

УДК 004.2

**HARTLEY AMPLITUDE MODULATION
АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ХАРТЛИ****Kokhanov A.V. / Коханов А.В.**
d.t.s., prof. / д.т.н.

ORCID: 0000-0002-7197-6380

Startsev V.I. / Старцев В.И.
*Ph.D, ass. prof./к.т.н.***Yemelianov S.V. / Емельянов С.В.**
*as.prof. / ст. препод.***Dereviagin Y.V. / Деревягин Я.В.**
*as.prof. / ст. препод.***Pascu D.G. / Паску Д.Г.**
*as.prof. / ст. препод.***Barabanjv N. A. / Барабанов Н.А.**
as.prof. / ст. препод.

Odessa National Politechnic University,

Odessa, Shevchenko av., 1, 65044

Національний університет «Одеська політехніка»,

Одеса, пр. Шевченка, 1, 65044

Аннотация. Разработан новый вид модуляции — амплитудная модуляция Хартли (АМХ), которая отличается наличием двух ортогональных составляющих амплитудно-модулированного сигнала, что позволяет увеличить коэффициент полезного действия АМХ до 90 % по сравнению с 33% обычной амплитудной модуляции (АМ) при максимальном значении индекса модуляции $M=1$. Показано, что АМХ модуляция обеспечивает энергетический выигрыш 6 дБ, что позволяет увеличить дальность связи в два раза по сравнению с использованием АМ при прочих равных условиях передачи и приема сигналов.

Ключевые слова: амплитудная модуляция, амплитудная модуляция Хартли, сигналы.

Abstract. A new type of modulation has been developed - Hartley amplitude modulation (AMH), which is distinguished by the presence of two orthogonal components of the amplitude-modulated signal, which allows increasing the efficiency of AMX up to 90% compared to 33% of conventional amplitude modulation (AM) at the maximum value of the modulation index $M=1$. It is shown that AMX modulation provides an energy gain of 6 dB, which makes it possible to double the communication range compared to the use of AM, all other things being the same conditions for transmitting and receiving signals.

Key words: Amplitude modulation, Hartley amplitude modulation, signal.

АМ модуляция широко применялась и продолжает использоваться в настоящее время, но в значительно уменьшенных масштабах. АМ модуляция может быть выполнена с помощью достаточно дешевого оборудования, что делало ее востребованной.

Основным недостатком амплитудной модуляции является ее низкий коэффициент полезного действия (КПД), который равен 33% [4] при максимальном индексе модуляции M равном единице, а так же то, что максимальная мощность в передатчике АМ сигнала в два раза превышает среднюю мощность сигнала за период.

Сигнал с амплитудной модуляцией Хартли (АМХ, АМН) имеет вид

$$\begin{aligned}
 S(t) &= A_0 \cos(\omega_0 t) + M A_0 \cos(\Omega t + \theta) \cos(\omega_0 t + \varphi) + \\
 &\quad + M A_0 \cos(\theta t + \varphi_0) \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\
 &= A_0 \cos(\omega_0 t) + \sqrt{2} A(t) M \cos \left[\frac{\pi}{4} - (\omega_0 t + \varphi) \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $A(t) = A_0 \cos(\Omega t + \theta)$ — модулирующий сигнал с частотой Ω и начальной фазой θ ,

$M = \frac{A_M}{A_0}$ — коэффициент модуляции,

A_M — максимальное значение амплитуды модулирующего сигнала,

A_0 — максимальное значение амплитуды модулируемого сигнала (несущей частоты),

φ — начальная фаза сигнала несущей частоты.

В (1) и далее используются тождества

$$\sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi}{4} - a \right) = \cos(a) + \sin(a); \quad \sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} - a \right) = \cos(a) - \sin(a). \quad (2)$$

В случае применения цифровой амплитудной модуляции (ASK — amplitude shift keying), модулирующий сигнал $A(t) = A_0 \cos(\Omega t + \theta)$ будет представлен значением символа $A(t) = A_n$ на символьном интервале длительностью во времени T , где A_n — m -уровневый сигнал ($m = 2^k, k = 1, 2, 3, \dots$), n — номер символьного интервала.

