

ФИЛЬТРАЦИЯ СЕМБЛАНСА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАПИСЕЙ ВОЛНОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Р. Д. АХМЕТСАФИН¹, Р. З. АХМЕТСАФИНА²

¹Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым,
141700, Долгопрудный, Россия
E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru

²Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
101000, Москва, Россия
E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Предложены методы фильтрации сембланса. Сембланс является основным инструментом оценки интервальных времен (скоростей) составляющих волнового пакета многоэлементного волнового акустического каротажа. Сембланс, или *STC (Slowness-Time Coherence)*, — мера когерентности распределения энергии между зарегистрированными сигналами на приемниках антенной решетки зонда волнового акустического каротажа в координатах τ — p или „*приведенное время пробега волны от середины антенной решетки* (τ) — *интервальное время* (p)“.

Ключевые слова: многоэлементный волновой акустический каротаж, сембланс, алейсинг, фильтр подавления, сингулярное разложение, неотрицательное матричное разложение

Сембланс [1] является основным инструментом оценки интервальных времен (скоростей) составляющих волнового пакета многоэлементного волнового акустического каротажа (ВАК) [2, 3]. Сембланс, или *STC (Slowness-Time Coherence)* [4], — мера когерентности распределения энергии между зарегистрированными сигналами на приемниках антенной решетки зонда волнового акустического каротажа в координатах τ — p или „*приведенное время пробега волны* (τ) — *интервальное время* (p)“:

$$STC(\tau, p) = \frac{\int_{\tau-T}^{\tau+T} \left[\sum_{m=1}^M y(t + px_m, m) \right]^2 dt}{M \int_{\tau-T}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left[y(t + px_m, m) \right]^2 dt}, \quad (1)$$

где x_m — расстояние от центра антенной решетки до m -го приемника, M — число приемников, $y(t, m)$ — сигналы ВАК по приемникам, p — интервальное время (*slowness*), T — полуокно времени усреднения. Числитель (1) характеризует саму когерентную энергию, а знаменатель — всю приведенную энергию сигналов по этим измерениям. Сембланс $STC(\tau, p) \in (0, 1]$ — безразмерная величина. В отличие от времени пробега (регистрации) t по приемникам, расположенным по координатам x_m на антенной решетке, τ называют приведенным временем пробега от середины антенной решетки.

Заменив интеграл суммой и перейдя к индексам, представим соотношение (1):

$$STC(i, l) = \frac{\sum_{n=i-N_T}^{i+N_T} \left[\sum_{m=1}^M y(t_n + p_l x_m, m) \right]^2}{M \sum_{n=i-N_T}^{i+N_T} \sum_{m=1}^M \left[y(t_n + p_l x_m, m) \right]^2}, \tag{2}$$

где $x_m = \Delta x m - \Delta x (M + 1) / 2$ (начало координат x приводится к середине антенной решетки); Δx — расстояние между приемниками; N_T — длина полуокна в квантах времени. Таким образом, значения семблansa представляются матрицей $\|STC(k, l)\|$.

Вычисление по формуле (2) требует интерполяции в явном виде, т.к. сигналы $y(t, m)$ зарегистрированы только в моменты времени $t_n = n\Delta t$. Поэтому целесообразно применение прямого и обратного БПФ, на основе свойства сдвига

$$Y(f, m) = \text{БПФ}_{t_n \rightarrow f} \{y(t_n, m)\};$$

$$\text{БПФ}_{t_n \rightarrow f} \{y(t_n + d, m)\} = Y(f, m) \exp(j2\pi f d), \tag{3}$$

тогда

$$STC(i, l) = \frac{\sum_{n=i-N_T}^{i+N_T} \left| \text{ОБПФ}_{f \rightarrow t_n} \left\{ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j2\pi f p_l x_m} \right\} \right|^2}{M \sum_{n=i-N_T}^{i+N_T} \sum_{m=1}^M \left| \text{ОБПФ}_{f \rightarrow t_n} \left\{ Y(f, m) e^{j2\pi f p_l x_m} \right\} \right|^2}. \tag{4}$$

Формула (1) может быть представлена сембланс-плотом (*STC-plot* [4]). Волны Р — продольная, S — поперечная, St — Стоунли [5, 6], составляющие пакеты ВАК, различаются по скорости, поэтому, даже если они перекрываются (интерferируют) в пределах антенной решетки, на сембланс-плоте каждая из них представляется отдельным пятном. Пятна располагаются в окрестности линии $\tau(p) = px_0$, где x_0 — расстояние от излучателя до середины антенной решетки.

