической формы распределения случайных погрешностей (2). Если форма распределения подчиняется нормальному закону вида  $p(t_1, t_2, \dots, t_n; h, V)$ , т. е. 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 квадра-

тов (мнк). Последний путь проще, поскольку для его реализации требуются лишь первые два момента распределения. 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 (раздел 5).

Пусть при использовании мнк в качестве начального приближения параметров выбраны  $(h_0, V_0)$ , тогда связь оцениваемых погрешностей  $\delta t, \delta h, \delta V$  будет иметь вид [7]:

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

В частности, если излученный и отраженный импульсы регистрируются в одной точке, что соответствует  $x = 0$ , то  $\delta t_0$  при известной скорости  $V$  составит  $\delta t_0 = 2\delta h/V$ . 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 на допустимую погрешность на моменты излучения и регистрации приняты в методе НСП [2].

Предлагаемый в работе метод временной синхронизации отдельных блоков системы НСП, в отличие от традиционных импульсных методов, возлагает задачу хранения «истинного» времени на каждый из них в отдельности путем ввода внутренних высокостабильных таймеров. При этом имея одинаковые точки отсчета и таймеры, каждая из систем в отдельности может прогнозировать наступление конкретного события независимо от контрольного пункта. Для успешного функционирования предлагаемой системы необходимо чтобы временные таймеры (часы) всех систем были синхронизированы с высокой точностью как между собой, так и с высокостабильным источником эталонного времени. В качестве последнего используется широкодоступное время GPS.

### 3. ОСНОВНАЯ СТРУКТУРА ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМЫ.

На первом этапе работы «истинное» время принимается со спутников системы GPS и передается основным блокам системы НСП. Навигационная система является основным звеном управления процессом синхронизации (рис. 1).

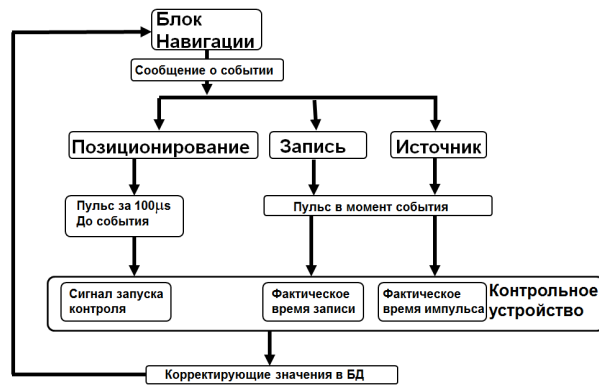


Рис. 1. Принципиальная схема предлагаемого метода

На основании рассчитанного теоретического времени достижения акустическим источником заданных координат, блок навигации посылает сетевое сообщение о времени и характере грядущего события. В момент наступления заданного времени каждый из блоков системы НСП посылает отчетный импульс системе контроля качества. Последняя формирует корректирующие значения для устранения ошибок синхронизации. Полученные данные о качестве

синхронизации передаются навигационной системе и, в случае необходимости, будут включены в следующее сетевое сообщение соответствующему блоку для коррекции ошибки его внутреннего таймера.

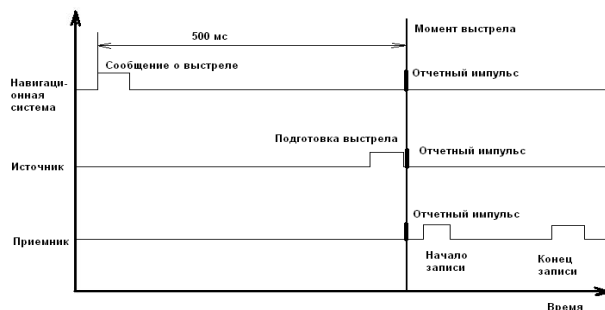


Рис. 2. Временная схема работы системы

Система-хранитель эталонного времени также выполняет контрольные функции. За 100 мкс до наступления момента выстрела включается таймер контроля качества, отсчитывающий единицу каждые 0.05 мкс. С помощью данного таймера возможно зарегистрировать момент прихода отчетного импульса от синхронизируемых систем. Таймер останавливается через 100 мкс после момента выстрела пневмоисточника. Таким образом, система контроля качества определяет отклонение систем от эталонного времени в пределах  $\pm 100$  мкс с разрешением в 0.05 мкс (рис. 2).

