

УДК 621.391.27

ОДНОПОЛОСНАЯ АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ХАРТЛИ

А. Б. КОХАНОВ, С. В. ЕМЕЛЬЯНОВ, Я. В. ДЕРЕВЯГИН

*Одесский национальный политехнический университет
Украина, Одесса, 65044, пр-т Шевченко, 1*

Аннотация. Разработан метод передачи сигналов с использованием однополосной амплитудной модуляции Хартли SSBH (Single Sideband modulation Hartley), который позволяет увеличить дальность связи радиоканала оптических и оптоволоконных систем передачи информации, где используется однополосная амплитудная модуляция SSB (Single Sideband). Увеличение дальности связи обеспечивается за счет приращения в качестве несущей частоты суммы двух ортогональных колебаний одной частоты (волна Хартли). Это обеспечивает энергетический выигрыш в 6 дБ, или увеличение амплитуды сигнала на выходе синхронного детектора в 1,41 раза, по сравнению с SSB, при условии одинаковой мощности излучения передатчиков и одинаковой чувствительности приемников SSBH и SSB сигналов. Применение SSBH и SSB модуляции позволяет обеспечить энергетический выигрыш в передающем тракте приблизительно в 15–20 раз, по сравнению с амплитудной модуляцией (АМ). Это также обеспечивает повышенную скрытность передачи SSBH сигнала, т.к. при отсутствии модулирующего сигнала передатчик практически не излучает, что позволяет обеспечить экономию энергии в случае электропитания передатчика от аккумулятора. В зависимости от необходимости, можно использовать верхнюю или нижнюю боковые полосы.

Ключевые слова: однополосная амплитудная модуляция; SSB; однополосная амплитудная модуляция Хартли; SSBH; цифровая связь; модулятор; демодулятор

1. ВВЕДЕНИЕ

Однополосная амплитудная модуляция с одной боковой полосой SSB (Single Sideband) впервые предложена Джоном Реншоу Карсоном в 1915 г., и нашла широкое применение в радиосвязи и телекоммуникационных системах, а также в оптоволоконных системах передачи сигналов [1–3] из-за эффективного использования спектра и мощности передатчика в канале связи. Может использоваться нижняя боковая полоса спектра частот LSB (Lower sideband), или верхняя — USB (Upper sideband) [4–12].

С энергетической точки зрения SSB передатчик очень эффективен, т.к. не излучает, когда нет модулирующего сигнала. Это позволяет снизить энергопотребление и радиозамет-

ность (демаскирование) передатчика. Полный энергетический выигрыш по сравнению с амплитудной модуляцией составляет 15–20 раз.

Следует заметить, что SSB сигнал относится к частному случаю амплитудно-фазовой модуляции, что видно из аналитических выражений для SSB сигнала, который имеет следующий вид [7, 12, 13]:

$$\begin{aligned} S_{\text{LSB}}(t) &= \\ &= [a_n \sin(\Omega t)] \cos(\omega_0 t) - [a_n \cos(\Omega t)] \sin(\omega_0 t) = \\ &= A_n \cos(\omega_0 t) + g A_n \sin(\omega_0 t) = \\ &= \sqrt{A_n^2 + g A_n^2} \sin(\omega_0 t + \varphi_1), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{USB}}(t) &= \\ &= [a_n \sin(\Omega t)] \cos(\omega_0 t) + [a_n \cos(\Omega t)] \sin(\omega_0 t) = \end{aligned}$$

DOI: [10.20535/S0021347020110023](https://doi.org/10.20535/S0021347020110023)