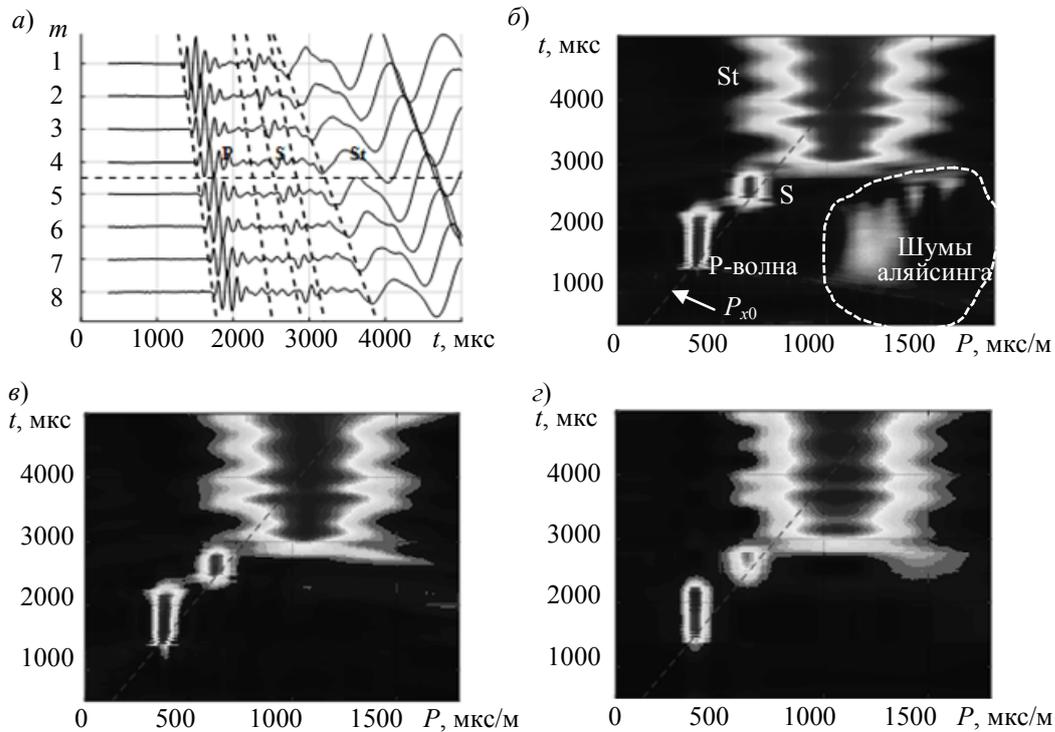


Рис. 1

Представление по формулам (1), (2), (4) принято называть традиционным, или классическим, семблансом (*traditional semblance, conventional semblance*).

На рис. 1, а представлены сигналы $y(t, m)$, регистрируемые приемниками на отметке глубины $h=288$, прибора ВАК с 8 приемниками. Фазокорреляционные диаграммы (ФКД) по

первому и восьмому приемникам представлены на рис. 2, а, б. На рис. 1, б представлен традиционный сембланс (сембланс-плот) на $h=288$ при $N_T=32$ ($T=384$ мкс).

