CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-63-71

УДК 621.391

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОДУЛЯЦИЕЙ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ВИДИМЫМ СВЕТОМ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА КОЭФФИЦИЕНТА ХЕРСТА И ЛОКАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДНОЙ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ. ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

А. Н. СОЛОВЬЁВ[1], С. И. ПОЛОВЕНЯ[2]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)
[2]Белорусская государственная академия связи (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Предложен алгоритм адаптивного управления модуляцией для систем связи видимым светом, использующий совместный анализ коэффициента Херста и локальной оценки производной отношения сигнал/шум. Алгоритм использует асимметричную логику переключения: повышение порядка модуляции разрешается только при одновременном выполнении условий положительной оценки локальной производной и высокой персистентности временного ряда, тогда как понижение осуществляется немедленно при обнаружении направленного ухудшения. Пороговые параметры алгоритма обоснованы путем анализа тепловых карт выигрыша по скорости, построенных для экспериментальных сценариев. Предлагаемый алгоритм обеспечивает уменьшение числа переключений порядка модуляции относительно классического порогового метода в диапазоне от 7,1 до 81,2 % в зависимости от характера динамики канала.

Ключевые слова: адаптивная модуляция, связь видимым светом, коэффициент Херста, локальная оценка производной, SNR, R/S-анализ, долговременная память канала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Соловьёв, А. Н. Адаптивное управление модуляцией в системах связи видимым светом на основе совместного анализа коэффициента Херста и локальной оценки производной отношения сигнал/шум. Часть 1. Теоретические основы и разработка алгоритма / А. Н. Соловьёв, С. И. Половеня // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 4. С. 63–71. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-63-71.

ADAPTIVE MODULATION CONTROL IN VISIBLE-LIGHT COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON A JOINT ANALYSIS OF THE HURST EXPONENT AND LOCAL ESTIMATION OF THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO DERIVATIVE. PART 1. THEORETICAL FOUNDATIONS AND ALGORITHM DEVELOPMENT

ALIAKSEI SALAUYOU[1], SIARHEI PALAVENIA[2]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
[2]Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An adaptive modulation control algorithm for visible-light communication systems is proposed. It utilizes a combined analysis of the Hurst exponent and a local estimate of the signal-to-noise ratio derivative. The algorithm utilizes asymmetric switching logic: modulation order upshifts are permitted only when the conditions of a positive local derivative estimate and high time series persistence are simultaneously met, while downshifts are performed immediately upon detection of a directional degradation. The algorithm's threshold parameters are substantiated by analyzing speed-gain heat maps constructed for experimental scenarios. The proposed algorithm reduces the number of modulation order switches relative to the classical threshold method by 7.1 to 81.2%, depending on the channel dynamics.

Keywords: adaptive modulation, visible light communication, Hurst exponent, local derivative estimation, SNR, R/S analysis, long-term channel memory.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Salauyou A., Palavenia S. (2026) Adaptive Modulation Control in Visible-Light Communication Systems Based on a Joint Analysis of the Hurst Exponent and Local Estimation of the Signal-to-Noise Ratio Derivative. Part 1. Theoretical Foundations and Algorithm Development. *Doklady BGUIR*. 24 (4), 63–71. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-63-71 (in Russian).

Введение

В связи с устойчивым ростом объема передаваемых данных и увеличением количества устройств формируется запрос на развитие беспроводных систем связи[1,2]. Это приводит к дефициту радиочастотного спектра и заставляет искать альтернативы, среди которых немаловажное место занимают системы связи видимым светом (СВС). В особенности можно выделить стандарт Light Fidelity (Li-Fi), в котором использование источников света видимого диапазона позволяет совмещать функции передачи данных и освещения, при этом обеспечивая спектральную эффективность и низкие задержки при передаче данных [1].

В то же время оптический канал СВС характеризуется выраженной нестационарностью [2], ведь даже незначительные изменения геометрии, затенения, резкие изменения внешней засветки, вибрации, колебания температуры могут приводить к заметным изменениям принимаемого сигнала, в частности отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR) [3]. В таких условиях нерационально использовать фиксированные параметры передачи, поскольку ослабление сигнала вызовет рост ошибок, а при улучшении условий этот механизм приведет к неполному использованию пропускной способности канала СВС [4].

