

УДК 004.021
DOI: 10.25559/SITITO.17.202104.838-846

Научная статья

Оценка эффективности последовательного комплексирования сигналов

А. В. Горин

Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова», г. Тула, Российская Федерация

Адрес: 300001, Российская Федерация, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 59
tongornani@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрено моделирование и оценка эффективности последовательного комплексирования сигналов неравноточных информационных систем, измеряющих истинный сигнал. Сигналы информационных систем моделировались как гармонический сигнал с аддитивным гауссовым шумом, а сам процесс моделирования как последовательность операций: генерация истинного сигнала, измерение его информационной системой, получение от информационной системы сигналов, которые поступают на первый блок комплексирования, и оптимальное комплексирование во втором блоке. Первый блок комплексирования представляет собой алгоритм вычисления весов сигналов информационных систем, которые учитывают и как само качество сигналов (точность измерения истинного сигнала), так и качество самих информационных систем, что обусловлено изначальной неравной точностью последних. Второй блок комплексирования является оптимальным алгоритмом обработки взвешенных в первом блоке сигналов, использующим метод наименьших квадратов для получения итогового комплексированного сигнала. Поскольку процесс измерения величины носит статистический характер, для оценки эффективности было проведено моделирование 1000 реализаций измерения. Моделирование показало эффективность предлагаемого подхода: если точность комплексированного сигнала после первого блока колеблется около 30%, то выигрыш от использования еще и оптимального комплексирования позволяет повысить выигрыш в среднем до 82.

Ключевые слова: комплексирование, последовательное комплексирование, информационная система, нечеткая логика

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Горин А. В. Оценка эффективности последовательного комплексирования сигналов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17, № 4. С. 838-846. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.838-846>

© Горин А. В., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Effectiveness Evaluation of Signals Consecutive Fusion

A. V. Gorin

KBP Instrument Design Bureau, Tula, Russian Federation

Address: 59 Shcheglovskaya Zaseka St., Tula 300001, Russian Federation

tongornani@mail.ru

Abstract

The article deals with modeling and evaluating the effectiveness of sequential integration of signals from unequal information systems that measure the true signal. The signals of information systems were modeled as a harmonic signal with additive Gaussian noise, and the modeling process itself as a sequence of operations: generating a true signal, measuring it by an information system, receiving signals from the information system that go to the first fusion block, and optimal integration in the second fusion block. The first fusion block is an algorithm for calculating the weights of information systems signals, which take into account both the signal quality itself (the accuracy of measuring the true signal) and the quality of the information systems themselves, which is due to the initial unequal accuracy of the latter. The second fusion block is an optimal algorithm for processing the signals weighted in the first block, using the least squares method to obtain the total signal fusion. Since the process of measuring a quantity is of a statistical nature, 1000 realizations of measurement were simulated to evaluate the effectiveness. Modeling has shown the effectiveness of the proposed approach: if the accuracy of the fused signal after the first block fluctuates about 30%, then the gain from using also the optimal fusion allows increasing the gain on average to 82.

Keywords: fusion, information systems, fuzzy logic, consecutive fusion

The author declares no conflict of interest.

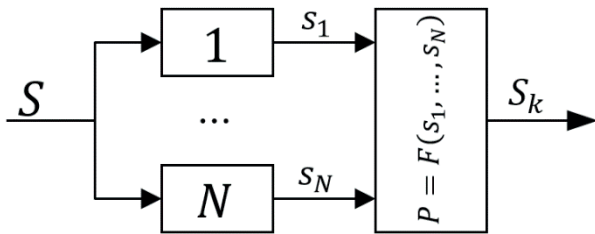
For citation: Gorin A.V. Effectiveness Evaluation of Signals Consecutive Fusion. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(4):838-846. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.838-846>



Введение

Общая постановка задачи. Посредством двух или более информационных систем (ИС) получают сигнал об объекте наблюдения. В общем случае параметры ИС не равны, т. е. сигналы от каждой из ИС количественно отличаются, например, по уровню точности. Необходимо найти такое преобразование сигналов, которые бы на основе имеющейся структурной избыточности давало более точную оценку истинного сигнала, чем каждая из ИС по отдельности.

Пусть полезный сигнал S измеряется N ИС, имеющими ошибки измерения $\eta_i, i = \overline{1, N}$. Необходимо найти такое преобразование P функционала $F(s_1, \dots, s_N)$ (рисунок 1), которое давало бы минимум ошибки измерения (приближало бы сигнал S_k , получаемый в результате обработки сигналов ИС, к истинному сигналу S).