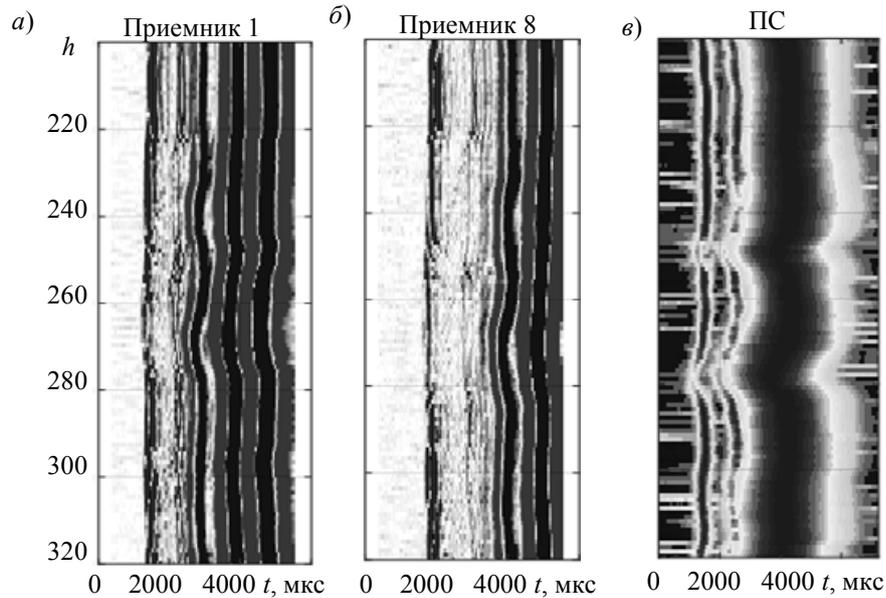


Рис. 2

На рис. 2 приведены семблансы по глубине: а — ФКД по первому приемнику; б — по последнему (восьмому); в — проекции традиционного сембланса.

В матричном виде вычисление каждого из элементов матрицы сембланса (2) можно записать как [7]

$$STC(k, l) = \frac{\|\mathbf{D} \cdot \mathbf{e}\|^2}{M \cdot \mathbf{D}^2}, \quad (5)$$

где матрица \mathbf{D} имеет размерность $(2N_T+1) \times M$, \mathbf{e} — единичный вектор.

Для отображения сембланс-плота по глубине строят одномерную проекцию на ось p [4]:

$$STC_\tau(p) = \max_\tau STC(\tau, p), \quad (6)$$

или

$$STC_\tau(l) = \max_i STC(i, l). \quad (7)$$

На рис. 3, з (кривая ПС) представлена проекция сембланса (7) для $h=288$, а на рис. 2, в — проекции сембланса для разных h (для которых в программных пакетах обработки ВАК выполняется трассировка на глубине интервальных времен составляющих волн).

На наш взгляд, недостатками традиционного сембланса являются:

1) необходимость выбора величины временного окна (полуокна) усреднения N_T [8], которое загрубляет распределение когерентной энергии;

2) идентификация и локализация пятен изображения сембланса, которые могут быть затруднены помехами [9] и шумами квантования [10] (шаг по времени и шаг расстояния между приемниками);

3) использование формул (6), (7) не всегда позволяет выполнить четкую трассировку линий интервальных времен составляющих волн по глубине (рис. 2, в) [11].

В настоящей работе предлагаются два метода фильтрации матриц сембланса, позволяющих отчасти устранить некоторые недостатки традиционного сембланса.

Отметим, что временное окно (и его выбор) не является обязательным в семблансе с преобразованием Радона [2, 12]:

$$\text{STC}_a(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right|^2}{M \sum_{m=1}^M |y_a(\tau + px_m, m)|^2}, \quad (8)$$

где аналитический сигнал

$$y_a(t, m) = y(t, m) + jH\{y(t, m)\}. \quad (9)$$

$H\{\cdot\}$ — преобразование Гильберта.

Нетрудно выполнить вычисление матрицы STC_a через прямое/обратное БПФ.

Аляйсинг [10, 13] является методической помехой, связанной с дискретизацией, и ее можно исключить. Для этого в настоящей работе предлагается заменить экспоненту в числителе и знаменателе формулы (4) функцией

$$\varphi(f, l, m) = \begin{cases} e^{j2\pi f p_l x_m}; & f < \frac{1}{p_l \Delta x}; \\ 0; & f \geq \frac{1}{p_l \Delta x}, \end{cases} \quad (10)$$

тем самым реализовать „фильтр подавления“ (*dip filter*), отсекая область аляйсинга [14, 15]. На рис. 1, в представлен сембланс-плот в $(\tau-p)$ -области на $h=288$ после исключения аляйсинга.

Метод главных компонент (*Principal Component Analysis*, PCA) — один из способов сокращения размерности данных с потерей наименьшего количества информации. В геофизике этот метод наряду с сингулярным разложением (*Singular Value Decomposition*, SVD) применяется для фильтрации помех и разделения составляющих волн сейсмики [16] и ВАК [17]. В работе [7] предложена нормализация традиционного сембланса на основе сингулярного (SVD) разложения матрицы \mathbf{D} в представлении (5):

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T \approx \sum_{i=1}^K \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T, \quad (11)$$

где \mathbf{U} — матрица порядка N_τ , \mathbf{V} — матрица порядка N_p , $\mathbf{\Lambda}$ — $(N_\tau \times N_p)$ -матрица (\mathbf{u}_i — вектор-столбец длины N_τ , \mathbf{v}_i — вектор-столбец длины N_p , λ_i — сингулярные числа).

