

Оптимизация сигналов для линейных каналов связи

В.В. Лебедев, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), профессор кафедры инфокоммуникационных сетей и систем, д.т.н.; lebv1951@mail.ru

В.М. Деревяшкин, СибГУТИ, доцент кафедры фотоники в телекоммуникациях, к.т.н.; dvm@sibguti.ru

УДК 621.396

DOI: 10.34832/ELSV.2026.77.3.007

Аннотация. В статье изложен метод расчета сигналов, распространяющихся по линейным каналам связи с минимальными энергетическими потерями и отвечающих требованиям заданных энергий и ортогональности на выходе канала связи, что важно для систем связи с параллельным способом передачи информации для устранения межканальных помех. Для удобства генерации в передатчике и обработки в приемнике средствами цифровой техники результат решения оптимизационной задачи получен в виде последовательности временных отсчетов синтезированных сигналов. Для иллюстрации метода оптимизации в статье приведен пример расчета ансамбля оптимальных сигналов для кабельной линии связи.

Ключевые слова: оптимизация сигналов, линейные каналы связи, матричная модель канала, скалярно-матричное дифференцирование, собственные числа и собственные векторы матрицы оператора канала.

Для цитирования: Лебедев, В.В. Оптимизация сигналов для линейных каналов связи / В.В. Лебедев, В.М. Деревяшкин // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 60–64.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития технологий, обусловленный новыми научными результатами и прогрессом в области микроэлектроники, открывает новые возможности для дальнейшего повышения эффективности средств связи.

Одним из важнейших направлений достижения этой цели является оптимизация сигналов и методов их приёма. Решение этих оптимизационных задач, по сути, относится к решению экстремальных задач, так как синтез сигналов и устройств их обработки в приёмниках заключается в определении экстремумов функционалов, характеризующих качество работы системы связи.

Развитию теории оптимизации сигналов и фильтров для их обработки посвящено немало работ, например [1–5].

В указанных работах для поиска экстремумов функционалов, характеризующих качество работы оптимизируемых систем, обычно используется математический аппарат функционального анализа, однако решения, получаемые при этом, не в полной мере адаптированы для реализации средствами цифровой обработки сигналов. В этой связи всё более привлекательными для решения оптимизационных задач становятся методы скалярно-матричного и матрично-матричного дифференцирования [6]. Решения, получаемые этими методами, имеют конструктивный вид и удобно реализуются цифровыми системами генерации и обработки сигналов [7].

Далее приведем решение задачи синтеза сигналов для линейных каналов связи с использованием скалярно-матричного дифференцирования. В качестве примера рассмотрим процедуру оптимизации сигналов для линии связи на базе металлического кабеля.

МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Для применения скалярно-матричного дифференцирования в задачах оптимизации сигналов необходима матричная модель канала связи [8]. Для её обоснования будем исходить из следующих предпосылок.

Каналы связи обычно являются разомкнутыми системами, поэтому их удобно описывать интегральными операторами, отображающими взаимосвязь между выходными и входными сигналами.

Наиболее общей формой интегрального оператора является нелинейный оператор Урысона [9].

Для рассматриваемых задач его можно записать в виде

$$S_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \int_{\tau} G[t, \tau, S_{\text{ВХ}}(t)] S_{\text{ВХ}}(t) dt,$$

где $S_{\text{ВХ}}(t)$ и $S_{\text{ВЫХ}}(\tau)$ — соответственно входной и выходной сигналы канала связи; $G(\cdot)$ — ядро оператора, зависящее как от свойств каналов, так и от входного сигнала.

В частном случае, когда ядро оператора не зависит от входного сигнала, нелинейный оператор Урысона выражается в форме оператора Фредгольма:

$$S_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \int_{\tau} G(t, \tau) S_{\text{ВХ}}(t) dt.$$

При разностном ядре этот оператор принимает вид интеграла свертки входного сигнала и импульсной реакции канала связи $g(t)$ [10]:

$$S_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \int_0^{\tau} S_{\text{ВХ}}(t) g(\tau - t) dt. \quad (1)$$

Этим оператором обычно описывают линейные каналы с постоянными параметрами [11], для которых далее будет описана процедура оптимизации сигналов.