Р и с. 1. Общая схема комплексирования: S – измеряемый полезный сигнал; i, N – информационные системы, измеряющие полезный сигнал; s_1, \dots, s_N – сигналы от информационных систем; P – преобразование сигналов ИС; S_k – комплексированный сигнал

F i g. 1. General scheme of complexing: S – measured useful signal; i, N – information systems measuring the useful signal; s_1, \dots, s_N – signals from information systems; P – signal conversion IS; S_k – complexed signal

Представим сигнал от каждой ИС в виде

$$S_i = S + \eta_i, \quad (1)$$

где S – полезный сигнал; S_i – сигнал от i -ой ИС; η_i – ошибка измерения полезного сигнала i -ой ИС.

Тогда задачу минимизации ошибки измерения можно записать как:

$$M[(P - S)^2] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где M – оператор математического ожидания.

Выбор оптимального решения осложнен тем, что на практике довольно сложно точно формализовать разграничение ИС по точности выделения ими полезного сигнала. В работах [1, 2] обсуждался подход, основанный на применении нечеткой логики для вычисления весовых коэффициентов сигналов ИС, что, в свою очередь, напрямую определяет также и качество самих ИС. С помощью статистических экспериментов было показано, что эффективность такой обработки составляет 20-30%.

В статье приводится продолжение работ [1-10], которое заключается в использовании двух последовательных комплексирований: первое – квазиоптимальное (нечеткая логика) используется, как отмечено выше, для расчета весовых коэффициентов сигналов, что позволяет подавлять ИС, сигналы

которых выходят за допустимые пороговые значения; второе – оптимальное, основано на предположении, что шумовая составляющая сигналов распределена по нормальному закону ($\eta = \mathbb{N}(\mu, \sigma)$).

Для векторов, распределенных по нормальному закону наилучшей оценкой будет оценка, полученная по методу наименьших квадратов (МНК) [11-25]. Обозначим через ω_i весовые коэффициенты, тогда сумма квадратов отклонений измерений от расчетных значений можно представить как

$$\hat{P}(\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_n) = \sum_{i=1}^N \omega_i \left(h_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \hat{x}_j \right)^2,$$

где \hat{s}_i – сигналы, полученные после первого комплексирования.

Найдем значения неизвестных из условия минимума функционала $\hat{P}(\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_n)$.

Минимум можно получить, приравняв нулю частные производные

$$\frac{\partial F(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n)}{\partial \hat{x}_k} = 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

Полученные при решении системы уравнений (3) значения неизвестных являются оценками МНК.

Таким образом, для получения этих оценок необходимо совместно решить уравнения

$$\sum_{i=1}^N \omega_i \left(h_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \hat{x}_j \right) = 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

Для дальнейшего вывода систему уравнений (3) удобно представить в развернутом виде:

$$\begin{cases} \hat{x}_1 \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i2} a_{i1} + \hat{x}_2 \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i2} a_{i2} + \dots + \hat{x}_n \sum_{i=1}^N \omega_i a_{21} a_{in} = \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i2} h_i; \\ \hat{x}_1 \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i1} a_{i1} + \hat{x}_2 \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i1} a_{i2} + \dots + \hat{x}_n \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i1} a_{in} = \sum_{i=1}^N \omega_i a_{i1} h_i; \\ \dots \\ \hat{x}_1 \sum_{i=1}^N \omega_i a_{in} a_{i1} + \hat{x}_2 \sum_{i=1}^N \omega_i a_{in} a_{i2} + \dots + \hat{x}_n \sum_{i=1}^N \omega_i a_{in} a_{in} = \sum_{i=1}^N \omega_i a_{in} h_i. \end{cases} \quad (5)$$

Введем векторы и матрицы:

$$\hat{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{X}}_{n1} = \begin{Bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \dots \\ \hat{x}_n \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{n1} = \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_{n1} = \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{Bmatrix};$$

$$\delta \mathbf{H} = \delta \mathbf{H}_{n1} = \begin{Bmatrix} \delta h_1 \\ \delta h_2 \\ \dots \\ \delta h_n \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{Nn} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{Nn} \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_{NN} = \begin{Bmatrix} \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_N \end{Bmatrix}.$$

С учетом введенных обозначений система уравнений (5) примет вид:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{X}}; \quad \mathbf{H} = \mathbf{Z} + \delta \mathbf{H}; \\ \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{H}.$$



Выразим вектор искомых параметров, для этого введем вектор невязок
 $\nabla = H - A\hat{X}$,

и представим функционал $\hat{P}(\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_n)$ в виде
 $F(\hat{X}) = \nabla^T W \nabla$, (3)

Из (6) следует, что минимизация функционала тождественна минимизации квадратичной формы (5).