Разложение (11) позволяет сохранить $\text{STC}(\tau, p) \in (0, 1]$ и улучшить соотношение сигнал/шум [7].

В работе [18] предложено применять сингулярное разложение (метод главных компонент) не к элементам числителя и знаменателя сембланса, а к самому матричному представлению сембланса. Это применимо ко всем семблансам — как оконным, так и безоконным [2]. Значения сембланса представляются $(N_\tau \times N_p)$ -матрицей, где N_τ — число точек для приведенного времени пробега τ , N_p — число точек для интервального времени p . Аппроксимация матрицы сембланса матрицей меньшего ранга выполняет условие

$$\text{STC}(i, l) = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T = \sum_{k=1}^{\min(N_\tau, N_p)} \lambda_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T \approx \sum_{k=1}^K \lambda_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T. \quad (12)$$

Основная идея такой фильтрации заключается в следующем: а) визуализация матриц сембланса позволяет выявить пятна когерентной энергии конечного числа составляющих волн, расположенные в окрестности P_{x0} ; б) в общем случае матрица сембланса имеет полный ранг — $\min(N_\tau, N_p)$, что представляется избыточным для визуальной структуры (конечное число пятен); в) желаемый или ожидаемый вид матрицы сембланса (число пятен) может быть получен аппроксимацией матрицы сембланса матрицей меньшего ранга ($K=1-5$). Такая фильтрация позволяет улучшить соотношение сигнал/шум, объединить размытые пятна и исключить неглавные компоненты. Кроме того, фильтрация может эффективно применяться и к подматрицам сембланса.

Соотношение (12) можно переписать как

$$STC(i, l) \approx \sum_{k=1}^K \|STC_k(i, l)\|, \tag{13}$$

где матрицы $\|STC_k(i, l)\|$ представляют собой главные компоненты.

Для удобства трассировки интервальных времен и повышения уровня автоматизации обработки ВАК в настоящей работе предлагается использовать проекции главных компонент

$$STC_{\tau, i}(l) = \max_i STC_k(i, l). \tag{14}$$

Недостаток такого подхода (применительно к матрице сембланса) — невозможно гарантировать, что все значения аппроксимирующей матрицы (и главных компонент тоже) будут находиться в диапазоне (0, 1]. Отчасти этот недостаток может быть устранен применением неотрицательного матричного разложения (*Non-negative Matrix Factorization, NMF*) [19, 20] вместо сингулярного

$$STC(i, l) \approx \mathbf{W} \cdot \mathbf{H}. \tag{15}$$

Размер матрицы \mathbf{W} — $N_\tau \times K$, размер матрицы \mathbf{H} — $K \times N_p$, где K — задаваемый ранг аппроксимирующей матрицы. Соотношение (15) можно представить суммой неотрицательных матриц

$$STC(i, l) \approx \sum_{k=1}^K \|STC_k(i, l)_+\|. \tag{16}$$

При этом невозможно гарантировать, что все значения аппроксимирующей матрицы и компонент будут ≤ 1 (но при этом > 0).

На рис. 1, 2 представлен сембланс-плот в $(\tau-p)$ -области после матричного разложения при $K=3$ (в волновом пакете присутствуют три волны — P, S, St), а на рис. 3, а, б, в — компоненты матричного разложения (а — St-волна, б — S-волна, в — P-волна). На рис. 3, г кроме проекции традиционного сембланса (7) представлены также проекции компонент (14). Проекция первой компоненты (ПК 1 на рис. 3 г) соответствует St-волне, проекция второй (ПК 2) — S-волне и проекция третьей (ПК 3) — P-волне.