#### 4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА.



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

Качество синхронизации оценивается методом статистической обработки. Исходными данными для задачи статистической оценки является экспериментально полученная выборка отклонений систем позиционирования, контроля источника и контроля записи от эталонного времени (рис. 4).

В качестве обоснования принятия гипотезы о нормальности распределения погрешностей (2) синхронизации моментов излучения зондирующих акустических импульсов и регистрации отраженных волн (раздел 3) на рис. 5 приводится соответствующая гистограмма распределения (эмпирическая плотность распределения) погрешностей, полученная на реально работающей системе НСП.

На нее наложена теоретическая плотность распределения, соответствующая виду нормального распределения. Ниже приводится обоснование такого построения.

Вид теоретического распределения подбирается исходя из вида гистограммы. Последняя построена следующим образом. Вначале весь интервал изменения данных  $[x_{\min}, x_{\max}]$  нужно разбить на участки одинаковой длины. Обычно выбирают число участков  $k$  для построения гистограммы как ближайшее целое к корню квадратному из  $n$ :  $k = \lceil \sqrt{n} \rceil$ , где  $\lceil \cdot \rceil$  – операция округления до ближайшего целого.

В нашем случае объем генеральной совокупности  $n = 1841$ , поэтому число участков разбиения  $k = 43$ . Отсюда ширина интервала для построения гистограммы составляет  $h = (X_{\max} - X_{\min})/43$ . Для погрешностей (2) синхронизации моментов излучения зондирующих акустиче-

ских импульсов и регистрации отраженных волн  $h = 0.04302325581395349$  мкс. Далее построим соответствующую гистограмму распределения (рис. 5).

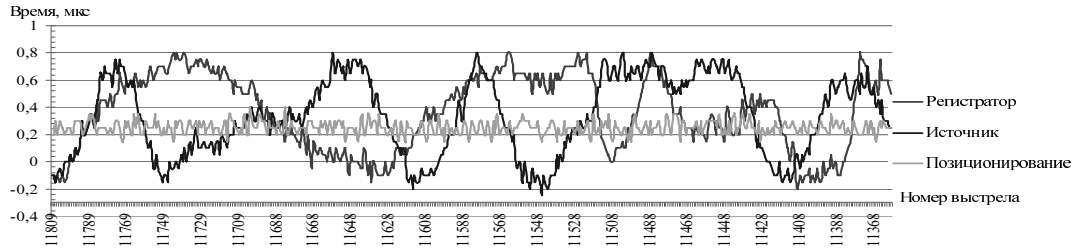


Рис. 4. Экспериментальные данные синхронизации после фильтрации

Для приближения теоретического нормального распределения  $f_x(x)$  с параметрами  $[m, \sigma]$  к выборочному используется метод моментов. В нём искомые параметры подбираются так, чтобы они совпали с соответствующими выборочными значениями:  $m = m_{x\sim}$ ;  $\sigma = \sigma_{x\sim}$ .

По выборочным параметрам распределения можно найти доверительные интервалы для генеральных параметров. Доверительный интервал для генерального математического ожидания  $m_x$  имеет вид

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

где  $t_p(f)$  – квантиль  $t$ -распределения Стьюдента, соответствующий вероятности  $p$  (табличные данные). Здесь  $m_x, \sigma_x$  – выборочные математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение соответственно,  $n$  – объём выборки и  $f = n - 1$  – число степеней свободы выборки.

Доверительный интервал для генеральной дисперсии  $D_x$  вычисляется по формуле

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

где  $\chi_p^2(f)$  – квантиль  $\chi^2$  – распределения Пирсона, соответствующий вероятности  $p$  (табличные данные),  $D_x$  – выборочная дисперсия (2) и  $f$  – число степеней свободы выборки. Формулы (4), (5) имеют место, только если исходная величина  $X$  распределена по нормальному закону. Из графика рис. 5 с учетом (4), (5) с доверительной вероятностью 0.95 оценен максимум погрешности синхронизации на штатной системе НСП, который лежит в пределах 0.034-0.072 мкс.