Введем обозначения
 $B = A^T W A$; $C = A^T W H$.

С учетом этих обозначений перепишем систему:
 $B\hat{X} = C$

где B – матрица Грамма для системы векторов-строк или векторов столбцов матрицы A , а C – матрица свободных членов этих уравнений.

Умножим левую и правую части уравнения на B^{-1} и получим:
 $\hat{X} = B^{-1} C$,
 $\hat{X} = (A^T W A)^{-1} A^T W H$

Методика эксперимента

Так как процесс измерения истинного сигнала носит случайный характер, для оценки эффективности было проведено моделирование 1000 реализаций. Общая схема моделирования представлена на рисунке 2:



Р и с. 2. Общая схема последовательного комплексирования, где Источник – источник N-мерного истинного сигнала, ИС – блок информационных систем, АК1 – блок первого комплексирования, АК2 – блок второго комплексирования

Fig. 2. The general scheme of sequential complexing, where «Источник» is the source of the N-dimensional true signal, ИС is the block of information systems, АК1 is the block of the first complexing, АК2 is the block of the second complexing

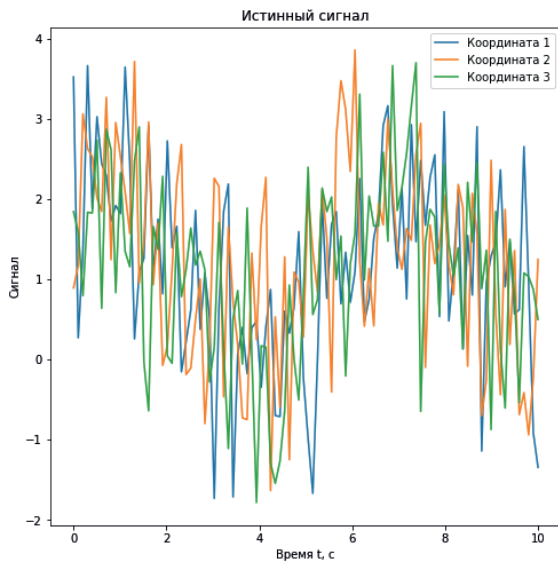
В соответствии с рисунком 2 сначала первый блок (источник) генерирует N-мерный вектор истинного сигнала S , после чего сигнал измеряется N ИС. Каждая ИС проводит K измерений S , которые интерпретируются как время. Из ИС на блок первого комплексирования АК1 поступают сигналы S_i . После АК1 взвешенные сигналы поступают на блок второго комплексирования АК2. В качестве истинного сигнала использовался гармонический сигнал $A \sin(\omega t + \varphi)$

Результаты

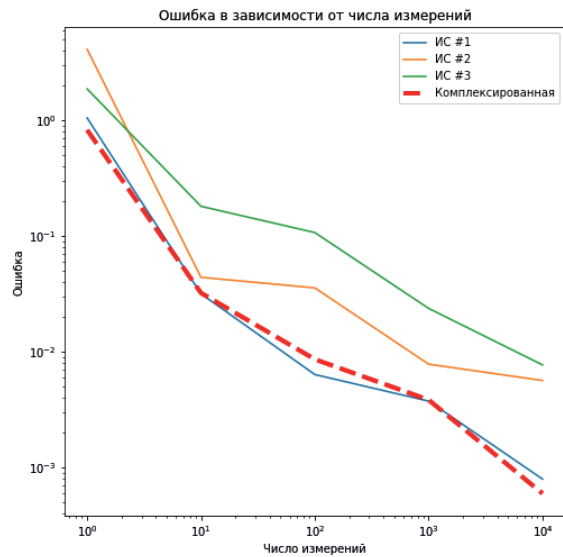
Для первого и второго случаев в таблицах 1 и 2 и на рисунках 3 и 4 приведены исходные данные и результаты моделирования соответственно.