Основной механизм подстройки к изменяющимся условиям передачи данных – адаптивное управление модуляцией (АУМ) [5]. Классический подход предлагает выбор схемы (порядка) модуляции на основе мгновенной оценки SNR и сопоставления ее с заранее заданными пороговыми уровнями, которые соответствуют требуемому уровню вероятности битовой ошибки (bit error rate, BER) [6]. АУМ – несложный и широко распространенный подход, однако у него есть принципиальное ограничение – решение принимается по текущему значению SNR и не учитывает временную характеристику его изменения [4]. В реальных системах такое ограничение проявляется в том, что вблизи пороговых уровней схожие значения SNR могут соответствовать разному состоянию канала – направленному дрейфу или случайным флуктуациям [7]. При отсутствии информации о временной структуре сигнала классический пороговый механизм либо совершает избыточные переключения, реагируя на всплески, либо запаздывает с изменением режима, не видя устойчивого тренда [5].

Для снижения частоты переключений часто применяется метод гистерезиса, при котором вводятся дополнительные пороги для повышения и понижения порядка модуляции[3]. Зона нечувствительности, определяемая такими порогами, стабилизирует «дребезг» при переключении порядка модуляции, однако не устраняет главного недостатка – не учитывает динамику изменения SNR. Кроме того, гистерезис консервативен и может препятствовать переходу к более эффективной модуляции, так как не учитывает наличия устойчивого улучшения канала, что снижает его эффективность [5].

В некоторых работах для преодоления недостатков АУМ предлагается использовать методы машинного обучения, которые позволяют одновременно решать задачи оценки канала, переключения модуляции и устранения нелинейности, но требуют формировать большие объемы обучающих данных и задействовать значительные вычислительные ресурсы [8]. Это ограничивает их применимость в недорогих устройствах.

Альтернативой вышеперечисленным методам является учет временной структуры изменения SNR. Привлечение показателей долговременной памяти случайных процессов для задач управления системами передачи данных находит устойчивое применение в сетях передачи данных [9].

[1] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) [Electronic resource] // White Paper. Mode of access: cisco.com. Date of access: 28.04.2026.

[2] Ericsson Mobility Report, June 2024 [Electronic resource]. Mode of access: ericsson.com. Date of access: 28.04.2026.

[3] IEEE Standard for Information Technology: IEEE Std 802.11–2020 (Revision of IEEE Std 802.11–2016). NY, 2021. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.

Результаты экспериментального исследования канала СВС, полученные в [10], свидетельствуют о том, что коэффициент Херста H, оцениваемый на скользящем окне, способен различать режимы с выраженным трендом от случайных флуктуаций. Для понимания направления изменения SNR дополнительно был введен параметр d – локальная оценка производной SNR [7]. Совместный анализ пары (H, d) позволяет отделить направленный рост от направленного спада и случайных флуктуаций, что формирует основу для более обоснованного выбора порядка модуляции.

В статье предлагается комбинированный алгоритм адаптивной модуляции для систем СВС, который использует как мгновенное значение SNR, так и два параметра его временной структуры – коэффициент Херста и локальную оценку производной. Основная идея алгоритма состоит в том, что повышение порядка модуляции в зоне неопределенности происходит только при одновременном выполнении условий устойчивости положительного тренда ($d > 0$) и высокой персистентности ряда ($H > 0{,}75$), а понижение предполагается только по факту выхода из зоны неопределенности в область пониженного порядка модуляции. Такой подход позволяет использовать устойчивое улучшение канала связи для повышения пропускной способности и быстро реагировать на ухудшение условий.

Цель исследований – повышение эффективности передачи данных в канале СВС с помощью алгоритма АУМ, основанного на совместном анализе коэффициента Херста и локальной производной SNR.

Экспериментальная установка и формирование временных рядов SNR

Все измерения SNR выполнялись на экспериментальной установке, построенной на базе программно определяемых радиосистем (software defined radio, SDR) HackRF One и разработанного оптоэлектронного тракта. Установка подробно описана в [11].

Передающий тракт формирует OFDM модулированный сигнал в среде GNURadio, который после цифро-аналогового преобразования через оптоэлектронную систему подается на источник излучения (лазерный диод) с длиной волны 650 нм. После прохождения по оптическому каналу сигнал поступает через фотодиод на трансимпедансный усилитель и после оцифровки вторым SDR обрабатывается приемным графом в среде GNURadio.

