

Восстановление формы сильно зашумленного сигнала на основе интегро-дифференциального преобразования и аппроксимации интегральной кривой

Р.Ю. Голиков^{1}, И.Р. Ляпина¹, И.А. Коростелкина^{1,2}, Ж.В. Мекшенева¹*

¹ *Университет «Синергия», Москва, Россия*

² *Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия*

* *rgolikov@yandex.ru*

Аннотация. В области цифровой обработки сигналов восстановление их формы при высоком уровне помеховой составляющей представляет собой одну из основных проблем. Ее актуальность обусловлена широким применением цифровых технологий, и особенно остро она стоит в тех сферах, где воздействие помех неизбежно влияет на качество регистрации, распознавания и интерпретации сигналов. Распространенной разновидностью помех естественного происхождения является тепловой шум, непосредственно связанный с работой измерительно-регистрирующей аппаратуры. Полностью избавиться от этого вида шума невозможно, однако современные методы цифровой обработки способны значительно снизить его негативное влияние. В настоящее время внимание исследователей всё больше направлено на разработку эвристических алгоритмов, которые представляют собой альтернативные способы подавления шумовой составляющей и сохранения формы полезного сигнала. Такие алгоритмы характеризуются способностью находить приближенные решения там, где традиционные аналитические и технические методы теряют свою эффективность. Они ориентированы на адаптацию к стохастическому характеру теплового шума и предлагают разумный компромисс между трудоемкостью и точностью воспроизведения полезного сигнала. Данная статья является продолжением ранее опубликованных исследований по разработке эвристических алгоритмов восстановления формы сильно зашумленных дискретных сигналов. Ее цель – предложить альтернативный подход к решению этой задачи, основанный на идее последовательного применения операций численного интегрирования и дифференцирования, объединенных процедурой аппроксимации интегральной кривой. В результате устраняется влияние шумовой компоненты, восстановленный сигнал сохраняет информационные компоненты полезного сигнала. Эффективность предложенного алгоритма определялась по тестовому сигналу с наложением искусственного шума, моделируемого при помощи компьютерной симуляции генератора псевдослучайных чисел. Полученные результаты сравнились с двумя ранее разработанными эвристическими алгоритмами: на основе кусочно-линейной аппроксимации методом наименьших квадратов и на основе усреднения мгновенных значений сигнала на участках разбиения. Анализ продемонстрировал, что разработанный алгоритм сравним по точности с этими алгоритмами, однако отличается большей эффективностью при обработке дискретных аperiodических сигналов с естественным зашумлением.

Ключевые слова: цифровая обработка, эвристический алгоритм, сигнал, шум, оцифровка, аппроксимация, интерполяция, точность, относительная погрешность, стохастический характер

Для цитирования: Голиков Р.Ю., Ляпина И.Р., Коростелкина И.А., Мекшенева Ж.В. Восстановление формы сильно зашумленного сигнала на основе интегро-дифференциального преобразования и аппроксимации интегральной кривой // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 6. С. 52–64. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-6-52-64

© Голиков Р.Ю., Ляпина И.Р., Коростелкина И.А., Мекшенева Ж.В., 2025.

Highly noisy signal waveform restoration based on integro-differential transform and integral curve approximation

R. Golikov^{1*}, I. Lyapina¹, I. Korostelkina^{1,2}, Zh. Meksheneva¹

¹Synergy University, Moscow, Russia

²Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

*rgolikov@yandex.ru

Abstract. In the field of digital signal processing, restoring their shape at a high level of noise component is one of the main problems. Its relevance is due to the widespread use of digital technologies and it becomes particularly acute in those areas where interference inevitably affects the registration quality, recognition, and signals interpretation. A common type of naturally occurring interference is thermal noise, which is directly related to the measuring operation and recording equipment. It is impossible to completely eliminate this noise kind, but modern digital processing methods are capable of significantly reducing its negative impact. Currently, researchers' attention is increasingly focused on developing heuristic algorithms that represent alternative ways of suppressing the noisy component while preserving the useful signal's form. These algorithms are characterized by their ability to find approximate solutions where traditional analytical and technical methods lose their effectiveness. They are aimed at adapting to the stochastic nature of thermal noise and offer a reasonable compromise between labor intensity and the useful signal reproduction accuracy. This article continues previous published research into the heuristic algorithms development for recovering the shape of heavily distorted discrete signals. The goal is to propose an alternative approach to solving this problem based on the sequential application idea of numerical integration and differentiation operations combined with integral curve approximation procedure. As a result, the noise component influence is eliminated, and the restored signal retains information components of the useful signal. The proposed algorithm efficiency was determined using a test signal superimposed with artificial noise simulated via computer simulation of a pseudo-random number generator. The results were compared with two previously developed heuristic algorithms: one based on piecewise linear approximation by least squares method and another based on averaging instantaneous values of the signal over partition intervals. Analysis demonstrated that the developed algorithm compares favorably in terms of accuracy with these algorithms, but differs in greater efficiency when processing discrete nonperiodic signals with natural noise contamination.

Keywords: digital processing, heuristic algorithm, signal, noise, digitization, approximation, interpolation, accuracy, relative error, stochastic nature

For citation: Golikov R., Lyapina I., Korostelkina I., Meksheneva Zh. Highly noisy signal waveform restoration based on integro-differential transform and integral curve approximation. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2025, vol.20, no.6, pp.52-64 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-6-52-64

© Golikov R., Lyapina I., Korostelkina I., Meksheneva Zh., 2025.

Введение

Восстановление формы сигналов является одной из ключевых проблем в области получения, обработки и анализа информации, особенно

когда речь идет о сигналах с крайне низким отношением «полезный сигнал – шум» (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Эта проблема приобретает всё большую актуальность в различных областях науки и техники, включая радиофизику, астро-