Таблица 1. Параметры сигналов, использованных при моделировании сигналов в АК1
 Table 1. Parameters of signals used in modeling signals in АК1

Сигнал	Параметры сигнала				Параметры шума	
	Амплитуда, A	Частота, ω	Начальная фаза, φ	Дисперсия ошибки ИС, s	μ	σ
S_1	1,0	1,0	$\pi/4$	0,1	1,0	1,0
S_2	1,0	1,0	$\pi/4$	0,1	1,0	1,0
S_3	1,0	1,0	$\pi/4$	0,1	1,0	1,0

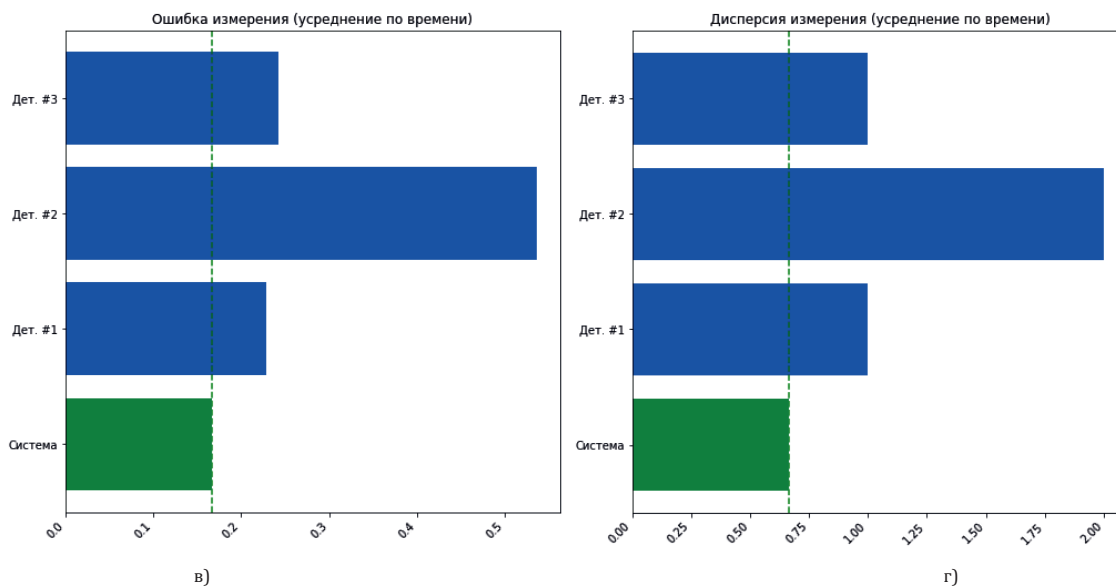


а)



б)





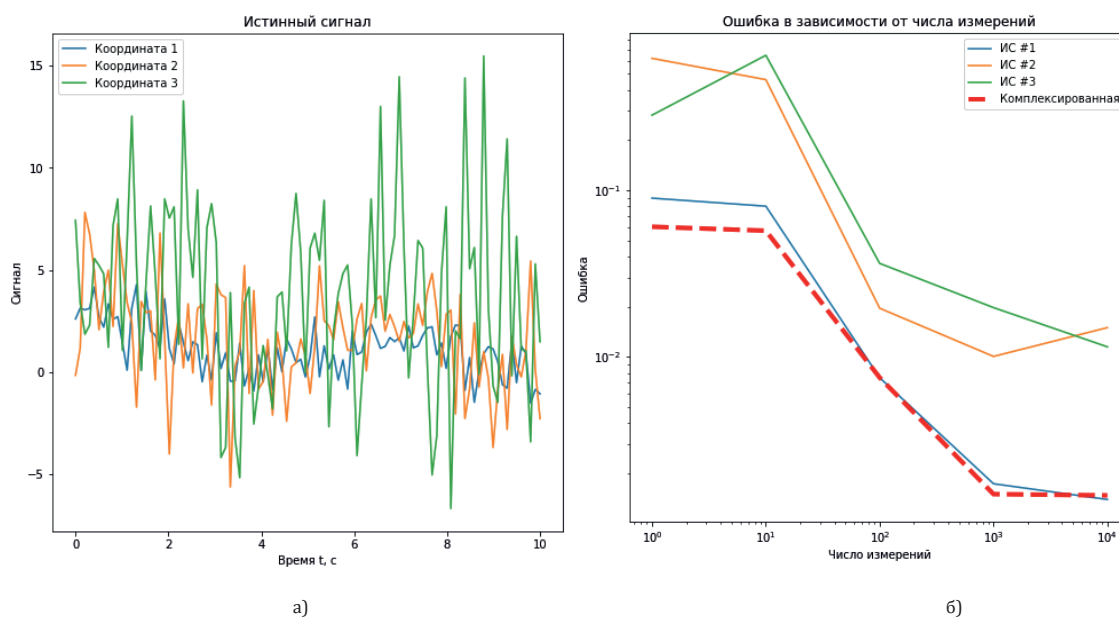
Р и с. 3. а) случайная реализация смеси полезного сигнала и шума б) зависимость ошибки от числа измерений в) ошибка измерения, усредненная по времени г) дисперсия измерения, усредненная по времени