Полагая мощности передатчиков АМ и АМХ сигналами одинаковыми (по информационным составляющим сигналов), необходимо уравнивать амплитуду выходного сигнала АМХ до уровня сигнала АМ [2]. После уравнивания амплитуды сигнал АМХ будет иметь вид

$$S(t) = \left[\frac{A_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0 t) + A(t) M \cos \left(\frac{\pi}{4} - \omega_0 t - \varphi \right) \right]. \quad (3)$$

Сопряженный по Гильберту сигнал сигналу $S(t)$ будет иметь вид [4]

$$B(t) = \left[\frac{A_0}{\sqrt{2}} \sin(\omega_0 t) + A(t) M \sin \left(\frac{\pi}{4} - \omega_0 t - \varphi \right) \right]. \quad (4)$$

Для анализа общих свойств модулированных сигналов используют комплексную огибающую модулированного сигнала

$$\dot{G}(t) = S(t) + jB(t) \quad (5)$$

После прохождения канала связи к сигналу (3) добавится шумовая составляющая случайного процесса в виде аддитивного белого гауссовского шума мощностью $N_{AMX} = n^2(t)$, где $n(t)$ — амплитуда шума случайного процесса.

Демодуляция сигнала (3) осуществляется синхронным квадратурным детектором. В этом случае сигнал в сумме шумом $n(t)$ будет иметь вид в синфазном канале

$$S_S(t) = \left[\frac{A_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0 t + \varphi) + A(t)M \cos\left(\frac{\pi}{4} - \omega_0 t - \varphi\right) + n(t)/2 \right] \cos(\omega_0 t) = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0 t + \varphi) \cos(\omega_0 t) + [A(t)M \cos\left(\frac{\pi}{4} - \omega_0 t - \varphi\right) + n(t)/2] \cos(\omega_0 t), \quad (6)$$

и в квадратурном канале

$$S_Q(t) = \left[\frac{A_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0 t + \varphi) + A(t)M \cos\left(\frac{\pi}{4} - \omega_0 t - \varphi\right) + \frac{n(t)}{2} \right] \sin(\omega_0 t) = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega_0 t + \varphi) \sin(\omega_0 t) + [A(t)M \cos\left(\frac{\pi}{4} - \omega_0 t - \varphi\right) + n(t)/2] \sin(\omega_0 t). \quad (7)$$

Так как перед синхронным детектором работает система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) то, для упрощения расчетов, можно положить $\varphi = 0$, что не влияет на конечный результат. В этом случае, после устранения постоянной составляющей и суммирования сигналов (6) и (7) с последующей фильтрацией суммарного сигнала фильтром нижних частот (ФНЧ) с частотой среза Ω , на выходе ФНЧ будет сигнал

$$S_S(t) = \frac{2\sqrt{2}A(t)M}{4} + n(t)/2 \cos(\omega_0 t) + n(t)/2 \sin(\omega_0 t) = \sqrt{2}A(t)M/2 + \widehat{n}_1(t) + \widehat{n}_2(t) \quad (8)$$

Полагая равными мощности шума [2] с амплитудами $\widehat{n}_1(t) = \widehat{n}_2(t)$ и учитывая, что при синхронном детектировании происходит когерентное суммирование шумов сигнала (1.7), то суммарное значение амплитуд шума будет в корень из двух раз меньше [2], то есть (8) примет вид

$$S_{out}(t) = \sqrt{2}A(t)M/2 + \frac{\widehat{n(t)}}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

