

УДК 621.391

Управление параметрами сигналов с амплитудной манипуляцией в радиолиниях морской подвижной службы

Control of signal parameters amplitude keypad in maritime mobile service radio links

Павлов / Pavlov A.

Андрей Александрович
(practicdsv@yandex.ru)
АО «НТИ «РАДИОСВЯЗЬ»,
генеральный директор.
г. Санкт-Петербург

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Сергеевич
(dvornik92@mail.com)
кандидат технических наук, доцент.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), старший преподаватель кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств.
г. Санкт-Петербург

Кондрашин / Kondrashin A.

Александр Евгеньевич
(Kondrashinae@agat-rosocosmos.ru)
кандидат технических наук.
Единый отраслевой закупочный центр
АО «Организация «Агат»,
директор.
г. Москва

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Викторович
(practicdsv@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор.
ГУАП, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: сигналы амплитудной манипуляции – amplitude-shift keying signals; управление уровнем несущего колебания – carrier oscillation level control; энергетический выигрыш – energy gain; помехоустойчивость приема – reception noise immunity.

Предложен способ управления уровнем несущего колебания сигналов амплитудной манипуляции. Рассмотрен механизм его реализации и представлена структурная схема синтеза на основе квадратурного модулятора. Обоснован энергетический выигрыш формируемой сигнальной конструкции по отношению к традиционному подходу. Представлены результаты оценки полученного технического решения.

A method for controlling the level of carrier oscillations of signals from amplitude manipulation is proposed. The mechanism of its implementation is considered and a block diagram of synthesis based on a quadrature modulator is presented. The energy gain of the formed signal structure in relation to the traditional approach is substantiated. The results of evaluation of the obtained technical solution are presented.

Введение

Регламентом Радиосвязи по согласованию с комитетом Глобальной морской системы связи при бедствии и обеспечении безопасности мореплавания, диапазон частот от 1,605 до 4,0 МГц, определенный как диапазон промежуточных волн, активно используется морской подвижной службой для организации управления морским движением на средних расстояниях в пределах 150 – 200 морских миль [1, 2]. В указанном диапазоне частот основным видом модуляции является однополосная модуляция (ОМ) (в англ. варианте: *SSB – Single Side Band*) с сохранением несущего колебания (в англ. варианте: *Full*), частично ослабленной несущей (в англ. варианте: *Reduced*) и полностью подавленной (в англ. варианте: *Suppressed*) [3]. При этом последняя разновидность сигналов ОМ выступает основой для формирования основного класс излучения J3E [4, 5], используемого в морской подвижной службе.

В свое время указанный выбор был сделан исходя из особенностей формирования сигналов ОМ из