© А. Б. Коханов, С. В. Емельянов, Я. В. Деревягин, 2020

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. C. Zhang *et al.*, “Bidirectional 60-GHz rof system with multi-Gb/s *m*-QAM OFDM single-sideband modulation based on injection-locked lasers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 245–247, 2011, doi: [10.1109/LPT.2010.2096413](https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2096413).
2. Y. Zhu, X. Ruan, K. Zou, F. Zhang, “Beyond 200g direct detection transmission with nyquist asymmetric twin-SSB signal at C-band,” *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 17, pp. 3629–3636, 2017, doi: [10.1109/JLT.2017.2718098](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2718098).
3. X. Gao, Y. Cai, B. Xu, F. K. Deynu, K. Qiu, “Zero guard band multi-twin-SSB system in single fiber bidirectional pon transmission,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26814–26826, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2971538](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971538).
4. R. 1MA243, *Модуляция и Формирование Сигналов с Помощью Генераторов Сигналов Компании R&S. Rohde & Schwarz*, 2017.
5. Z. Li *et al.*, “Spectrally efficient 168 Gb/s/λ WDM 64-QAM single-sideband Nyquist-subcarrier modulation with Kramers–Kronig direct-detection receivers,” *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 6, pp. 1340–1346, 2018, doi: [10.1109/JLT.2017.2785858](https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2785858).
6. J. Benitez, M. Bolea, J. Mora, “High-performance low coherence interferometry using SSB modulation,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 1, pp. 90–93, 2017, doi: [10.1109/LPT.2016.2628963](https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2628963).

7. М. В. Верзунов, *Однополосная Модуляция в Радиосвязи*. Москва: Воениздат, 1972.

8. T. Maia, R. Ribeiro, P. Monteiro, "Impact of the modulation depth on self-homodyne optical single sideband systems," in *LEOS 2001. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (Cat. No. 01CH37242)*, vol. 2, pp. 675–676, doi: [10.1109/LEOS.2001.968994](https://doi.org/10.1109/LEOS.2001.968994).

9. Y. Zhou, J. Yu, Y. Wei, J. Shi, N. Chi, "Four-channel WDM 640 Gb/s 256 QAM transmission utilizing Kramers-Kronig receiver," *J. Light. Technol.*, vol. 37, no. 21, pp. 5466–5473, 2019, doi: [10.1109/JLT.2019.2943122](https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2943122).

10. M. M. Alhasani, Q. N. Nguyen, G.-I. Ohta, T. Sato, "A novel four single-sideband m-QAM modulation scheme using a shadow equalizer for MIMO system toward 5G communications," *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1944, 2019, doi: [10.3390/s19081944](https://doi.org/10.3390/s19081944).

11. И. В. Горбатый, "Исследование свойств устройств для формирования и обработки сигналов на основе амплитудной модуляции многих составляющих," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 61, № 10, с. 592–604, 2018, doi: [10.20535/S0021347018100047](https://doi.org/10.20535/S0021347018100047).

12. А. Б. Коханов, "Однополосная квадратурная модуляция," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 60, № 3, с. 123–131, 2017, doi: [10.20535/S0021347017030013](https://doi.org/10.20535/S0021347017030013).

13. Г. Б. Двайт, *Таблицы Интегралов и Другие Математические Формулы*. Москва: Наука, 1966.

14. Р. Лайонс, *Цифровая обработка сигналов*, 2nd ed. Москва: Бином-Пресс, 2011.

15. А. Б. Коханов, "Восстановление фазы когерентной несущей частоты цифровым фазовым фильтром," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 56, № 2, pp. 33–40, 2013, doi: [10.20535/S0021347013020039](https://doi.org/10.20535/S0021347013020039).

16. А. Б. Коханов, "Восстановление фазы когерентной несущей частоты при синхронном детектировании," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 55, № 2, с. 34–41, 2012, doi: [10.20535/S0021347012020033](https://doi.org/10.20535/S0021347012020033).

17. М. П. Долуханов, *Распространение Радиоволн. Учеб. для Вузов*. Москва: Связь, 1972.

18. Я. С. Выгодский, *Справочник По Элементарной Математике*. Москва: Высшая школа, 1966.

Поступила в редакцию 11.02.2020

После доработки 21.07.2020

Принята к публикации XX.11.2020