В приемном графе реализованы разделение сигнальной и шумовой составляющих спектра и вычисление текущего SNR в децибелах. Полученные значения SNR записываются в файл-протокол с временными метками с частотой приблизительно 10 Гц, что ограничено производительностью установки [11].

Изменение геометрии оптического канала (расстояние, угол падения) и внешние воздействия (затенения, вибрации) позволили получить временные ряды SNR с различными характеристиками. В процессе исследований было выбрано несколько характерных сценариев – квазистационарный, плавный рост и плавное снижение, ряд с резкими скачками и колебаниями около порогов переключения, засветка солнечным светом, работа канала в условиях случайных вибраций и смешанный сценарий.

Схемы модуляции и пороговые уровни

В системе использовались четыре схемы модуляции с возрастающей спектральной эффективностью: BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Для максимальной полосы канала установки 20 МГц (при измерениях использовалась пониженная полоса пропускания для исключения работы на пределе возможности SDR) выбирались следующие теоретические скорости передачи данных: $R_{\text{BPSK}} = 20$ Мбит/с, $R_{\text{QPSK}} = 40$ Мбит/с, $R_{\text{16-QAM}} = 80$ Мбит/с, $R_{\text{64-QAM}} = 120$ Мбит/с [4].

Номинальные пороговые значения SNR для перехода между порядками модуляции определялись на основе теоретических кривых BER для канала с аддитивным белым гауссовским шумом без помехоустойчивого кодирования [6]. Во всех выражениях величина γ принималась как отношение энергии на бит к спектральной мощности шума. Тогда зависимости BER от γ можно описать известными аналитическими выражениями:

$$\text{BER}_{\text{QPSK}}(\gamma) = Q\left(\sqrt{2\gamma}\right); \tag{1}$$

$$\text{BER}_{\text{16-QAM}}(\gamma) = \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\gamma}\right); \tag{2}$$

$$\mathrm{BER}_{64\text{-QAM}}(\gamma) = \frac{7}{12} Q\left(\sqrt{\frac{2}{7}\gamma}\right), \tag{3}$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{\frac{-t^2}{2}} dt$ – дополнительная функция ошибок (Q-функция), определяющая вероятность превышения случайной величиной заданного порога.

Целевой уровень ошибок $\mathrm{BER} = 10^{-3}$ выбирали как верхнюю границу, при которой современные алгоритмы способны снизить итоговый BER до значений 10^{-7} и менее, требуемых для большинства практических применений [4]. Численное решение уравнений $\mathrm{BER}(\gamma) = 10^{-3}$ дает следующие теоретические пороги для битового SNR: QPSK – 6,8 дБ, 16-QAM – 10,5 дБ, 64-QAM – 14,8 дБ. Однако в реальных системах связи, построенных с использованием SDR, всегда закладывают дополнительный запас, который призван компенсировать неидеальность аналоговых цепей, искажения сигнала и другие факторы, которые оцениваются в 2–4 дБ [12]. Принимая во внимание этот запас для стабильного переключения в условиях нестационарного канала, для исследования выбирались следующие номинальные пороги для всех рассматриваемых алгоритмов переключения:

θ_1 = 9 дБ (переход BPSK → QPSK);
θ_2 = 13 дБ (переход QPSK → 16-QAM);
θ_3 = 18 дБ (переход 16-QAM → 64-QAM).

Вычисление параметров временного ряда

Для оценки долговременной памяти временного ряда SNR применялся метод нормированного размаха (R/S-метод) [10]

$$E\left[\frac{R(n)}{S(n)}\right] = cn^H,$$

где $R(n)$ – размах накопленных отклонений от среднего; $S(n)$ – стандартное отклонение; n – длина наблюдаемого участка; H – коэффициент Херста; c – константа процесса.

В [13] показано, что для практического применения на прикладных задачах с небольшими объемами выборки построение регрессии по набору масштабов нецелесообразно. Поэтому предлагается принимать $n = N$ (полную длину наблюдаемого участка) и ограничение, при котором константа процесса $c \equiv 1$ и прямая в двойных логарифмических координатах проводятся через начало координат. Тогда можно выполнить прямую оценку коэффициента Херста по масштабу длины окна N

$$H = \frac{\ln(R(N)/S(N))}{\ln N}, \tag{4}$$

где $R(n)$, $S(n)$ – величины, вычисляемые однократно по всему сегменту.

