

Исследование адаптивного алгоритма пространственного разнесения на основе машинного обучения

К.К. Фам, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), аспирант кафедры радиотехники; fam.kk@sut.ru

Е.И. Глушанков, СПбГУТ, профессор кафедры радиотехники, д.т.н.; glushankov.ei@sut.ru

УДК 621.396.4, 004.85

DOI: 10.34832/ELSV.2026.78.4.007

Аннотация. Разработан энергоэффективный алгоритм адаптивного выбора антенн для систем с оптимальным сложением (Maximal Ratio Combining, MRC) на основе нейросетевого классификатора. Для устранения высокой вычислительной сложности существующих методов применен подход имитационного обучения: сеть обучена на данных итерационного адаптивного алгоритма, определяющего минимально необходимое число активных антенн по заданному порогу коэффициента битовых ошибок. Результаты моделирования в различных условиях каналов с замираниями подтвердили, что нейросетевой алгоритм обеспечивает существенное снижение среднего числа задействованных антенн по сравнению с классическим MRC при сохранении требуемой помехоустойчивости, что делает предлагаемый алгоритм перспективным для систем связи с низкими задержками.

Ключевые слова: разнесенный прием, метод оптимального сложения, нейронная сеть, имитационное обучение, адаптивный алгоритм, энергоэффективность.

Для цитирования: Фам, К.К. Исследование адаптивного алгоритма пространственного разнесения на основе машинного обучения / К.К. Фам, Е.И. Глушанков // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 66-75.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы беспроводной связи требуют повышения энергетической и спектральной эффективности [1, 2]. Ключевую роль в решении этой задачи играют многоантенные технологии, охватывающие широкий класс систем, включая конфигурации с одним входом и множеством выходов (Single-Input-Multiple-Output, SIMO). В SIMO-системах методы приемного пространственного разнесения являются фундаментальным инструментом [3].

Для борьбы с замираниями в SIMO-системах применяются различные методы, такие как алгоритм автовыбора и сложение с равными весами. Однако теоретически доказано, что алгоритм оптимального сложения (Maximal Ratio Combining, MRC) является оптимальным линейным методом, обеспечивающим максимальное отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) на выходе сумматора [4]. Это, в свою очередь, приводит к наилучшей помехоустойчивости, характеризуемой минимальным коэффициентом битовых ошибок (Bit Error Rate, BER). Результат достигается путем когерентного сложения сигналов с N_R приёмных антенн с весовыми коэффициентами, пропорциональными параметрам канала.

Несмотря на теоретическую оптимальность, классический алгоритм MRC обладает фундаменталь-

ным недостатком: он по умолчанию предполагает использование всех N_R доступных приемных антенн. Такой подход неэнергоэффективен и приводит к избыточному энергопотреблению. В условиях высокого SNR требуемое качество обслуживания по BER может быть достигнуто с использованием меньшего числа антенн.

Для решения этой проблемы в ряде исследований были предложены алгоритмы выбора антенн [5]. Существующие методы можно разделить на две группы:

1. Методы выбора на основе оценки качества принимаемого сигнала: эти подходы определяют оптимальное подмножество антенн путем оценки сигнала непосредственно после сложения или декодирования (например, по максимуму выходного SNR или минимуму BER). Однако такие итерационные подходы требуют недопустимо высоких вычислительных затрат.

2. Методы выбора на основе состояния канала: эти методы позволяют избежать многократного декодирования, так как предполагают принятие решения на основе характеристик канала до суммирования (например, выбор подмножества антенн с наибольшей мощностью).

Существует очевидный компромисс: методы на основе оценки состояния канала обладают высоким