CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-42-50

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 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

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. Представлены результаты тестирования характерных сценариев каналов системы связи видимым светом. Выполнен анализ тепловых карт пороговых параметров и эффективности алгоритмов по средней скорости передачи данных и числу переключений для всех сценариев. Экспериментальная верификация, проведенная на разработанной установке, представленной в части 1, показала прирост средней скорости передачи данных в диапазоне от 1,88 до 47,62 % относительно классического порогового алгоритма во всех исследованных сценариях динамики канала. Предложенный алгоритм обеспечивает снижение 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 2. Экспериментальная верификация и анализ эффективности / А. Н. Соловьёв, С. И. Половеня // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 42–50. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-42-50.

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 2. EXPERIMENTAL VERIFICATION AND EFFECTIVENESS ANALYSIS

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. Experimental Verification and Efficiency Analysis. The results of testing typical channel scenarios for visible light communication systems are presented. Heat maps of threshold parameters and algorithm efficiency are analyzed for the average data transfer rate and the number of switches for all scenarios. Experimental verification, conducted on the developed setup presented in Part 1, demonstrated an increase in the average data transfer rate in the range of 1.88 to 47.62 % relative to the classical threshold algorithm in all studied channel dynamics scenarios. The proposed algorithm reduces the number of modulation order switches relative to the classical threshold method in the range of 7.1 to 81.2 %, depending on the nature of 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 2. Experimental Verification and Effectiveness Analysis. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 42–50. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-42-50 (in Russian).

Введение

Настоящая статья является продолжением работы [1], в которой излагались теоретические основы комбинированного алгоритма адаптивного управления модуляцией (АУМ) для систем связи видимым светом (СВС), использующих совместный анализ коэффициента Херста H [2] и локальной оценки производной d отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR). В первой части статьи представлены экспериментальная установка [3], с помощью которой получали временные ряды SNR для различных сценариев, описаны три сравниваемых алгоритма (классический пороговый [4], гистерезисный [5] и предлагаемый комбинированный), а также обоснован выбор длины скользящего окна.

Методика тестирования

Для экспериментальной проверки предложенного комбинированного алгоритма АУМ и сравнения с классическим пороговым и гистерезисным методами использовались пять тестовых сценариев, показывающих наиболее характерные режимы динамики канала СВС.

Квазистационарный канал с редкими выбросами. Запись делалась в условиях переменной облачности: SNR держалось около 19,5 дБ, практически не изменяясь, за исключением начального периода стабилизации работы установки. Импульсных помех практически не было. При стандартных порогах все три алгоритма в этом сценарии просто удерживали 64-QAM без каких-либо переключений, и разницы между ними не было видно. Чтобы сделать сценарий более информативным, верхний порог поднимали до 19,5 дБ, т. е. прямо к среднему уровню сигнала. Это искусственно создало зону неопределенности и позволило увидеть, как алгоритмы ведут себя у границы переключения, когда H указывает на антиперсистентность или стабильный тренд. Ввиду искусственного повышения в результатах проверка этого сценария не фигурирует.

Медленное падение с последующим ростом SNR. Сценарий, когда SNR сначала монотонно снижалось при воздействии на приемник, который постепенно уходил из зоны уверенного, а потом так же плавно возвращалось. Важно, что оба участка присутствовали в одной непрерывной записи – это позволяло оценить своевременность как понижения, так и повышения порядка модуляции.

Колебания вблизи пороговых уровней. Флуктуации SNR происходили в окрестности всех порогов поочередно. У базового алгоритма в таких условиях часто наблюдается дребезг, и количество переключений сильно возрастает. Сценарий проверяет, умеет ли алгоритм отличить случайные колебания от направленного движения.

Показательный переходный сценарий. Последовательность падений и восстановлений сигнала в небольших пределах, сформированная с помощью механического воздействия в виде ударов с последующими затухающими гармоническими колебаниями. Сценарий предельно показательный, именно в таких условиях разрабатываемый алгоритм должен показать максимальное преимущество.

Частые случайные затемнения. Реальная запись с многократными затенениями разной глубины, вплоть до полного пропадания сигнала. Вариативность SNR здесь максимальная из всех пяти сценариев.