Особенность метода – систематическое смещение, вызванное ограничением $c \equiv 1$, которое не устраняется, а сохраняется, но принимается во внимание при оценке устойчивых трендов, поскольку является известным для конечных выборок нормально распределенных независимых величин [14]. Тем не менее реальный сигнал, полученный на установке, не является белым шумом из-за инерционности физических процессов, что увеличивает константу процесса. Как следствие – на стационарных участках коэффициент Херста не опускается заметно менее 0,5 (рис. 1 – квазистационарный канал с неизменными условиями), что позволяет сформировать устойчивый диапазон значений, который принимается как шумовой порог. Это подтверждается экспериментально – зеленая пунктирная линия, шумовой порог 0,75. Напротив, при появлении направленного тренда в сигнале систематическое смещение и возрастающий коэффициент H уверенно поднимаются к значениям более 0,75, что значительно превышает шумовой порог (рис. 2). Формула (4) применялась на скользящем окне длиной N = 200 отсчетов (~20 с при частоте регистрации 10 Гц), продвигаемом с шагом 20 отсчетов (~2 с). На каждом шаге по текущему сегменту вычислялось одно значение H. Полученный дискретный ряд линейно интерполировался на все моменты времени, образуя непрерывный временной ряд. Выбор длины окна был обоснован экспериментально.

В качестве показателя направления изменения сигнала вводился параметр d, представляющий собой упрощенную оценку локальной производной. Параметр d вычислялся как среднее приращение SNR на последних M отсчетах внутри того же скользящего окна длиной N

$$d = \frac{1}{M-1} \sum_{i=N-M+1}^{N-1} \left(x_{i+1} - x_i \right). \tag{5}$$

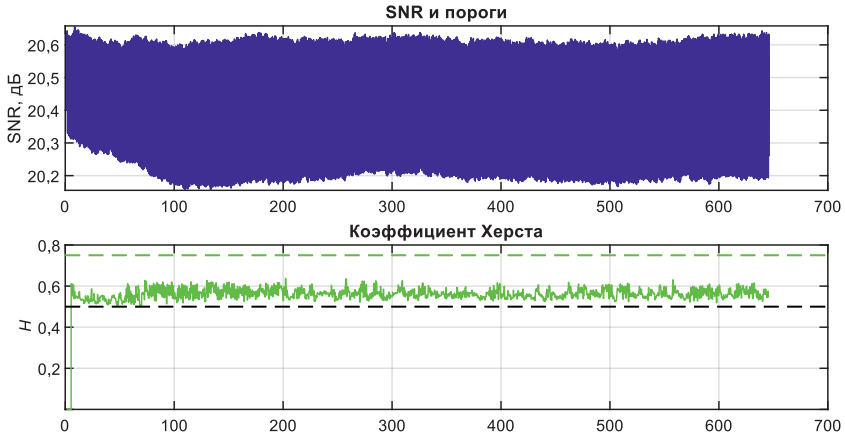

Рис. 1. Оценка коэффициента Херста в квазистационарном канале
Fig. 1. Estimation of the Hurst exponent in a quasi-stationary channel

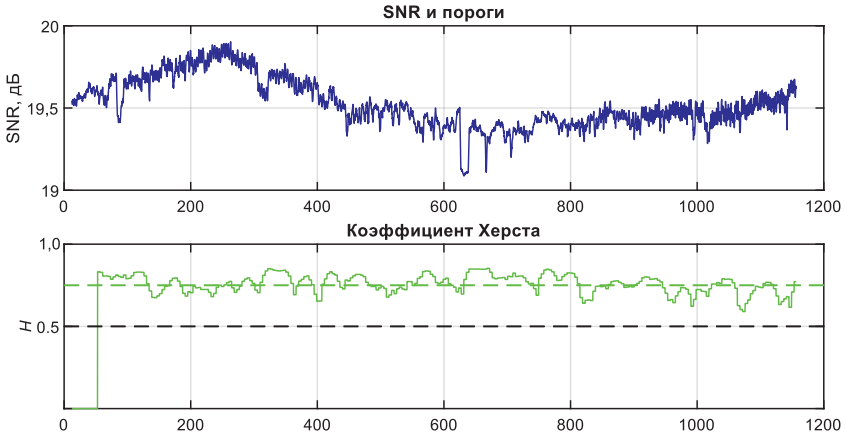

Рис. 2. Оценка коэффициента Херста в канале с внешней переменной засветкой
Fig. 2. Estimation of the Hurst exponent in a channel with variable ambient light

