

УДК 621.396.1

## МЕТОД ГЛАВНЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ КОМПОНЕНТ В ЗАДАЧАХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ (СИСТЕМАТИЗИРОВАННЫЙ ОБЗОР)

А. Я. КАЛЮЖНЫЙ

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы, 37*

**Аннотация.** Представлен метод Главных Информативных Компонент PIS (Principal Informative Components) для задач статистических измерений, в которых подлежащий измерению сигнал непосредственно не наблюдается. К таким случаям относятся восстановление изображений, идентификация систем, обращение каналов связи, томография сред и др. Общей особенностью таких задач является, как правило, неустойчивость их решений к малым изменениям исходных данных, что обычно требует привлечения специальных методов регуляризации. Суть метода PIS состоит в использовании декомпозиции сигналов в специальных базисах, сформированных из собственных векторов информационного оператора Фишера. Эти базисы родственны известному в статистике методу Главных Компонент PCA (Principal Components Analysis), однако имеют несколько иной смысл по сравнению с ним. В обзоре показано, что за счет специальных правил отбора координатных векторов, возможно, во-первых, гарантировать устойчивость оценки сигнала к непредсказуемым факторам задачи, во-вторых, обеспечить существенное снижение общей погрешности измерений по сравнению с «прямыми» оценками сигнала, т.е. без использования базисных представлений. Дано обоснование применения метода PIS для задач линейного и нелинейного оценивания. Также рассмотрена комбинированная методика оптимизации координатного базиса, которая сочетает преимущества физического подхода (наглядность, экономичность) с преимуществами статистико-информационного подхода (минимизация статистических погрешностей). Указанная методика основана на проектировании произвольного координатного базиса на подпространство PIS. В результате сокращается диапазон возможных флуктуаций оценки сигнала и понижается верхняя граница статистической ошибки его измерения. Даны некоторые численные оценки эффективности метода PIS на примере задачи акустической томографии среды, которые подтверждают общие теоретические выводы. Выполнен анализ некоторых информационных технологий, где идеи метода PIS имеют перспективы для практического внедрения. В частности, высказано предположение, что одной из таких перспективных областей могут быть MIMO системы, которые играют важную роль в системах беспроводного доступа 5G.

**Ключевые слова:** обратная статистическая задача; сигнальная декомпозиция; матрица Фишера; базис PIS; критерий наблюдаемости сигнала; проекционный оператор; MIMO система; 5G

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современной теории и технике цифровой обработки сигналов DSP (Digital Signal Processing) широко применяются декомпозиции сигналов вида:

$$s(\xi) = \sum_{k=1}^N \gamma_k \varphi_k(\xi), \quad (1)$$

где  $\{(\varphi_k(\xi))\}_{k=1}^N$  и  $\{\gamma_k\}_{k=1}^N$  — некоторые базисные функции и соответствующие им коэффициенты разложения,  $N$  — число членов декомпозиции.

DOI: [10.20535/S0021347019110013](https://doi.org/10.20535/S0021347019110013)  
© А. Я. Калюжный, 2019