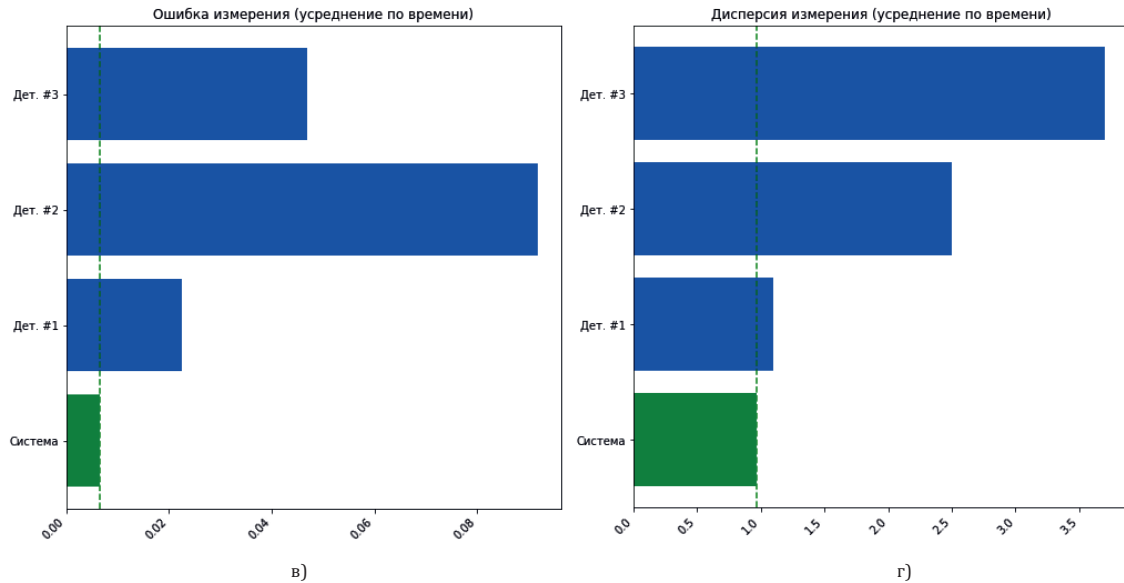
Fig. 3. а) random implementation of a mixture of useful signal and noise б) dependence of the error on the measurements number в) time-averaged measurement error г) time-averaged measurement variance

Т а б л и ц а 2. Параметры сигналов, использованных при моделировании сигналов в АК2

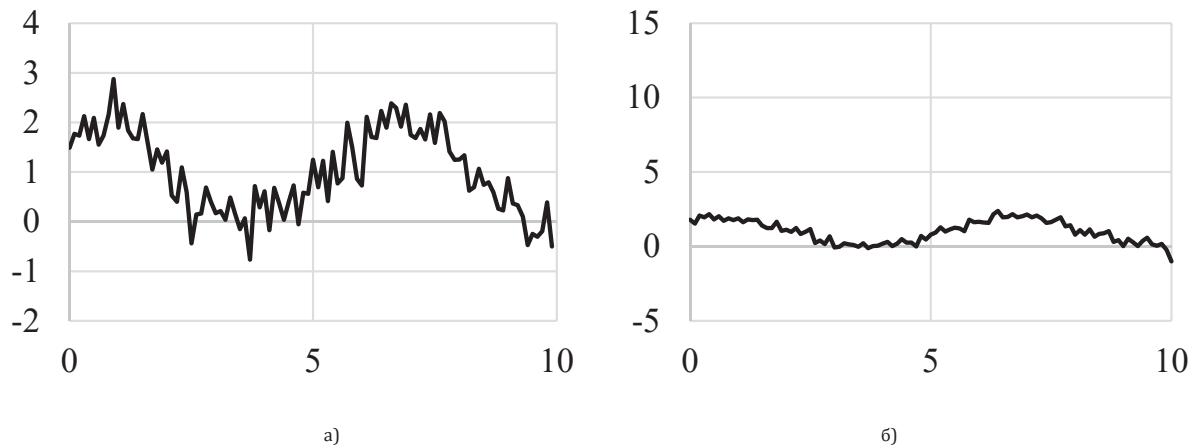
Table 2. Parameters of signals used in modeling signals in AK2