Знак d относительно нуля указывает направление изменения: $d > 0$ соответствует росту SNR, $d < 0$ – падению, а $d \approx 0$ – случайные флуктуации. Величина этого показателя пропорциональна крутизне тренда. Формально сумма в (5) является телескопической и зависит только от двух крайних отсчетов внутри подокна длиной M. Вычисление d производилось синхронно с оценкой H, а после интерполяции формировался непрерывный ряд значений локальной производной для всех моментов времени. Таким образом, в каждый момент времени мы располагали тремя параметрами – мгновенным значением SNR, коэффициентом Херста и оценкой локальной производной, что позволило применять их в алгоритме АУМ для канала СВС.

Обоснование выбора длины окна

Длина скользящего окна N является критическим параметром, определяющим компромисс между статистической надежностью оценки H и способностью алгоритма своевременно реагировать на изменения канала. Классические исследования R/S-метода рекомендуют использовать не менее 200–500 точек для получения устойчивой оценки [15]. Не менее важно, чтобы в задачах реального времени чрезмерно длинные окна не затягивали реакцию и не пропускали кратковре-

менные ухудшения. Поэтому для обоснования значения N был выполнен эксперимент на двух контрастных сценариях:

– канал с быстрыми возмущениями (rand om-fluct.csv), SNR колебался в пределах порогов, но вводились резкие кратковременные провалы;

– смешанный сценарий (snr_log_mix_H_d.csv), содержал участки плавных трендов и затенений с колебаниями в зонах переключения.

Для каждого сценария длина окна варьировалась в диапазоне 100–1000 отсчетов с шагом 10. Результаты исследований представлены на рис. 3.

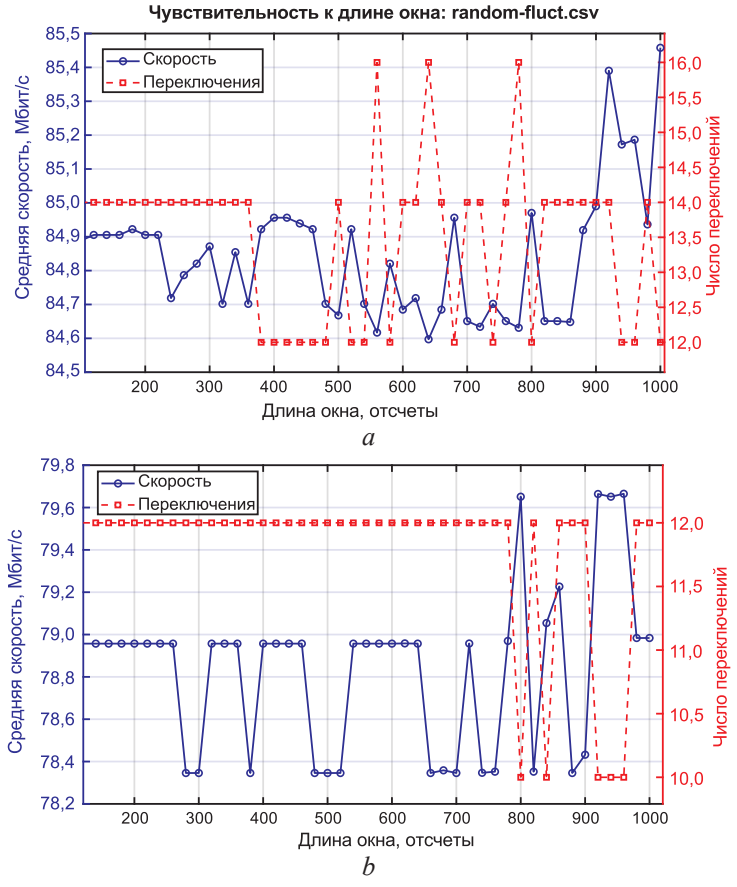

Рис. 3. Чувствительность скорости передачи данных и количества переключений к длине окна:
a – канал с быстрыми возмущениями; *b* – смешанный сценарий
Fig. 3. Sensitivity of data rate and switching frequency to window length:
a – fast-fading channel; *b* – mixed scenario

Как показано на рис. 3, при наличии интенсивных случайных флуктуаций увеличение окна более чем на 300 отсчетов приводит к резкой деградации управления и непредсказуемым переключениям. Следовательно, при выборе критического параметра N необходимо руководствоваться принципом минимизации риска в наихудшем сценарии. Значение $N = 200$ является точкой пересечения зон стабильности для обоих исследованных процессов.