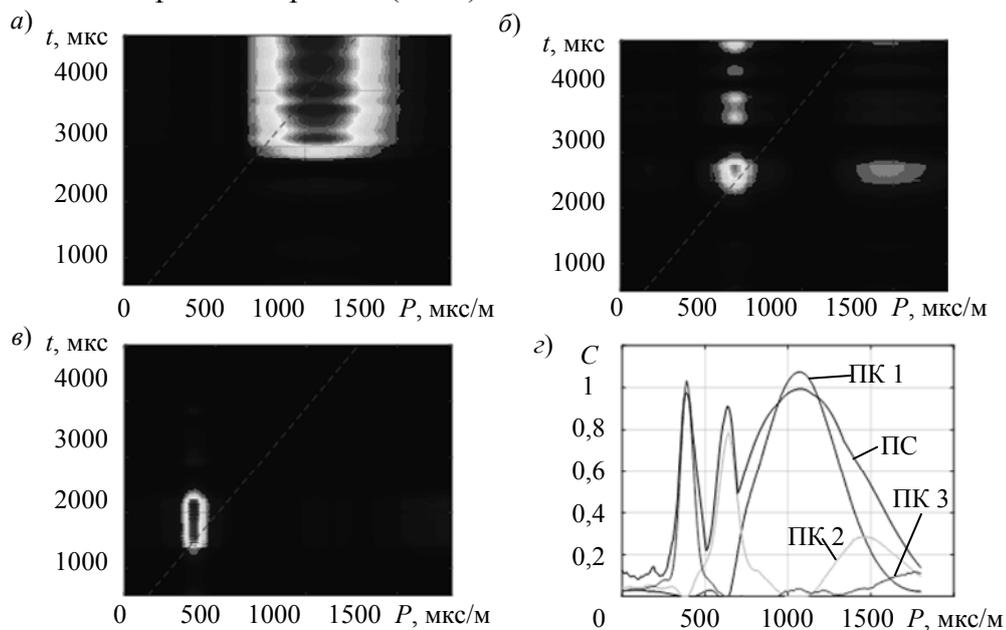


Рис. 3

На рис. 4 представлены проекции компонент по глубине, по максимумам которых предлагается выполнять раздельную трассировку интервальных времен составляющих волн.