Сигнал	Параметры сигнала				Параметры шума	
	Амплитуда, А	Частота, ω	Начальная фаза, φ	Дисперсия ошибки ИС, s	μ	σ
S_1	1,00	1,25	$\pi/4$	1,1	1,0	1,0
S_2	2,00	1,50	$\pi/4$	2,5	2,0	2,5
S_3	3,00	1,75	$\pi/4$	3,7	4,0	5,0





Р и с. 4. а) случайная реализация смеси полезного сигнала и шума б) зависимость ошибки от числа измерений в) ошибка измерения, усредненная по времени г) дисперсия измерения, усредненная по времени
F i g. 4. а) random implementation of a mixture of useful signal and noise б) dependence of the error on the measurements number в) time-averaged measurement error г) time-averaged measurement variance



Р и с. 5. Комплексированные сигналы после обработки в а) АК1 и в б) АК2
F i g. 5. Complexed signals after processing in а) AK1 and in б) AK2

Анализ реализаций последовательного комплексирования показал, что в среднем выигрыш колеблется между 65,07 и 88,40%, среднее значение выигрыша по 1000 реализаций составляет 82,37%.

Выводы

В статье рассмотрено последовательное комплексирование сигналов от ИС, которые имеет разную точность измерения истинного сигнала. В качестве первого комплексирования использовался подход, описанный в работах [1-4]: с помощью

нечеткой логики, которая позволяет задать приоритет и качество ИС, вычисляются весовые коэффициенты сигналов ИС. После того как с помощью весовых коэффициентов подавлены менее информативные сигналы, следует обработка в блоке, осуществляющий оптимальное (исходя из предположения о нормальности) комплексирование (метод МНК). Для оценки эффективности было проведено моделирование, которое показало, что за счет последовательного комплексирования можно получить существенный выигрыш, среднее значение которого колеблется около 82%, а размах от 65,07% и 88,40%.



