

ОДНОПОЛОСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ХАРТЛИ

Д. т. н. А. Б. Коханов, С. В. Емельянов, Я. В. Деревягин, А. С. Стрельцов,
Д. Г. Паску

Государственный университет «Одесская политехника»

Украина, г. Одесса

okokhanov@gmail.com

Разработан метод передачи сигналов с использованием однополосной амплитудной модуляции Хартли (SSBH), который позволяет увеличить дальность связи в радиоканале 1,41 раз по сравнению с SSB при одинаковой мощности излучения передатчиков и одинаковой чувствительности приемников для SSBH- и SSB-сигналов, что позволяет обеспечить энергетический выигрыш 6 дБ относительно SSB-модуляции.

Ключевые слова: однополосная амплитудная модуляция (SSB), однополосная амплитудная модуляция Хартли (SSBH), цифровая связь, модулятор, демодулятор.

Однополосная амплитудная модуляция с одной боковой полосой (single sideband — SSB) впервые была предложена в 1915 году Джоном Реншоу Карсоном и нашла широкое применение в радиосвязи и телекоммуникационных системах, а также в оптоволоконных системах передачи сигналов из-за эффективного использования спектра и мощности передатчика в канале связи. Недостатком при приеме сигнала SSB является необходимость точного восстановления фазы несущей частоты для синхронного детектирования, что требует передачи пилот-сигнала. Также возникают искажения SSB-сигнала при связи с подвижными объектами из-за доплеровского сдвига частот спектра сигнала.

В данной работе предлагается новый метод формирования и детектирования сигнала с однополосной амплитудной модуляцией Хартли [1] с использованием двух ортогональных несущих, а также функциональные схемы модулятора SSBH-сигнала [1] и синхронного детектора [2], который обеспечивает детектирование SSBH-сигнала при отсутствии передачи пилот-сигнала и при наличии доплеровского сдвига частоты сигнала.

Сигналы с SSBH-модуляцией нижней боковой полосы (LSBH) и верхней боковой полосы (USBH) можно представить, соответственно, в следующем виде

$$S_{LSBH}(t) = [A_n - gA_n] \cos(\omega_0 t) + [A_n + gA_n] \sin(\omega_0 t) = \sqrt{2} \sqrt{A_n^2 + gA_n^2} \sin(\omega_0 t + \psi_1), \quad (1)$$

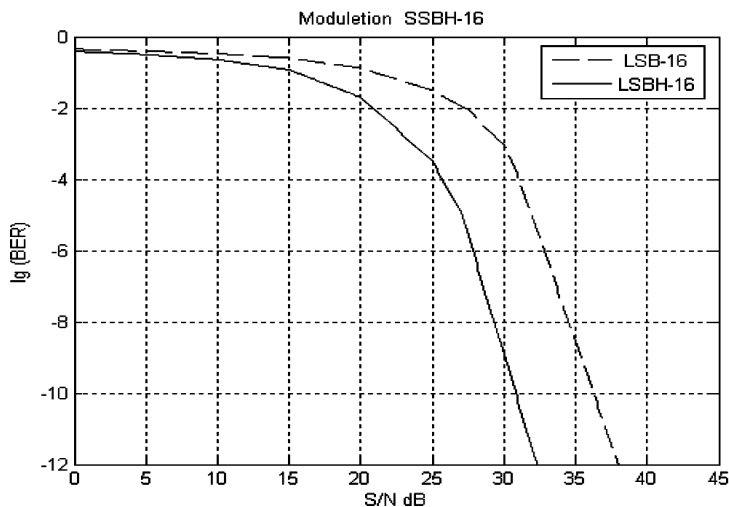
$$S_{USBH}(t) = [A_n + gA_n] \cos(\omega_0 t) + [A_n - gA_n] \sin(\omega_0 t) = \sqrt{2} \sqrt{A_n^2 + gA_n^2} \sin(\omega_0 t + \psi_2), \quad (2)$$

где $A_n = a_n \sin(\Omega t)$ — модулирующий сигнал; $gA_n = -a_n \cos(\Omega t)$ — сигнал, сопряженный по Гильберту с сигналом A_n ; $\psi_1 = \arcsin \frac{An + gAn}{\sqrt{A_n^2 + gA_n^2}}$; $\psi_2 = \arcsin \frac{An - gAn}{\sqrt{A_n^2 + gA_n^2}}$.