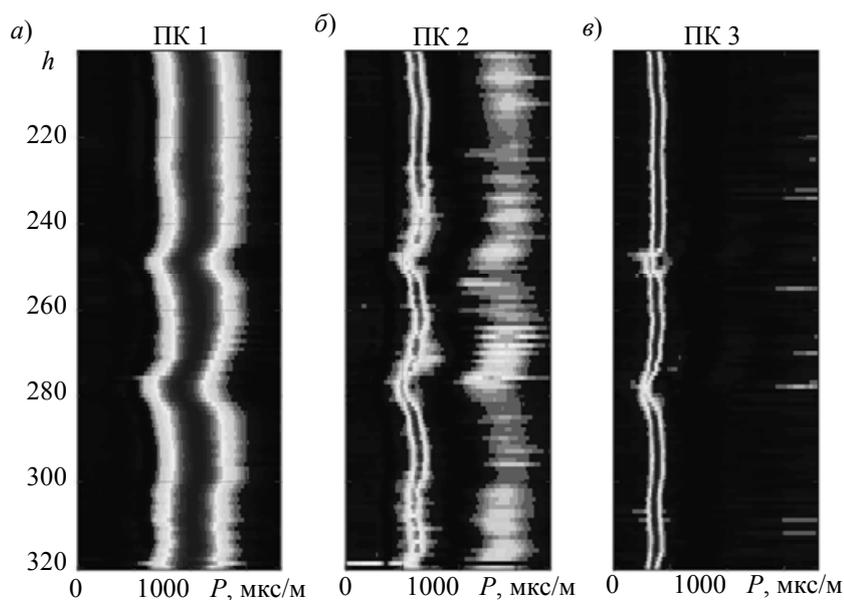


Рис. 4

Предложено два метода фильтрации значений матриц сембланса с регулярным шагом по τ и p для многоэлементных приборов ВАК. Исключение аляйсинга и последующее матричное разложение является эффективным средством нелинейной фильтрации помех. Ранг аппроксимирующей матрицы можно соотнести с количеством рассматриваемых составляющих волн. Раздельная трассировка компонент позволяет повысить качество и уровень автоматизации обработки ВАК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Neidell N. S., Taner M. T.* Semblance and other coherency measures for multichannel data // *Geophysics*. 1971. Vol. 36, N 3. P. 482—497.
2. *Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.* Сембланс — инструмент оценки скоростей составляющих пакета волнового акустического каротажа // *НТВ „Каротажник“*. 2016. № 8. С. 98—118.
3. *Kimball C. V., Marzetta T. L.* Semblance processing of borehole acoustic array data // *Geophysics*. 1984. Vol. 49, N 3. P. 274—281.
4. *Haldorsen J. B., Johnson D. L., Plona T., Sinha B., Valero H. P., Winkler K.* Borehole acoustic waves // *Oilfield Rev.* 2006. Vol. 18, N 1. P. 34—43.
5. *Flores-Mendez E., Carbajal-Romero M., Flores-Guzmán N., Sánchez-Martínez R., Rodríguez-Castellanos A.* Rayleigh's, Stoneley's, and Scholte's interface waves in elastic models using a boundary element method // *J. of Applied Mathematics*. 2012. Vol. 2012. Article ID 313207. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/313207>.
6. *Козяр В. Ф., Белоконь Д. В., Козяр Н. В., Смирнов Н. А.* Акустические исследования в нефтегазовых скважинах — состояние и направления развития // *НТВ „Каротажник“*. 1999. № 63. С. 47—56.
7. *Ursin B., Silva M. G., Porsani M. J.* Signal and travelttime parameter estimation using singular value decomposition // *Geophysics*. 2014. Vol. 79, N 5. P. U1—U14.
8. *Ventosa S., Simon C., Schimmel M.* Window length selection for optimum slowness resolution of the local-slant-stack transform // *Geophysics*. 2012. Vol. 77, N 2. P. V31—V40.
9. *Gan S., Wang S., Chen Y., Qu S., Zu S.* Velocity analysis of simultaneous-source data using high-resolution semblance — Coping with the strong noise // *Geophysical J. Intern.* 2015. Vol. 204, N 2. P. 768—779.
10. *Денисов М. С., Фиников Д. Б.* Способ подавления шумов дискретизации при суммировании сейсмических трасс // *Геофизика*. 2005. № 1. С. 12—16.
11. Pat. 7337068 USA. Global classification of sonic logs / *H. P. Valero, A. Brie, T. Endo*. 2008.

12. Marfurt K. J., Kirlin R. L., Farmer S. L., Bahorich M. S. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm // *Geophysics*. 1998. Vol. 63, N 4. P. 1150—1165.
13. Turner G. Aliasing in the tau-p transform and the removal of spatially aliased coherent noise // *Geophysics*. 1990. Vol. 55, N 11. P. 1496—1503.
14. Ávila-Carrera R., Spurlin J. H., Valle-Molina C. Simulating elastic wave propagation in boreholes: Fundamentals of seismic response and quantitative interpretation of well log data // *Geofísica internacional*. 2011. Vol. 50, N 1. P. 57—76.
15. Maroof S. I., Gravely C. J. Aliasing and τ -p // 54th SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstracts. 1984. P. 623—625.
16. Kumar R., Aravkin A. Y., Mansour H., Recht B., Herrmann F. J. Seismic data interpolation and denoising using svd-free low-rank matrix factorization // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. 2013.
17. Hsu K. Wave separation and feature extraction of acoustic well-logging waveforms using Karhunen-Loeve transformation // *Geophysics*. 1990. Vol. 55, N 2. P. 176—184.
18. Ахметсафин Р. Д. Применение разложения Карунена-Лоэва для фильтрации меры когерентности многоканальных записей акустического каротажа // *Геофизика*. 2015. № 1. С. 78—81.
19. Berry M. W., Browne M., Langville A. N., Pauca V. P., Plemmons R. J. Algorithms and applications for approximate nonnegative matrix factorization // *Computational statistics & data analysis*. 2007. Vol. 52, N 1. P. 155—173.
20. Lee D. D., Seung H. S. Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization // *Nature*. 1999. Vol. 401, N 6755. P. 788—791.

Сведения об авторах

Раис Дахиевич Ахметсафин

— д-р техн. наук, доцент; Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым, департамент цифровых технологий в индустрии; главный инженер проектов; E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru

Римма Закиевна Ахметсафина

— канд. техн. наук, доцент; Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, департамент программной инженерии факультета компьютерных наук; E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Поступила в редакцию
13.11.18 г.

Ссылка для цитирования: Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З. Фильтрация сембланса при обработке записей волнового акустического каротажа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 6. С. 503—510.