Частота регистрации SNR во всех случаях – около 10 Гц. Первые 60 отсчетов каждого файла отбрасывались, так как при начале работы приемника в них был крупный выброс, связанный с выходом на рабочий режим, который исказил бы статистику и масштаб графиков.

Порядок проведения испытаний

Эффективность алгоритмов оценивалась двумя основными метриками:
– средней скоростью передачи данных (характеризует спектральную эффективность):

$$\overline{R} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} R\left(m_t\right);$$

– суммарным числом переключений (характеризует стабильность управления):

$$N_s = \sum_{t=2}^{T} 1\left(m_t \neq m_{t-1}\right).$$

Дополнительно вычислялся относительный выигрыш по скорости для гистерезисного и синергетического алгоритмов по сравнению с пороговым. Для каждого сценария выполнялись следующие шаги:

– загрузка лог-файла в обработчик и исключение начального переходного процесса при включении;
– настройка параметров работы для всех алгоритмов;
– вычисление временных рядов H_t и d_t согласно приведенной выше методике тестирования;
– прогон всех алгоритмов (порогового, гистерезисного, комбинированного) с фиксированными параметрами по временному ряду SNR;
– расчет R, N_S и выигрыша G для каждого алгоритма;
– построение временных диаграмм SNR, H_t, d_t, N_S и вывод в консоль скоростей, переключений и выигрыша для всех алгоритмов.

В табл. 1 приведены средняя скорость передачи данных и число переключений для трех алгоритмов – порогового (Base), гистерезисного (Hyst) и комбинированного (Hd), – полученные на пяти тестовых сценариях. Для всех сценариев использованы единые параметры, за исключением квазистационарного случая, где верхний порог переключения временно поднят до 19,5 дБ (обоснование дано выше)

Таблица 1. Сравнение алгоритмов по средней скорости передачи данных и числу переключений
Table 1. Comparison of algorithms by average data rate and number of switchings

Сценарий	Алгоритм	Средняя скорость, Мбит/с	Число переключений	Выигрыш, %
Квазистационарный	Base	99,49	210	
	Hyst	97,26	4	–2,23
	Hd	**105,82**	**38**	**+6,36**
Медленное падение и рост SNR	Base	76,47	12	
	Hyst	75,91	6	–0,73
	Hd	**79,58**	**6**	**+4,07**
Колебания вблизи пороговых уровней	Base	91,91	28	
	Hyst	92,05	16	+0,15
	Hd	**95,91**	**26**	**+4,35**
Показательный переходный сценарий	Base	80,12	48	
	Hyst	80	0	–0,15
	Hd	**118,27**	**9**	**+47,62**
Частые случайные затемнения	Base	97,83	32	
	Hyst	98,66	22	+0,86
	Hd	**99,67**	**22**	**+1,88**

По данным табл. 1 можно сделать выводы, что комбинированный алгоритм АУМ Hd дает прирост скорости во всех сценариях в пределах от 1,88 до 47,62 % при числе переключений существенно меньше, чем у порогового. Гистерезисный алгоритм частые переключения подавляет хорошо, но по скорости в некоторых сценариях проигрывает даже пороговому, так как зона нечувствительности мешает воспользоваться устойчивым улучшением канала, в чем опять проявляется преимущество АУМ Hd.

Таким образом, предложенное АУМ показывает наилучший компромисс между скоростью и стабильностью, увеличивая скорость и уменьшая количество переключений относительно порогового и увеличивая скорость передачи относительно гистерезисного, который, не имея данных о положительных трендах, запаздывает с переключением порядка модуляции. В показательном сценарии отмечается преимущество, для которого и создавался комбинированный алгоритм, когда колебания происходят около порога, не выходя за зону нечувствительности, и с этого момента временные характеристики ряда позволяют существенно повысить скорость, не злоупотребляя лишними переключениями.