После приведения сигнала (9) к динамическому диапазону сигнала $A(t)$ окончательно получим выражение для сигнала АМХ на выходе синхронного детектора в виде

$$S_{AMH}(t) = \frac{A(t)M}{2} + \frac{\widehat{n(t)}}{2}. \quad (10)$$

На рисунке 1 приведены для сравнения временные диаграммы сигналов АМХ16 и АМ16

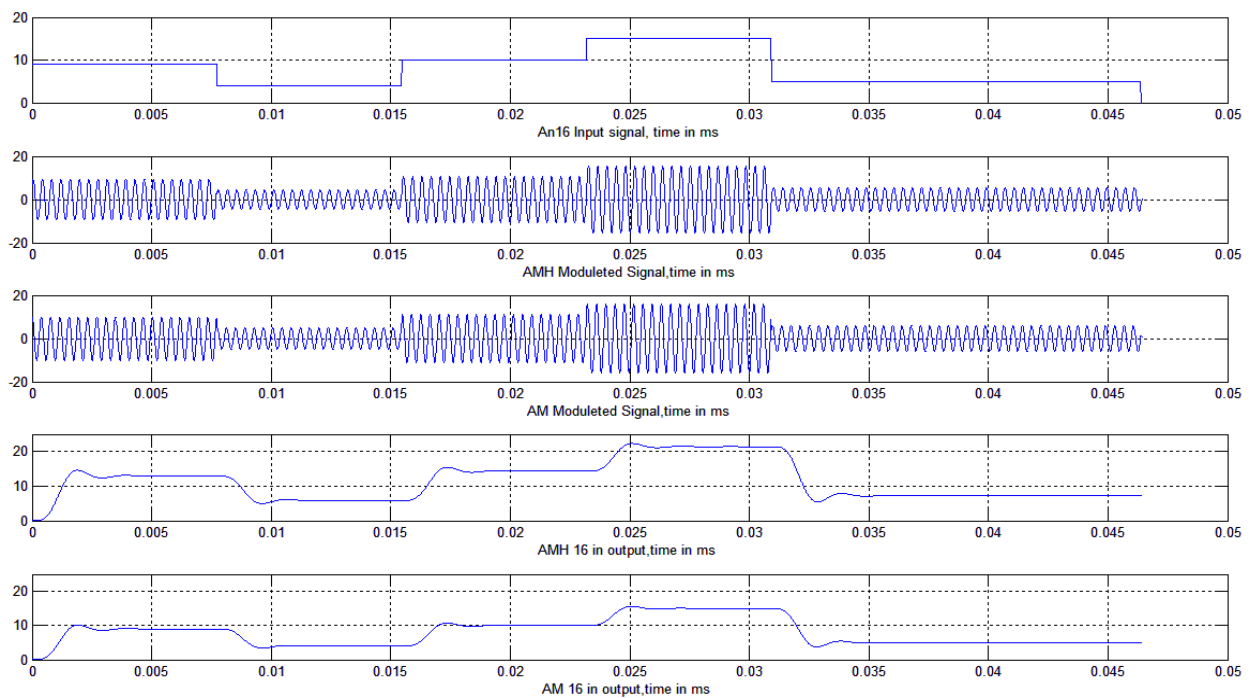


Рисунок 1 — Временные диаграммы сигналов AMX16 и AM16 сигналов.

AM16: (сверху вниз) модулирующий шестнадцатиуровневый сигнал (сформированный из случайной последовательности 0 и 1 битового потока данных, здесь и далее), AMX16 модулированный сигнал, AM16 модулированный сигнал, демодулированный AMX16 сигнал, демодулированный AM16 сигнал. Из диаграмм, которые приведены на рисунке 1 видно, что амплитуда размаха модулированных сигналов AMX16 и AM16 сигналов одинаковы, что соответствует одинаковой выходной мощности передатчиков.