Список использованных источников

- [1] Понятский В. М., Горин А. В. Задание режимов работы и весов измерителей при комплексировании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 4. С. 272-276. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38187536> (дата обращения: 26.08.2021).
- [2] Понятский В. М., Горин А. В. Определение структуры информационной системы на основе использования нечеткой логики // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 645-653. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.15.201903.645-653>
- [3] Понятский В. М., Горин А. В. Комплексирование сигналов от неравноточных информационных систем с помощью нечеткой логики // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7, № 3. С. 25-31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37112821> (дата обращения: 26.08.2021).
- [4] Понятский В. М., Горин А. В. Выбор режима работы при комплексировании информационных систем на основе нечеткой логики // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 2445-2450. doi: <https://doi.org/10.25728/vspu.2019.2445>
- [5] Повышение точности измерения параметров объектов на изображениях на основе алгоритмического комплексирования / С. Л. Погорельский, В. М. Понятский, Е. А. Макарецкий [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 12-2. С. 147-154. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27471905> (дата обращения: 26.08.2021).
- [6] Егоров Д. Б., Макарецкий Е. А., Понятский В. М. Выделение пересекающихся траекторий объектов по последовательности видеок кадров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 6-2. С. 200-205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21436516> (дата обращения: 26.08.2021).
- [7] Комплекс для исследования обработки видеоинформации / С. Л. Погорельский [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 12-2. С. 135-147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27471903> (дата обращения: 26.08.2021).
- [8] Макарецкий Е. А., Еремин Н. Н., Понятский В. М. Метод повышения эффективности сегментации в системе слежения за транспортными потоками // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2010. Курск: ЮЗГУ, 2010. С. 39-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27725926> (дата обращения: 26.08.2021).
- [9] Галантэ А. И., Понятский В. М., Макарецкий Е. А. Особенности проектирования алгоритмов обработки изображений в телевизионных измерительных системах // Моделирование авиационных систем. М.: ГосНИИАС, 2011. С. 121-127. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21000524> (дата обращения: 26.08.2021).
- [10] Погорельский С. Л., Чинарёв А. В., Семикозов А. М. Комплексный подход к улучшению изображений комбинированных телетелевизионных приборов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 7. С. 291-296. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18940853> (дата обращения: 26.08.2021).
- [11] Зайцев Д. А., Сарбей В. Г., Слепцов А. Синтез функций непрерывнозначной логики, заданных в табличной форме // Кибернетика и системный анализ. 1998. № 2. С. 42-49.
- [12] Babuška R. Fuzzy Modeling for Control // International Series in Intelligent Technologies. Springer Dordrecht, 1998. Vol. 12. 260 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4868-9>
- [13] Filo G. Modelling of fuzzy logic control system using the MATLAB SIMULINK program // Technical Transactions. Mechanics. 2010. Vol. 2, issue 8. P. 73-81. URL: <https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/resources/32840> (дата обращения: 26.08.2021).
- [14] Kovacic Z., Faulkner L., Bogdan S. Fuzzy Controller Design: Theory and Applications. 1st ed. USA, CRC Press, 2005. 416 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420026504>
- [15] Бухалев В. А. Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 2013. 188 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24056531> (дата обращения: 26.08.2021).
- [16] Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. 1. 8-е изд. М.: Физматлит, 2003. 679 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19442791> (дата обращения: 26.08.2021).
- [17] Buckley J. J., Eslami E. An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets // Advances in Intelligent and Soft Computing. Vol. 13. Physica Heidelberg, 2002. 285 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1799-7>
- [18] Běhounek L., Cintula P. Fuzzy logics as the logics of chains // Fuzzy Sets and Systems. 2006. Vol. 157, issue 5. P. 604-610. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.10.005>
- [19] Dadios E. P. Fuzzy Logic – Algorithms, Techniques and Implementations. London: IntechOpen, 2012. 296 p. doi: <https://doi.org/10.5772/2663>
- [20] Nguyen H., Wu B. Fundamentals of Statistics with Fuzzy Data // Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 198. Springer Berlin, Heidelberg, 2006. 196 p. doi: <https://doi.org/10.1007/11353492>
- [21] McNeill F. M., Thro E. Fuzzy Logic: A Practical Approach. Academic Press, 1994. 1st ed. 309 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-11164-6>
- [22] Chen G., Pham T. T. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. USA: CRC Press, 2019. 328 p.
- [23] Jin Ya. Advanced Fuzzy Systems Design and Applications // Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 112. Warsaw: Springer Physica-Verlag, 2003. 272 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1771-3>



- [24] Buckley J. Simulating Fuzzy Systems // Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 171. Warsaw: Springer, 2005. 208 p. doi: <https://doi.org/10.1007/b100371>
- [25] Viertl R. Statistical Methods for Fuzzy Data. New Delhi: John Wiley & Sons, 2011. 270 p. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470974414>

Поступила 26.08.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 25.11.2021.

Об авторе:

Горин Антон Валерьевич, ведущий инженер-исследователь, Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова» (300001, Российская Федерация, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 59), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1110-0002>, tongornani@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Ponyatsky V.M., Gorin A.V. A determination for mode of operations and for weight coefficients by fusing. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* = News of the Tula state university. Technical sciences. 2019; (4):272-276. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38187536> (accessed 26.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Ponyatsky V.M., Gorin A.V. Determining the Structure of the Information System based on the Use of Fuzzy Logic. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(3):645-653. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.15.201903.645-653>
- [3] Ponyatsky V.M., Gorin A.V. Signal fusing of unequal accuracy information system based on fuzzy logic. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(3):25-31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37112821> (accessed 26.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [4] Ponyatsky V.M., Gorin A.V. *Vybor rezhima raboty pri kompleksirovanii informacionnyh sistem na osnove nechetkoj logiki* [Choosing a mode of operation when fusing information systems based on fuzzy logic]. *XIII All-Russia Control Conference (VSPU-2019)*. IPU RAS, Moscow; 2019. p. 2445-2450. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25728/vspu.2019.2445>
- [5] Pogorelsky S.L., Ponyatsky V.M., Makaretsky E.A., Gublin A.S., Ovchiinikov A.V. Enhance the accuracy parameters of the object in the image, based on algorithmic complex information processing. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* = News of the Tula state university. Technical sciences. 2016; (12-2):147-154. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27471905> (accessed 26.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [6] Egorov D.B., Makaretsky E.A., Ponyatskiy V.M. The definition of crossing trajectories in sequence video frames. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* = News of the Tula state university. Technical sciences. 2013; (6-2):200-205. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21436516> (accessed 26.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Pogorelsky S.L., Ponyatsky V.M., Egorov D.B., Makaretsky E.A., Ovchinnikov A.V., Gublin A.S. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* = News of the Tula state university. Technical sciences. 2016; (12-2):135-147. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27471903> (accessed 26.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Makaretsky E.A., Eremin N.N., Ponyatsky V.M. *Metod povysheniya jeffektivnosti segmentacii v sisteme slezhenija za transportnymi potokami* [A method of increase in efficiency of segmentation in the system of tracking traffic flows]. *Proceedings of the IX International conference "Recognition – 2010". Optical-electronic devices and devices in the systems of recognition of images, processing of images and symbolical information*. SWSU, Kursk; 2010. p. 39-41. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27725926> (accessed 26.08.2021). (In Russ.)
- [9] Galante A.I., Ponyatsky V.M., Makaretsky E.A. Features of design of algorithms of processing of images in television measuring systems. *Proceedings of the conference on Modelling of Aviation Systems*. GosNIIAS, Moscow; 2011. p. 121-127. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21000524> (accessed 26.08.2021). (In Russ.)
- [10] Pogorelski S.L., Chinaryov A.V., Semikozov A.M. A complex approach to image enhancement of television and infrared devices. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* = News of the Tula state university. Technical sciences. 2012; (7):291-296. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18940853> (accessed 26.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [11] Zaitsev D.A., Sarbei V.G., Sleptsov A.I. Synthesis of continuous-valued logic functions defined in tabular form. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1998; 34(2):190-195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/BF02742068>
- [12] Babuška R. Fuzzy Modeling for Control. *International Series in Intelligent Technologies*. Vol. 12. Springer Dordrecht; 1998. 260 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4868-9>
- [13] Filo G. Modelling of fuzzy logic control system using the MATLAB SIMULINK program. *Czasopismo Techniczne. Mechanika* = Technical Transactions. Mechanics. 2010; 2(8):73-81. Available at: <https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/resources/32840> (accessed 26.08.2021). (In Eng.)
- [14] Kovacic Z., Faulkner L., Bogdan S. Fuzzy Controller Design: Theory and Applications. 1st ed. USA, CRC Press; 2005. 416 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1201/9781420026504>



- [15] Bukhalyov V.A. *Optimal'noe sglazhivanie v sistemah so sluchajnoj skachkoobraznoj strukturoj* [Optimum smoothing in systems with accidental spasmodic structure]. Fizmatlit, Moscow; 2013. 188 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24056531> (accessed 26.08.2021). (In Russ.)
- [16] Fikhtengolts G.M. *Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischislenija* [Course of differential and integral calculus]. Vol. 1. 8th ed. Fizmatlit, Moscow; 2003. 679 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19442791> (accessed 26.08.2021). (In Russ.)
- [17] Buckley J.J., Eslami E. An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets. *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Vol. 13. Physica Heidelberg; 2002. 285 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1799-7>
- [18] Běhounek L., Cintula P. Fuzzy logics as the logics of chains. *Fuzzy Sets and Systems*. 2006; 157(5):604-610. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.10.005>
- [19] Dadios E.P. *Fuzzy Logic – Algorithms, Techniques and Implementations*. IntechOpen, London; 2012. 296 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.5772/2663>
- [20] Nguyen H., Wu B. Fundamentals of Statistics with Fuzzy Data. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Vol. 198. Springer Berlin, Heidelberg; 2006. 196 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/11353492>
- [21] McNeill F.M., Thro E. *Fuzzy Logic: A Practical Approach*. Academic Press; 1994. 1st ed. 309 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-11164-6>
- [22] Chen G., Pham T.T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. USA, CRC Press, 2019; 328 p. (In Eng.)
- [23] Jin Ya. *Advanced Fuzzy Systems Design and Applications*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Vol. 112. Springer Physica-Verlag, Warsaw; 2003. 272 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1771-3>
- [24] Buckley J. *Simulating Fuzzy Systems*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Vol. 171. Springer, Warsaw; 2005. 208 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/b100371>
- [25] Viertl R. *Statistical Methods for Fuzzy Data*. John Wiley & Sons, New Delhi; 2011. 270 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1002/9780470974414>

Submitted 26.08.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 25.11.2021.

About the author:

Anton V. Gorin, Lead Research Engineer, KBP Instrument Design Bureau (59 Shcheglovskaya Zaseka St., Tula 300001, Russian Federation),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1110-0002>, tongornani@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