Алгоритмы управления модуляцией

Рассмотрим три сравниваемых алгоритма выбора модуляции: классический пороговый, гистерезисный и предлагаемый комбинированный, основанный на совместном анализе коэффициента Херста H и оценки локальной производной d. Все алгоритмы оперируют мгновенным значением SNR для равных условий.

Классический пороговый алгоритм принимает решение о выборе порядка модуляции m_t исключительно по текущему значению SNR, сравнивая его с заданными порогами $\theta_1 = 9$ дБ, $\theta_2 = 13$ Дб и $\theta_3 = 18$ Дб:

$$m_t^{base} = \begin{cases} 1(\text{BPSK}),\ s_t < \theta_1; \\ 2(\text{QPSK}),\ \theta_1 \le s_t < \theta_2; \\ 3(\text{16-QAM}),\ \theta_2 \le s_t < \theta_3; \\ 4(\text{64-QAM}),\ \theta_3 \le s. \end{cases}$$

Алгоритм не обладает памятью, решение в момент времени t не зависит от предыдущего состояния, что делает его наиболее простым в реализации и в то же время самым чувствительным к случайным флуктуациям вблизи порогов переключения.

Гистерезисный алгоритм применяется для снижения частоты переключений. При его использовании вводятся раздельные пороги для повышения и понижения порядка модуляции. В исследовании использовалась симметричная зона нечувствительности шириной $\Delta = 1{,}5$ дБ, т. е. смещение каждого порога составляло $\delta = \Delta/2 = 0{,}75$ дБ вверх для повышения и такую же величину вниз для понижения. Во всех остальных случаях сохранялся режим предыдущего шага: $m_t^{\text{гист}} = m_{(t-1)}^{\text{гист}}$. Гистерезисный алгоритм, в отличие от классического, уже реализует механизм памяти на один шаг. Однако данная инерционность ограничена учетом только предыдущего состояния системы и не позволяет интерпретировать динамику изменения SNR во времени.

Комбинированный алгоритм на основе H и d заключается в том, что решение о повышении модуляции принимается только при наличии уверенности в устойчивом положительном тренде, тогда как понижение выполняется немедленно при переходе нижней границы зоны неопределенности. В алгоритме вводится понятие зоны неопределенности аналогичной гистерезисному алгоритму – окрестности каждого из трех порогов шириной $\Delta = 1{,}5$ дБ (по 0,75 дБ в каждую сторону от порога, аналогично гистерезисному), а если SNR находится вне этих зон, выбор модуляции осуществляется по классическому пороговому алгоритму. Если же s_t попадает в зону неопределенности, решение корректируется с учетом H_t и d_t. Тогда правила переключения можно записать следующим образом: пусть $m_{(t-1)}^{Hd}$ – индекс модуляции в предыдущий момент (1 – BPSK, 2 – QPSK, 3 – 16-QAM, 4 – 64-QAM). Тогда для текущего значения:

– понижение модуляции выполняется точно так же, как и в гистерезисном алгоритме, дополнительных условий для понижения не накладывается, поскольку задержка с понижением может привести к резкому росту ошибок;

– повышение порядка модуляции при выходе уровня SNR за верхнюю границу зоны также полностью повторяет гистерезисный метод;

– досрочное повышение порядка модуляции внутри зоны разрешается, когда уровень SNR находится в зоне неопределенности $\pm\delta/2$ относительно порога переключения порядка модуляции и одновременно зафиксирован устойчивый положительный тренд. При одновременном выполнении обоих условий разрешается переход на одну ступень вверх – $m_t^{Hd} = m_{t-1}^{Hd} + 1$, а если условия тренда не выполнены, сохраняется текущая модуляция. Такая асимметрия отражает различную цену ошибок: ложное повышение ведет к потере пакетов, тогда как ложная задержка понижения – лишь к временному снижению скорости.

Пороговые значения устойчивости положительного тренда H_{thr} и d_{thr} будут протестированы с помощью тепловой карты для всех сценариев и объединены в общую тепловую карту минимального выигрыша для определения их оптимальных значений во второй части статьи в соответствующем разделе.