SEMBLANCE FILTERING IN PROCESSING OF WAVE ACOUSTIC LOGGING RECORDS

R. D. Akhmetsafin¹, R. Z. Akhmetsafina²

¹MIPT Center for Engineering and Technology,
141700, Dolgoprudnyy, Moscow region, Russia
E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru

²National Research University Higher School of Economics,
101000, Moscow, Russia
E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Semblance or slowness-time coherence is a measure of the coherence of energy distribution between recorded signals at antenna array receivers of acoustic wave logging probe in the coordinates "the reduced time of the wave path from the middle of the antenna array" — "interval time". Several semblance filtering methods are proposed to allow for elimination of the effect of aliasing and to separate the wave packet components.

Keywords: multi-element acoustic wave logging, semblance, aliasing, suppression filter, singular value decomposition, non-negative matrix decomposition

REFERENCES

1. Neidell N.S., Taner M.T. *Geophysics*, 1971, no. 3(36), pp. 482–497.
2. Akhmetasafin R.D., Akhmetasafina R.Z. *Science and technology bulletin "Karotazhnik"*, 2016, no. 8, pp. 98–118. (in Russ.)
3. Kimball C.V., Marzetta T.L. *Geophysics*, 1984, no. 3(49), pp. 274–281.
4. Haldorsen J.B., Johnson D. L., Plona T., Sinha B., Valero H.P., Winkler K. *Oilfield Rev.*, 2006, no. 1(18), pp. 34–43.
5. Flores-Mendez E., Carbajal-Romero M., Flores-Guzmán N., Sánchez-Martínez R., Rodríguez-Castellanos A. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, vol. 2012, Article ID 313207, <http://dx.doi.org/10.1155/2012/313207>.
6. Kozyar V.F., Belokon' D.V., Kozyar N.V., Smirnov N.A. *Science and technology bulletin "Karotazhnik"*, 1999, no. 63, pp. 47–56.
7. Ursin B., Silva M.G., Porsani M.J. *Geophysics*, 2014, no. 5(79), pp. U1–U14.
8. Ventosa S., Simon C., Schimmel M. *Geophysics*, 2012, no. 2(77), pp. V31–V40.
9. Gan S., Wang S., Chen Y., Qu S., Zu S. *Geophysical Journal International*, 2015, no. 2(204), pp. 768–779.
10. Denisov M.S., Finikov D.B. *Russian Geophysics*, 2005, no. 1, pp. 12–16. (in Russ.)
11. Patent 7337068 USA. *Global classification of sonic logs* / H. P. Valero, A. Brie, T. Endo, 2008.
12. Marfurt K.J., Kirilin R.L., Farmer S.L., Bahorich M.S. *Geophysics*, 1998, no. 4(63), pp. 1150–1165.
13. Turner G. *Geophysics*, 1990, no. 11(55), pp. 1496–1503.
14. Ávila-Carrera R., Spurlin J.H., Valle-Molina C. *Geofísica internacional*, 2011, no. 1(50), pp. 57–76.
15. Maroof S.I., Gravely C.J. *54th SEG Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 1984, P. 623–625.
16. Kumar R., Aravkin A.Y., Mansour H., Recht B., Herrmann F.J. *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*, 2013.
17. Hsu K. *Geophysics*, 1990, no. 2(55), pp. 176–184.
18. Akhmetasafin R.D. *Russian Geophysics*, 2015, no. 1, pp. 78–81. (in Russ.)
19. Berry M.W., Browne M., Langville A.N., Pauca V.P., Plemmons R.J. *Computational statistics & data analysis*, 2007, no. 1(52), pp. 155–173.
20. Lee D.D., Seung H.S. *Nature*, 1999, no. 6755(401), pp. 788–791.

Data on authors

- Rais D. Akhmetasafin** — Dr. Sci., Associate Professor; MIPT Center for Engineering and Technology, Department of Digital Technologies in Industry; Chief Project Engineer; E-mail: akhmetasafin.rd@cet-mipt.ru
- Rimma Z. Akhmetasafina** — PhD, Associate Professor; National Research University Higher School of Economics, Faculty of Computer Science, School of Software Engineering; E-mail: rakhmetasafina@hse.ru

For citation: Akhmetasafin R. D., Akhmetasafina R. Z. Semblance filtering in processing of wave acoustic logging records. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 6. P. 503–510 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-503-510