Вычислительная сложность алгоритма АУМ Hd – $O(N)$ ($N = 200$). Согласно длине скользящего окна, при вычислении параметров H и d выполняется порядка 1500 простых операций каждые 2 с. Пороговый и гистерезисный алгоритмы обходятся несколькими сравнениями, что соответствует сложности $O(1)$, но разница выглядит существенной только относительно, так как современные процессоры выполняют миллиарды операций в секунду. Дополнительная вычислительная нагрузка от алгоритма Hd составляет незначительную долю процента в обработке сложного модулированного сигнала и декодировании, при этом заметно улучшая эффективность передачи данных.

Для оценки влияния пороговых значений для коэффициента Херста H_{thr} и локальной оценки производной d_{thr} на эффективность адаптивного алгоритма были построены тепловые карты выигрыша по скорости передачи данных (рис. 1) для всех основных сценариев за исключением квазистационарного, так как в нем при стандартных параметрах переключения отсутствовали. Перебор проводился в диапазонах $H_{thr} \in [0{,}55;\ 0{,}9]$ с шагом 0,05 и $d_{thr} \in [0;\ 0{,}1]$ дБ/отсчет с шагом 0,005 для стандартных параметров алгоритма.

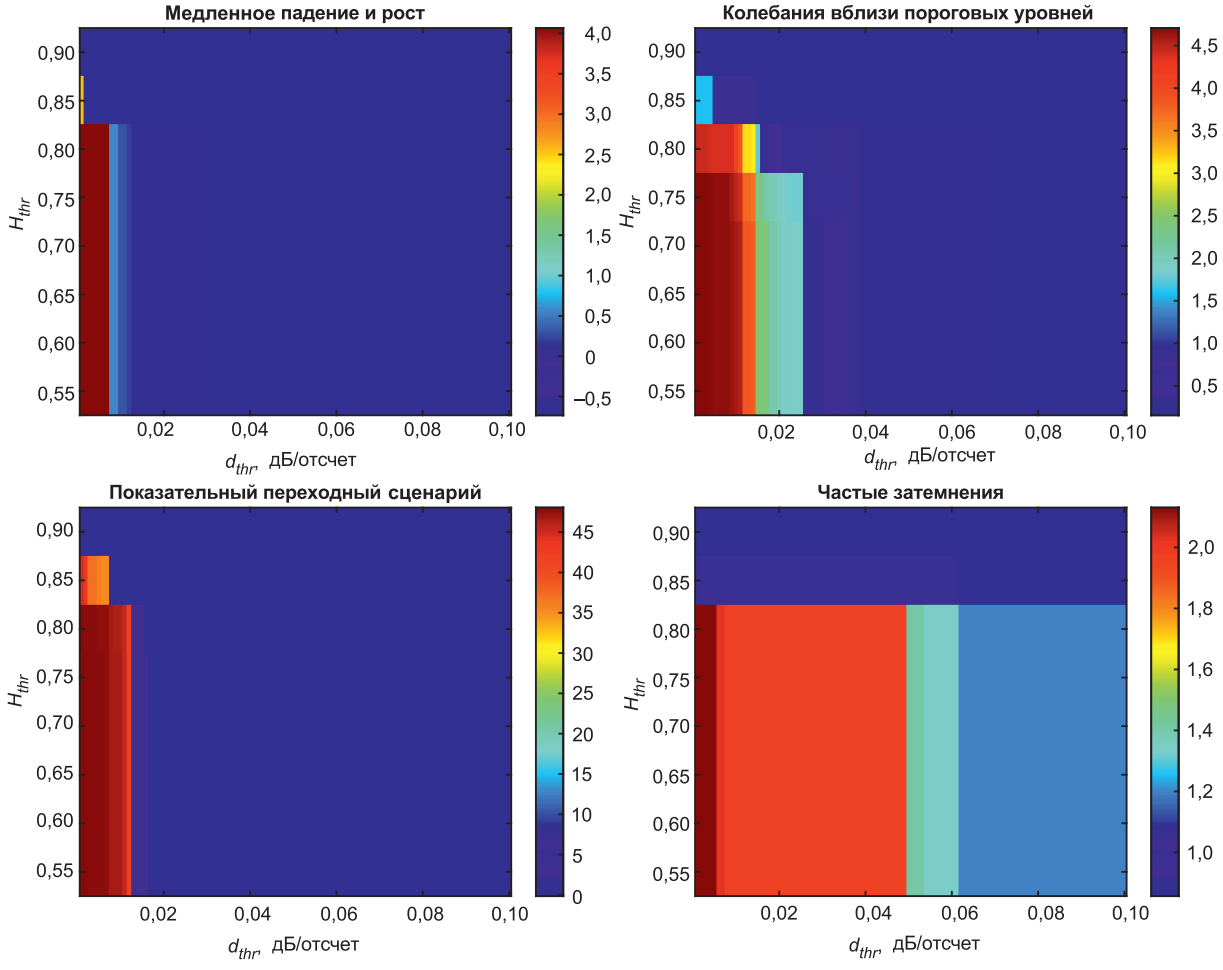


Рис. 1. Тепловые карты выигрыша по скорости передачи данных в зависимости от пороговых значений
Fig. 1. Heat maps of data transfer rate gains depending on threshold values

Картины выигрыша для трех сценариев выглядят похоже, основной вклад вносит порог d_{thr}, тогда как H_{thr} до значения примерно 0,8 дБ/отсчет на результат почти не влияет – карта в этой области практически однородна, а при $H_{thr} > 0{,}8$ выигрыш уменьшается. Сценарий с частыми затемнениями немного выбивается из общей картины – здесь зависимость несколько отличается, однако максимальный выигрыш находится при тех же параметрах, что и у предыдущих сценариев.