Заключение

1. Дано описание экспериментальной установки и приведена процедура вычисления двух параметров временной структуры сигнала – коэффициента Херста и локальной оценки производной. Отмечено, что коэффициент Херста, оцениваемый методом нормированного размаха на скользящем окне, различает квазистационарные участки и участки с направленным трендом, а параметр d дополняет эту информацию, показывая направление изменения SNR. Обоснован выбор длины окна как точки пересечения зон стабильности для контрастных сценариев динамики канала.

2. Рассмотрены три алгоритма управления модуляцией: классический пороговый, гистерезисный и предлагаемый комбинированный. Главная особенность комбинированного алгоритма – асимметричная логика переключения, когда повышение порядка модуляции разрешается

досрочно внутри зоны неопределенности только при одновременном выполнении условий высокой персистентности ряда и положительной оценки локальной производной, тогда как понижение выполняется немедленно без дополнительных условий.

3. Во второй части статьи будут приведены результаты тестирования характерных сценариев каналов системы связи видимым светом, сделаны анализ тепловых карт пороговых параметров и сравнение эффективности алгоритмов по средней скорости передачи данных и числу переключений для всех сценариев.

Список литературы

1. Komine, T. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights / T. Komine, M. Nakagawa // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2004. Vol. 50, No 1. P. 100–107. DOI: 10.1109/TCE.2004.1277847.
2. Channel Characteristics of Visible Light Communications Within Dynamic Indoor Environment / P. Chvojka [et al.] // Journal of Lightwave Technology. 2015. Vol. 33, No 9. P. 1719–1725. DOI: 10.1109/JLT.2015.2398894.
3. Половеня, С. И. Исследование атмосферного канала передачи данных непрямой видимости / С. И. Половеня, А. Н. Соловьёв, А. Ф. Корнеева // Проблемы инфокоммуникаций. 2024. № 2 (20). С. 63–70.
4. Goldsmith, A. Wireless Communications / A. Goldsmith. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. DOI: 10.1017/CBO9780511841224.
5. López-Benítez, M. Performance Analysis of SNR Threshold-Setting Strategies for Adaptive Modulation and Coding Under Fading Channels / M. López-Benítez // Physical Communication. 2018. Vol. 30. P. 154–166. DOI: 10.1016/j.phycom.2018.08.009.
6. Cho, K. On the General BER Expression of One- and Two-Dimensional Amplitude Modulations / K. Cho, D. Yoon // IEEE Transactions on Communications. 2002. Vol. 50, No 7. P. 1074–1080. DOI: 10.1109/TCOMM.2002.800818.
7. Соловьёв, А. Н. Анализ динамики отношения сигнал/шум в канале связи видимым светом с применением коэффициента Херста / А. Н. Соловьёв // Проблемы инфокоммуникаций. 2026. № 1.
8. Saxena, V. N. Machine Learning in Visible Light Communication System: A Survey / V. N. Saxena, V. K. Dwivedi, J. Gupta // Wireless Communications and Mobile Computing. 2023. Vol. 2023. Art. 3950657. DOI: 10.1155/2023/3950657.
9. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) / W. E. Leland [et al.] // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1994. Vol. 2, No 1. P. 1–15. DOI: 10.1109/90.282603.
10. Hurst, H. E. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs / H. E. Hurst // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116, No 1. P. 770–799. DOI: 10.1061/TACEAT.0006518.
11. Соловьёв, А. Н. Экспериментальная система для исследования канала связи видимым светом на базе SDR / А. Н. Соловьёв // Технологии передачи и обработки информации: материалы Междунар. науч.-техн. семинара. Минск, 2026.
12. Скляр, Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ.; 2-е изд. М.: Вильямс, 2016.
13. Лепихин, А. П. К применению показателя (коэффициента) Херста в гидрологии / А. П. Лепихин, Д. И. Перепелица // Географический вестник. 2016. № 4. С. 36–44.
14. Anis, A. A. The Expected Value of the Adjusted Rescaled Hurst Range of Independent Normal Summands / A. A. Anis, E. H. Lloyd // Biometrika. 1976. Vol. 63, No 1. P. 111–116.
15. Weron, R. Estimating Long-Range Dependence: Finite Sample Properties and Confidence Intervals / R. Weron // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 2002. Vol. 312, No 1. P. 285–299. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00961-5.