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oppenheim, A. V.; Schaffer, R. W.; Buck, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed. NJ: Prentice Hall, 1999. 897 p. ISBN 0-13-754920-2.
2. Jolliffe, I. T. *Principal Component Analysis / Springer Series in Statistics*, 2nd ed. New York: Springer-Verlag Inc., 2010. 518 p. ISBN 0-387-95442-2.
3. Papoulis, A.; Pillai, S. P. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 861 p. ISBN 0-07-112256-7.
4. Aster, R. C.; Borchers, B.; Thurber, C. H. *Parameter Estimation and Inverse Problems*, 2nd ed. New York: Academic Press, 2012. 377 p. ISBN 978-0-12-385048-5.
5. Теребиж, В. Ю. *Введение в статистическую теорию обратных задач*. М.: Физматлит, 2005. 376 с. ISBN 5-9221-0562-0.
6. Теребиж, В. Ю. “Восстановление изображений при минимальной априорной информации,” *Успехи физических наук*, Т. 165, № 2, С. 143-176, 1995. DOI: [10.3367/UFNr.0165.199502b.0143](https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199502b.0143).
7. Калюжный, А. Я. “Алгебраизация задач акустической томографии среды с использованием главных информативных компонент,” *Акустичний вісник*, Т. 1, № 4, С. 19-32, 1998. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/894>.
8. Kalyuzhny, A. Y.; Krasny, L. G. “Method of the main informative components for acoustic tomography,” *J. Acoustical Soc. America*, Vol. 105, No. 2, p. 1178, 1999. DOI: [10.1121/1.425573](https://doi.org/10.1121/1.425573).
9. Kalyuzhny, A. Y.; Kovtonyuk, A. A. “Method of the principal informative components for reconstruction problems,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Process*, ICASSP-2000, 5-7 June 2000, Istanbul, Turkey. IEEE, 2000, Vol. 1, pp. 169-172. DOI: [10.1109/ICASSP.2000.861902](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2000.861902).
10. Kalyuzhny, A. Y.; Kovtonyuk, A. A. “Optimal algebraic coding of noisy and distorted images,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Information Technology: Coding and Computing*, ITCC-2001, 2-4 Apr. 2001, Las Vegas, USA. IEEE, 2001, p. 537-541. DOI: [10.1109/ITCC.2001.918852](https://doi.org/10.1109/ITCC.2001.918852).
11. Kalyuzhny, A. Y.; Kovtonyuk, A. A. “PIC-projection technique for decreasing of statistical error in signals reconstruction problems,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Process*, ICASSP-2001, 7-11 May 2001, Salt-Lake City, USA. IEEE, 2001, Vol. 6, p. 3917-3920. DOI: [10.1109/ICASSP.2001.940700](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2001.940700).
12. Kalyuzhny, A. Y.; Kovtonyuk, A. A. “Basis of the Principal Informative Components for signal estimation problems,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Process*, ICASSP-2002, 13-17 May 2002, Orlando, USA. IEEE, 2002, Vol. 1, p. 335-338. DOI: [10.1109/ICASSP.2002.5744937](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2002.5744937).
13. Zhao, L.; Zhao, H.; Zheng, K.; Xiang, W. *Massive MIMO in 5G Networks: Selected Applications / Springer-Briefs in Electrical and Computer Engineering*. Springer International Publishing AG, 2012. 106 p. ISBN 978-3-319-68408-6.
14. Molisch, A. F. *Wireless Communication*, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd., 2011. 884 p. ISBN 9780470666692.
15. Kay, S. M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. University of Rhode Island. NJ: Prentice Hall, 1998. 603 p. ISBN 0-13-345711-7.
16. Horn, R. A.; Johnson, C. R. *Matrix Analysis*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2013. 662 p. ISBN 9780521548236.
17. Kalman, R. E. *Contributions to the theory of optimal control*, Bol. Soc. Mat. Mexicana, Vol. 5, 1960, pp. 102-119.
18. Sage, A. P.; White, C. C. *Optimum System Control*. 2nd ed. NJ: Prentice-Hall, Inc., 1977. p. 392. ISBN 0-13-638296-7.
19. [https://oleksa-site.blogspot.com/p/blog-page\\_11.html](https://oleksa-site.blogspot.com/p/blog-page_11.html).
20. Carmi, A. Y.; Mihaylova, L. S.; Godsill, S. J. *Compressed Sensing & Sparse Filtering*. Springer Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2014. 505 p. ISBN 978-3-642-38397-7.
21. Pfander, G. E. (ed.). *Sampling Theory, a Renaissance. Compressive Sensing and Other Developments*. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 532 p. ISBN 978-3-319-19748-7.
22. Andras, I.; Dolinsky, P.; Michaeli, L.; Saliga, J. “Sparse signal acquisition via compressed sensing and principal component analysis,” *Meas. Sci. Rev.*, Vol. 18, No. 5, p. 175-182, 2018. DOI: [10.1515/msr-2018-0025](https://doi.org/10.1515/msr-2018-0025).

Поступила в редакцию 04.06.2019

После доработки 28.10.2019

Принята к публикации 01.11.2019