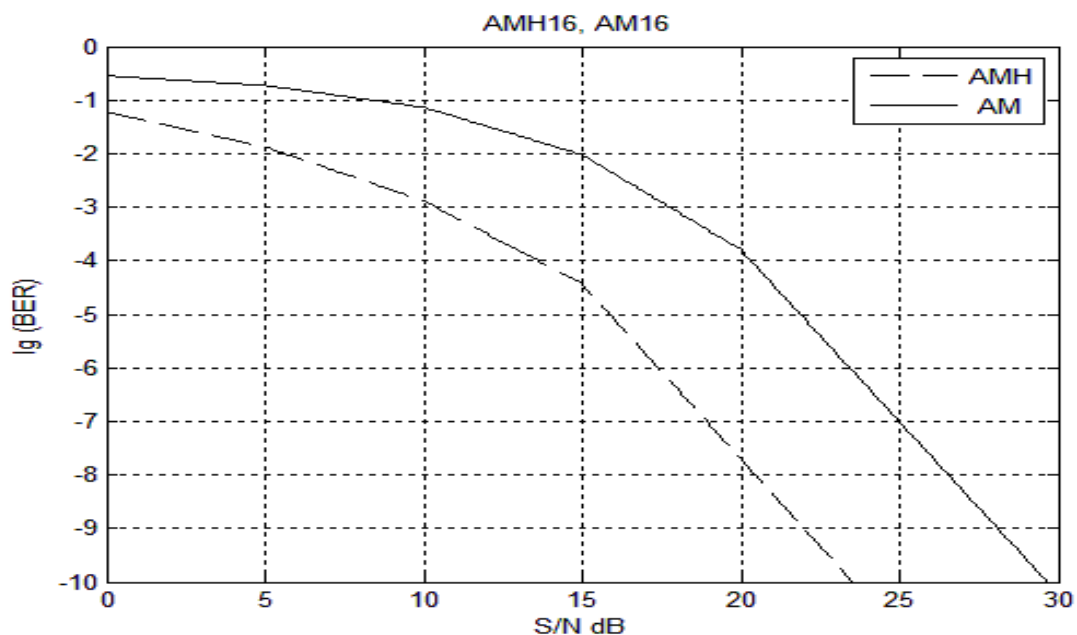


Рисунок 2 — Зависимости вероятности появления ошибки неправильно принятого бита для цифровых модуляций AMH16 и AM16 [2].

На рисунке 2 представлены зависимости вероятности появления ошибки неправильно принятого бита (BER — Bit Error Rate) от отношения сигнал/шум, которые получены в результате моделирования.

Из рисунка 2 видно, что при одинаковом значении ошибки (BER) отношение сигнал/шум при детектировании АМХ сигнала на 6 дБ (в 2 раза) меньше чем для АМ сигнала, что позволяет утверждать, что АМХ обеспечивает больший энергетический выигрыш по сравнению с традиционной АМ.

Пиковая мощность АМХ сигнала (при $M=1$) равна $1,25 A_0^2$ против $P_{PAM} = 2 A_0^2$ для АМ, что позволяет утверждать о большей эффективности АМХ по сравнению с АМ [2].

Коэффициент полезного действия (КПД) η АМХ модуляции (при $M=1$) примет значение равное $\frac{4}{5}$, (равно 0,8), т.е. **80%** против 33% для сигнала с амплитудной модуляцией (АМ), что указывает на большую энергетическую эффективность АМХ по сравнению с АМ [2]. При уменьшении амплитуды несущей частоты сигнала АМХ до уровня $\frac{A_0}{2} \cos(\omega_0 t)$ КПД АМХ сигнала возрастет до **90%**.

Высокий КПД позволяет использовать АМХ вместо АМ на длинных, средних и коротких волнах для передачи информации на большие расстояния (в отличии от УКВ) с эффективностью практически равной угловой модуляции, а также в качестве измерительных сигналов (например, в системах посадки самолетов ILS, приводных маяках и т.д.) более эффективно чем с применением сигналов АМ.

Література:

1. Efficient 60-GHz Power Amplifier With Adaptive AM-AM and AM-PM Distortions Compensation in 65-nm CMOS Process / Kyung Pil Jung; Hyuk Su Son, Joon Hyung Kim; Chul Soon Park / IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques - Vol. 68, № 7 (2020), p. 3045 – 3055.

2. Амплитудная модуляция Хартли/Коханов А. Б., Известия вузов. Радиоэлектроника – Т.65, № 6 (2022). DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347022060036>

Статья отправлена: 12.05.2023 г.

© Коханов А.Б.