В состав модулятора входят четыре перемножителя, один сумматор, фильтр Гильберта, инвертор знака и коммутатор сигналов генератора (SW), что обеспечивает получение сигнала LSBH или USBH в соответствии с (1) или (2), а также две линии задержки на время τ (задержка сигнала, возникающая при прохождении сигнала через фильтр Гильберта).

Модель канала связи была выбрана в виде канала связи с аддитивным белым гауссовским шумом $W(t) = H(t) \cdot s(t) + n(t)$, где $s(t)$ — сигнал на входе канала связи, $H(t)$ — коэффициент передачи канала связи, $n(t)$ — аддитивный шумовой процесс. Поскольку стояла задача определить работоспособность и свойства SSBH-модуляции, а также устойчивость этого вида модуляции к шуму в канале связи (по сравнению с SSB-сигналом), то для простоты трактовки результатов моделирования модуль $H(t)$ был принят равным единице, а сдвиг фазы, вносимый каналом связи, приравнен к нулю. Преобразование Гильберта от входного сигнала $A_n = a_n \sin(\Omega t)$ выполнялось с использованием известно-

го метода быстрого преобразования Фурье. Это позволило при моделировании избежать временного сдвига (задержки) сигнала, который возникает при применении цифровых фильтров Гильберта в процессе цифровой обработки сигналов. Для модуляции использовался вариант шестнадцати уровневой однополосной амплитудной модуляции Хартли (SSBH-16), что соответствует четырем битам, приходящимся на один символ, и позволяет сузить спектр передаваемого символического потока по сравнению с битовым потоком в 4 раза. Расчет параметров сигнала производился исходя из скорости передачи сигнала STM1. Было также учтено увеличение скорости при передаче сигнала в $4/3$ раза, что приводит к некоторому расширению спектра SSBH-сигнала (соответствует использованию сверточного кодирования со скоростью $3/4$). При проведении моделирования устойчивости LSBH-сигнала к шуму в канале связи были получены зависимости вероятности появления ошибок (BER) от отношения сигнал/шум (S/N) для сигналов LSBH-16 и LSB-16 (нижняя боковая полоса SSB), которые приведены на рисунке. Полученные результаты показывают большую устойчивость к шуму в канале связи LSBH-сигналов по сравнению с применением LSB-сигналов, что подтверждает полученные в работе теоретические результаты.



Зависимость логарифма вероятности появления ошибки неправильно принятого бита (BER) от отношения сигнал/шум в канале связи для сигналов LSBH-16 и LSB-16

Использование SSBH-сигналов позволяет увеличить дальность связи в 1,41 раза (40%) и обеспечить энергетический выигрыш 6 дБ по сравнению с использованием сигналов с SSB-модуляцией. Сигналы с SSBH-модуляцией могут использоваться в радиостанциях для передачи сигналов бедствия или получения более устойчивой радиосвязи по сравнению с сигналами с SSB-модуляцией. SSBH-модуляцию также можно использовать для дальней связи в авиации, морском флоте, железных дорогах, коротковолновых системах связи, на автомобильном транспорте, военной связи, оптоволоконных системах. Так, например, при длине пролета современной магистральной оптоволоконной линии от 80 до 200 км увеличение будет примерно на 40% (от 132 до 280 км). Отсутствие излучения SSBH передатчиком при отсутствии модулирующего сигнала позволяет значительно снизить частотную заметность передаваемых сообщений и экономить заряд аккумулятора.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коханов А.Б., Емельянов С.В., Деревягин Р.В. Однополосная амплитудная модуляция Хартли. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, 2020, т. 63, № 11, с. 670–682.
2. Kokhanov A.B. Phase recovery of the coherent carrier frequency using digital phase filter. *Radioelectronics and communications Systems*, 2013, vol. 56, no. 2, p. 82–88.

A. B. Kokhanov, S. V. Emelianov, R. V. Dereviygin, A. S. Streltsov, D. G. Pusku

Single-band Hartley modulation

A method of signal transmission using single-sideband Hartley amplitude modulation (SSBH) has been developed. The method allows increasing the communication range in the radio channel by 1.41 times in comparison with SSB, provided that the radiation power of the transmitters and the sensitivity of the receivers for SSBH and SSB signals are the same. This makes it possible to achieve a gain of 6 dB relative to SSB modulation.

Keywords: single sideband amplitude modulation (SSB), single sideband Hartley amplitude modulation (SSBH), digital communication, modulator, demodulator.