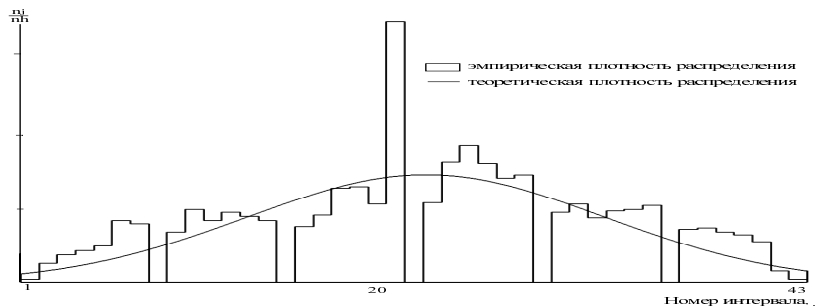


Рис. 5. Распределение погрешности ошибки разницы систем контроля источника и записи:

$$p = 0.95: 0.034 \leq m\delta \leq 0.072 \text{ мкс}$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для технологии непрерывного сейсмического профилирования (НСП) морской сейсморазведки на нефть и газ предложен и исследован метод уменьшения погрешностей временной синхронизации функционирования основных блоков системы НСП-навигации, контроля источника и контроля записи.

Созданная модель системы позволила произвести сбор тестовых данных для оценки качества работы системы НСП в целом. Проведен статистический анализ качества предложенного 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.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гурвич И.И. Сейсмическая разведка / И.И. Гурвич, Г.Н. Боганик. – М.: Недра, 1980. – С. 550.
- [2] Потапов О.А. Технология полевых сейсморазведочных работ / О.А. Потапов. – М.: Недра, 1987. – С. 307.
- [3] Урупов А.К. Основы трехмерной сейсморазведки / А.К. Урупов. – М.: Изд-во «Нефть и газ».
- [4] Акустические подводные низкочастотные излучатели / А.В. Римский-Корсаков [и др.]. – Ленинград: Судостроение, 1984. – С. 181.
- [5] Хаттон Л. Обработка сейсмических данных / Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкин. – М.: Мир, 1989. – С. 212.
- [6] Яновская Т.Б. Обратные задачи геофизики / Т.Б. Яновская, Л.Н. Порохова. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2004. – С. 213.

*Хайретдинов Марат Саматович*, доктор технических наук, заведующий кафедрой сетевых информационных технологий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований: геофизическая информатика, волновые процессы в смежных средах, компьютерный анализ данных. Публикации: 6 монографий, 10 патентов, более 250 научных статей. E-mail: marat@org.sgcc.ru

*Юркевич Николай Викторович*, аспирант Новосибирского Государственного Технического университета. Основное направление научных исследований: геофизическая информатика. E-mail: nicolay\_14283@mail.ru

#### **Khairtdinov M.S., Yurkevich N.V.**

##### *Continuous seismic profiling method elements time synchronization technology*

The work is dedicated to the problem of time synchronization of spaciouly distributed systems on example of Continuous Seismic Profiling method. One of the main method limitations is requirement for high degree of time synchronization between system elements (acoustic signal source, receiver and positioning system). As a result, time synchronization has an effect on definition on target layer depth and is one of the factors defining method resolution. The method offered is based on usage of GPS time as "master" signal for all distributed elements of the system. One of the main features of the method is that it allows dynamic error correction. Such feature shall be considered as an advantage of the method which allows elimination of systematic errors. The test model has shown, guaranteed level of synchronization errors within  $\pm 2$  micro seconds at admissible on technical requirements not worse than 1000 microseconds.

**Key words:** sea seismic prospecting, method of continuous seismic profiling, GPS-system, the navigation block, the control block of a source, the control block of record, the high-precision distributed time synchronization.