Поступила 26.05.2026 Принята в печать 24.06.2026

References

1. Komine T., Nakagawa M. (2004) Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 50 (1), 100–107. DOI: 10.1109/TCE.2004.1277847.
2. Chvojka P., Zvanovec S., Haigh P. A., Ghassemlooy Z. (2015) Channel Characteristics of Visible Light Communications Within Dynamic Indoor Environment. *Journal of Lightwave Technology*. 33 (9), 1719–1725. DOI: 10.1109/JLT.2015.2398894.
3. Palavenia S. I., Salauyou A. N., Karneeva A. F. (2024) Investigation of the Non-Line-of-Sight Atmospheric Data Transmission Channel. *Problems of Infocommunications*. (2), 63–70 (in Russian).
4. Goldsmith A. (2005) *Wireless Communic*ations. Cambridge, Cambridge University Press Publ. DOI: 10.1017/CBO9780511841224.

5. López-Benítez M. (2018) Performance Analysis of SNR Threshold-Setting Strategies for Adaptive Modulation and Coding Under Fading Channels. *Physical Communication*. 30, 154–166. DOI: 10.1016/j.phycom.2018.08.009.
6. Cho K., Yoon D. (2002) On the General BER Expression of One- and Two-Dimensional Amplitude Modulations. *IEEE Transactions on Communications*. 50 (7), 1074–1080. DOI: 10.1109/TCOMM.2002.800818.
7. Salauyou A. N. (2026) Analysis of Signal-to-Noise Ratio Dynamics in a Visible Light Communication Channel Using the Hurst Exponent. *Problems of Infocommunications*. (1) (in Russian).
8. Saxena V. N., Dwivedi V. K., Gupta J. (2023) Machine Learning in Visible Light Communication System: A Survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2023, 3950657. DOI: 10.1155/2023/3950657.
9. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. (1994) On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2 (1), 1–15. DOI: 10.1109/90.282603.
10. Hurst H. E. (1951) Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 116 (1), 770–799. DOI: 10.1061/TACEAT.0006518.
11. Salauyou A. N. (2026) Experimental System for the Investigation of a Visible Light Communication Channel Based on SDR. *Technologies of Data Transmission and Processing, Materials of Intern. Scientific and Techn. Seminar*. Minsk (in Russian).
12. Sklar B. (2016) *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Moscow, Williams Publ. (in Russian).
13. Lepikhin A. P., Perepelitsa D. I. (2016) On the Application of the Hurst Exponent (Coefficient) in Hydrology. *Geographical Bulletin*. (4), 36–44 (in Russian).
14. Anis A. A., Lloyd E. H. (1976) The Expected Value of the Adjusted Rescaled Hurst Range of Independent Normal Summands. *Biometrika*. 63 (1), 111–116.
15. Weron R. (2002) Estimating Long-Range Dependence: Finite Sample Properties and Confidence Intervals. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 312 (1), 285–299. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00961-5.

Received: 26 May 2026 Accepted: 24 June 2026

Вклад авторов

Соловьёв А. Н. создал экспериментальную установку, разработал и реализовал алгоритм адаптивного управления модуляцией, спланировал и провел экспериментальные измерения временных рядов SNR, обработал и проанализировал полученные данные, построил графики, оформил рукопись статьи.

Половеня С. И. поставил научную задачу, определил цели и направления исследования, участвовал в интерпретации результатов и обсуждении выводов, выполнил вычитку рукописи статьи.

Authors' contribution

Salauyou A. created the experimental setup, developed and implemented the adaptive modulation control algorithm, planned and conducted experimental measurements of SNR time series, processed and analyzed the obtained data, plotted graphs, and prepared the manuscript.

Palavenia S. set the scientific task, determined the goals and directions of the research, participated in the interpretation of the results and discussion of the conclusions, and proofread the manuscript.

Сведения об авторах

Соловьёв А. Н., асп. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Половеня С. И., канд. техн. наук, доц., декан факультета электросвязи, Белорусская государственная академия связи

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2
Белорусская государственная академия связи
Тел.: + 375 17 360-15-02
E-mail: alexs.platforma@gmail.com
Соловьёв Алексей Николаевич

Information about the authors

Salauyou A., Postgraduate of Information Radiotechnologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Palavenia S., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Dean of the Faculty of Telecommunications, Belarusian State Academy of Communications

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, F. Skoriny St., 8/2
Belarusian State Academy of Communications
Tel.: + 375 17 360-15-02
E-mail: alexs.platforma@gmail.com
Salauyou Aliaksei