Отдельно была построена итоговая карта (рис. 2), где для каждой пары H_{thr}–d_{thr} брали не средний, а минимальный выигрыш по всем четырем сценариям.

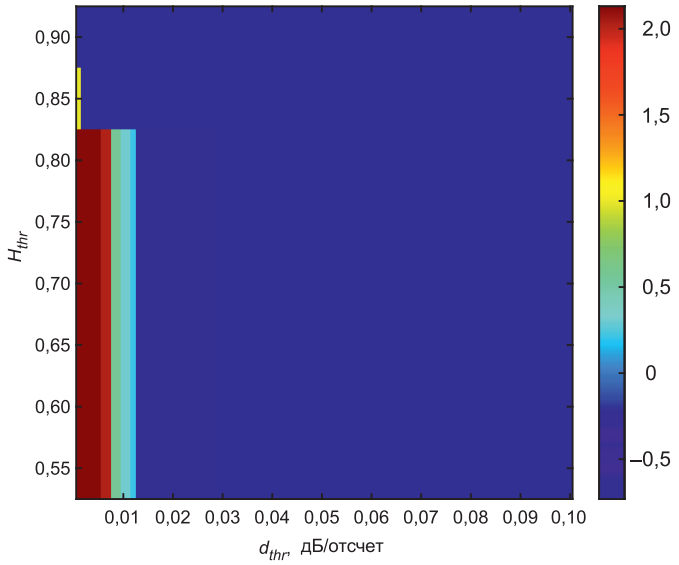


Рис. 2. Тепловая карта минимального выигрыша по четырем сценариям
Fig. 2. Heat map of minimum wins for four scenarios

Рабочая точка $H_{thr} = 0{,}75$, $d_{thr} = 0{,}002$ дБ/отсчет попадает в устойчивую зону выигрыша – минимальный равен примерно 2 %. Такой анализ показывает, что в худшем из рассмотренных сценариев алгоритм все равно оказывается лучше порогового, а, значит, параметры подбирались не под конкретный набор данных. Выигрыш сохраняется на широком диапазоне значений вокруг рабочей точки, что и демонстрирует тепловая карта.

Для детального анализа выбран сценарий медленного падения с последующим ростом SNR, так как он удобен тем, что в одной записи присутствуют оба направления изменения временных характеристик канала, и изменения происходят медленно с возможностью точечно отследить работу алгоритма. На рис. 3 для временно́го интервала длиной чуть более 250 с показаны диаграммы временного ряд SNR с нанесенными пороговыми уровнями, коэффициента Херста H, локальной оценки производной SNR, а также сравнение порядков модуляции трех алгоритмов.

На участке деградации канала ($t = 50$–130 с) все три алгоритма понижают порядок модуляции по мере падения SNR, как и предписывает алгоритм. Базовый переключается строго при пересечении порога сверху вниз, гистерезисный чуть позже из-за защитного стабилизирующего порога понижения, как и комбинированный алгоритм АУМ Hd.

