

Применение нейронных сетей для восстановления непрерывного представления сигнала по дискретным отсчетам, взятым в случайные моменты времени

А.Ю. Пучков^{1*}, М.В. Максимкин¹, Н.Н. Прокимнов², П.Н. Машегов²

¹Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия

²Университет «Синергия», Москва, Россия

*putchkov63@mail.ru

Аннотация. Цифровая обработка сигналов в составе киберфизических технологических систем основывается на алгоритмах, оперирующих информацией, представленной в дискретизированном виде как по уровню, так и по времени. В последнем случае предполагается постоянство интервала временного квантования как одного из постулируемых условий для применения алгоритмов. В то же время на практике такое постоянство обеспечивается далеко не всегда, что приводит к пропуску отдельных отсчетов или даже к случайному характеру дискретизации. Поэтому актуальной исследовательской задачей становится разработка методов и алгоритмов обработки сигналов в условиях случайной дискретизации, в частности для восстановления непрерывных сигналов по их дискретным отсчетам, взятым с нарушением требований теоремы Котельникова – Шеннона. Если интервал дискретизации непрерывного сигнала рассчитан с учетом ее требований (то есть, дискретизация проведена с частотой не ниже частоты Найквиста), то допускается его точное восстановление по дискретным отсчетам, в противном случае это невозможно. Однако и для этой ситуации существуют подходы к восстановлению непрерывных сигналов, которые учитывают дополнительную априорную информацию о природе сигнала. Часть таких подходов основана на сложном математическом аппарате, что делает их трудно применимыми и неуниверсальными, другая часть использует глубокие модели машинного обучения, затратные в плане вычислительных ресурсов и требовательные к объемам обучающих данных. В этих условиях предложен метод восстановления сигнала с ограниченным спектром по дискретным отсчетам, временной интервал между которыми случаен, а его математическое ожидание больше величины, определяемой теоремой Котельникова – Шеннона для регулярной дискретизации. Новизна результатов исследования заключается в предложенном методе и алгоритме восстановления непрерывного сигнала, а также в результатах анализа численного эксперимента, проведенного с программной моделью, выполненной в среде MatLab и реализующей разработанный алгоритм.

Ключевые слова: теорема Котельникова – Шеннона, случайная дискретизация сигналов, частота Найквиста, искусственные нейронные сети

Для цитирования: Пучков А.Ю., Максимкин М.В., Прокимнов Н.Н., Машегов П.Н. Применение нейронных сетей для восстановления непрерывного представления сигнала по дискретным отсчетам, взятым в случайные моменты времени // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 2. С. 97–111. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-97-111

Application of neural networks to reconstruct a continuous representation of a signal from discrete samples taken at random moments in time

A. Puchkov^{1*}, M. Maksimkin¹, N. Prokimnov², P. Mashegov²

¹Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

²Synergy University, Moscow, Russia

putchkov63@mail.ru

Abstract. Digital signal processing in cyber-physical technological systems is based on algorithms that operate with information presented in a discretized form both by level and by time. In the latter case, the constancy of the time quantization interval is assumed as one of the postulated conditions for the application of algorithms. At the same time, in practice, such constancy is not always ensured, which leads to the omission of individual samples or even to a random nature of the discretization. Therefore, an urgent research task is to develop methods and algorithms for signal processing under conditions of random discretization, in particular, for the restoration of continuous signals from their discrete samples taken with violation of the requirements of the Kotelnikov – Shannon theorem. If the discretization interval of a continuous signal is calculated taking into account its requirements (i. e. discretization is carried out with a frequency not lower than the Nyquist frequency), then its exact restoration from discrete samples is allowed, otherwise it is impossible. However, even for this situation, there are approaches to the restoration of continuous signals that take into account additional a priori information about the nature of the signal. Some of these approaches are based on complex mathematical apparatus, which makes them difficult to apply and not universal, while others use deep machine learning models that are expensive in terms of computational resources and demanding in terms of training data volumes. Under these conditions, a method is proposed for restoring a signal with a limited spectrum from discrete samples, the time interval between which is random, and its mathematical expectation is greater than the value determined by the Kotelnikov – Shannon theorem for regular discretization. The novelty of the research results lies in the proposed method and algorithm for restoring a continuous signal, as well as in the results of the analysis of a numerical experiment conducted with a software model executed in the MatLab environment and implementing the developed algorithm.

Keywords: Kotelnikov – Shannon theorem, random signal sampling, Nyquist frequency, artificial neural networks

For citation: Puchkov A., Maksimkin M., Prokimnov N., Mashegov P. Application of neural networks to reconstruct a continuous representation of a signal from discrete samples taken at random moments in time. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2025, vol.20, no.2, pp.97-111 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-97-111

Введение

Цифровые устройства, применяемые в системах мониторинга и управления технологическими процессами, обрабатывают сигналы, дискретизированные по времени и уровню. В ре-

зультате такой дискретизации образуются временные ряды, представляющие собой наборы пар {значение сигнала; момент времени измерения сигнала}. Выбор количества уровней дискретизации определяется требуемой точностью представ-