На рис. 4 изображен увеличенный фрагмент в окрестности $t = 206{,}757$ с, где комбинированный алгоритм повышает порядок модуляции раньше двух других. Согласно рисунку, принципиальное различие проявляется на участке улучшения сигнала. И характер повышения позволяет обнаружить участки, где оценка локальной производной d имеет выраженный положительный всплеск выше порога d_{thr}, коэффициент Херста при этом также указывает на тренд значением, превышающим H_{thr}. И в этом случае комбинированный алгоритм выполняет повышение порядка модуляции раньше двух других. На рис. 4 этот момент зафиксирован точечно: SNR = 17,259 дБ – ниже порога $\theta_3 = 18$ дБ; $H = 0{,}83$; $d = 0{,}0067$ дБ/отсчет. Пороговый алгоритм ждет пересечения порога снизу вверх, а гистерезисный – еще дольше, так как ему нужно значение 18 дБ, чтобы выйти из защитной зоны. Алгоритм АУМ, находясь в той же зоне неопределенности, видит одновременное выполнение условий $H > H_{thr}$ и $d > d_{thr}$ и переходит на модуляцию, обеспечивающую скорость 120 Мбит/с раньше всех. Это прямая экспериментальная иллюстрация того, как срабатывает опережающее переключение на реальных значениях SNR канала СВС.

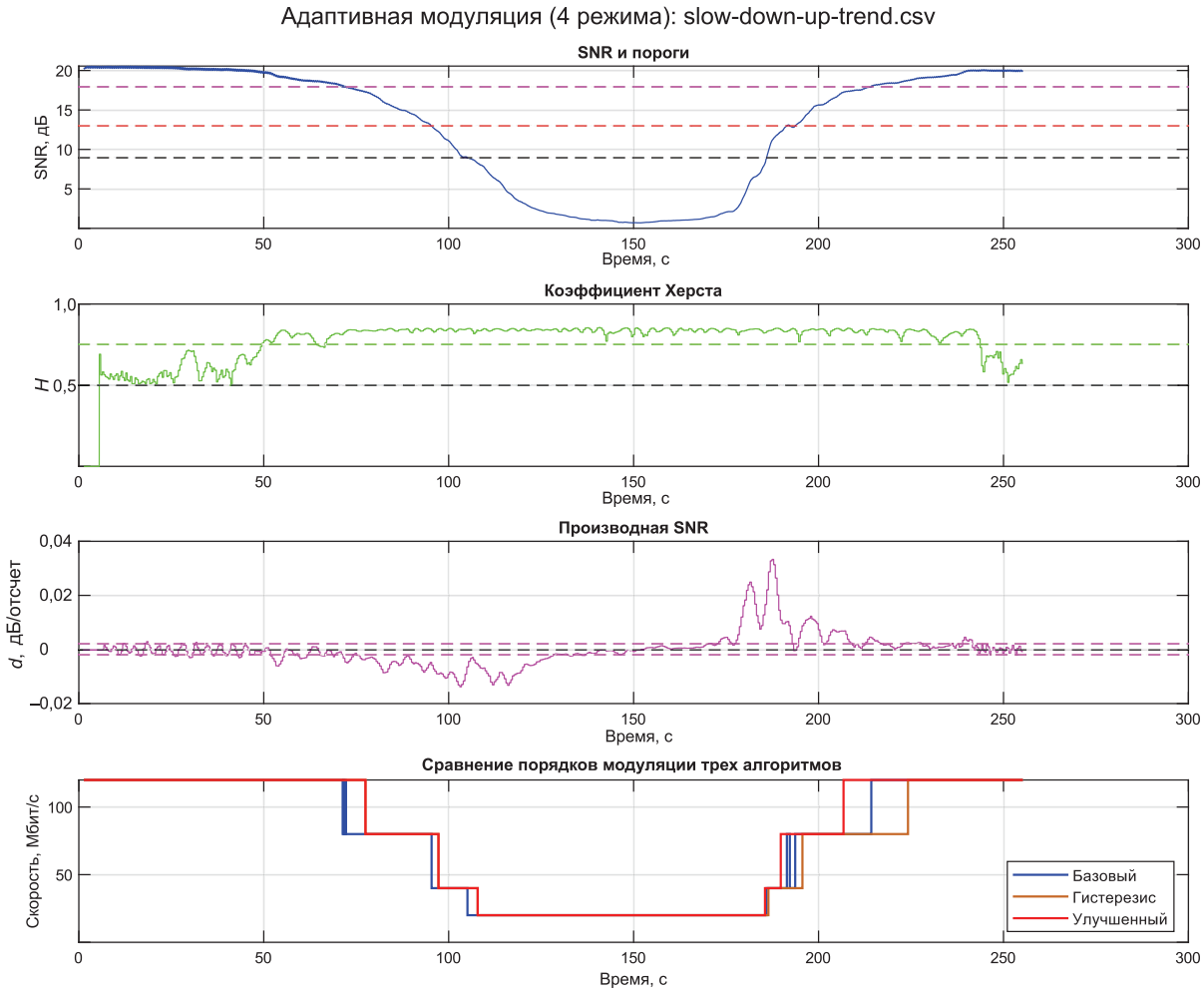


Рис. 3. Общая временна́я диаграмма с наблюдаемыми параметрами
Fig. 3. General time diagram with observed parameters

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные результаты подтверждают: совместный анализ мгновенного значения SNR, коэффициента Херста и локальной производной позволяет улучшить эффективность и стабильность управления по сравнению с классическим пороговым и гистерезисным алгоритмами переключения порядка модуляции. Коэффициент Херста, вычисляемый методом R/S-анализа на скользящем окне, выступает показателем устойчивости, а параметр d, определяющий направление тренда, позволяет алгоритму дополнительно различать рост и падение SNR.

Гистерезисный метод с переключениями справляется хорошо, но выигрыш происходит за счет уменьшения скорости; в большинстве сценариев гистерезис проигрывает пороговому алгоритму по скорости передачи. Причина в том, что фиксированная защитная зона нечувствительности не позволяет использовать устойчивое улучшение канала, тогда как адаптивный алгоритм, получая информацию о положительном устойчивом тренде, увеличивает скорость при одновременном снижении числа переключений относительно порогового метода.

Тепловые карты показали, что выигрыш слабо зависит от H_{thr} вплоть до значений 0,8, а основной прирост дают малые значения d_{thr}. Значит, выбранные значения не являются подгоночными – во всех исследованных сценариях алгоритм дает выигрыш, т. е. рабочая точка устойчива и может рекомендоваться при практической реализации.

Алгоритм не нуждается в обучении. При частоте регистрации 10 Гц и шаге окна 2 с он использует только стандартные операции – выделение окна, накопление сумм, логарифмирование. Это позволяет встраивать его в существующие приемники без смены аппаратной части, что выгодно отличает алгоритм от методов машинного обучения, требующих больших обучающих выборок и заметных вычислительных ресурсов.

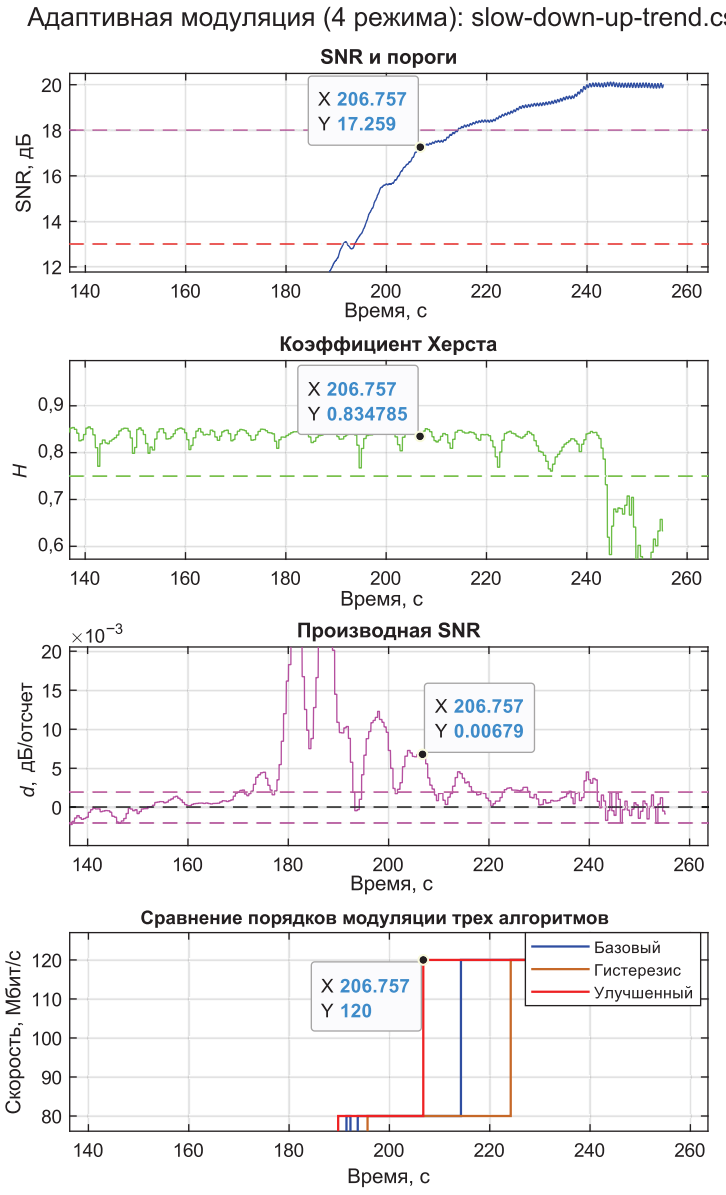


Рис. 4. Крупный план момента опережающего повышения порядка модуляции комбинированным алгоритмом адаптивного управления модуляцией Hd
Fig. 4. Close-up of the moment of advanced increase in the modulation order by the combined algorithm of adaptive modulation control Hd

Исследование имеет ряд ограничений. Оно выполнено в одиночном канале точка–точка, масштабирование на мультиагентные сценарии требует отдельного изучения. Прямых измерений частоты битовых ошибок не проводилось, оценка опиралась на теоретические кривые для канала с аддитивным белым гауссовым шумом. Параметры H_{thr} и d_{thr} хотя и показали оптимальную рабочую точку для всех сценариев на тепловых картах в исследованном диапазоне, могут потребовать настройки при специфической динамике канала. В качестве направления дальнейших исследований рассматриваются реализация алгоритма в программно определяемом радио с переключением режима модуляции и вычисление частоты битовых ошибок в условиях подвижного приемника при работе в реальном времени.

Заключение

1. Разработан и экспериментально верифицирован комбинированный алгоритм адаптивного управления модуляцией для систем связи видимым светом, основанный на совместном анализе коэффициента Херста и локальной оценки производной отношения сигнал/шум. Алгоритм

использует мгновенное значение SNR, а в зонах неопределенности вблизи порогов переключения – информацию о памяти в канале H и направлении изменения сигнала d. Тестирование выполнено на пяти сценариях, охватывающих квазистационарный режим, направленные тренды, колебания вблизи порогов, показательные переходные процессы и глубокие случайные затенения.

2. Предложенный алгоритм адаптивного управления модуляцией на основе совместного анализа коэффициента Херста и локальной производной SNR обеспечивает прирост средней скорости передачи данных в диапазоне от 1,88 до 47,62 % относительно классического порогового алгоритма во всех исследованных сценариях динамики канала связи видимым светом, включая медленные тренды и нестационарные воздействия. Также 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. Причем наибольший эффект достигается в сценариях с интенсивными флуктуациями вблизи пороговых уровней и частыми нестационарными воздействиями.

3. Достигнутый компромисс между спектральной эффективностью и стабильностью управления не требует обучения или модернизации аппаратной части и может быть рекомендован для реализации в системах связи видимым светом, работающих в нестационарных условиях.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
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.

Поступила 26.05.2026 Принята в печать 24.06.2026

References

1. 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).
2. 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.
3. 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).
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.

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 временны́х 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 Radio Technologies 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