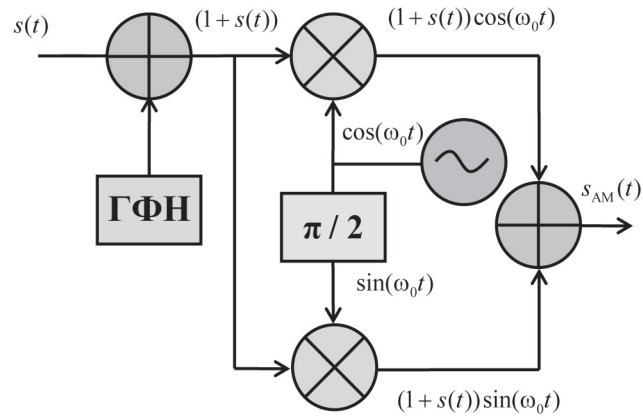


Рис. 1. Структурная схема квадратурного модулятора сигналов АМ $s_{AM}(t)$

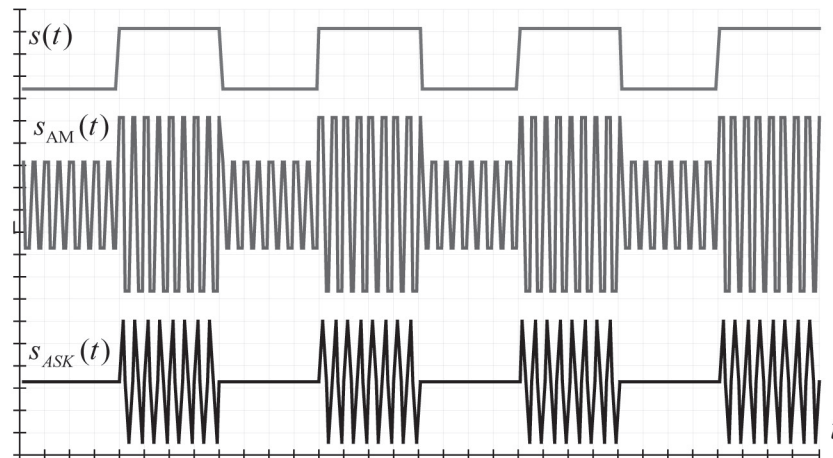


Рис. 2. Временное представление формируемых сигналов

сигналов амплитудной модуляции путем соответствующей фильтрации верхней или нижней полосы частот, занимаемой информационным контентом [6, 7]. Вместе с тем развитие методов квадратурного синтеза открыло новые возможности повышения помехоустойчивости приема сигналов амплитудной модуляции [8-10]. Так, в настоящей статье представлены результаты разработки структуры модулятора сигналов амплитудной манипуляции (АМ) с управляемым уровнем несущего колебания.

Особенности синтеза сигналов АМ

В настоящее время основным способом формирования сигналов АМ является квадратурный синтез [4, 11], применение которого стало возможным благодаря развитию цифровых технологий.

В общем случае сигнал АМ можно представить посредством следующего выражения:

$$s_{AM}(t) = [1 + m_{AM}s(t)]\cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

где m_{AM} – индекс амплитудной модуляции, определяющий глубину модуляции; $s(t)$ – модулирующий сигнал; $\omega_0 = 2\pi f_0$, а f_0 – рабочая частота несущего колебания.

И если классический квадратурный синтез основан на предварительном представлении модулирующего сигнала к аналитическому виду [12, 13], то при синтезе сигналов АМ достаточно лишь ортогонального преобразования несущего колебания.

И тогда, полагая $m_{AM} = 1$, можно записать:

$$\begin{aligned} s_{AM}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}[1 + s(t)]\cos(\omega_0 t) + \frac{1}{\sqrt{2}}[1 + s(t)]\sin(\omega_0 t) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}[1 + s(t)][\cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Структурную схему синтеза сигнала, в соответствии с формулой (2), можно представить согласно рис. 1. Следует отметить, сигналы АМ, формируемые посредством квадратурного синтеза, отлича-

ются по своей структуре от так называемых сигналов АСК (*Amplitude Shift Keying*) [14, 15], формируемых посредством перемножения несущего колебания и манипулирующей последовательности

$$s_{ASK}(t) = s(t)\cos(\omega_0 t). \quad (3)$$

Так, на рис. 2 представлены исходная манипулирующая последовательность в виде меандра $s(t)$ и сигналы, сформированные на основе реализации технических процедур в соответствии с формулой (2) $s_{AM}(t)$ и (3) $s_{ASK}(t)$.

На рис. 1 введены следующие обозначения: ГФН – генератор формирования напряжения единичного уровня; $\pi/2$ – фазовращатель, обеспечивающий формирование ортогонального колебания.

Анализ результатов, представленных на рис. 2, указывает на существенные различия в структуре синтезируемых сигналов на основе выражений (2) и (3). Очевидно, что сигнал $s_{ASK}(t)$ имеет более ярко выраженную временную структуру, особенностью которой является полное отсутствие излучений при передаче, в частности, логического нуля. С одной стороны это увеличивает контрастность различий символов, отвечающих за передачу противоположных битов, а с другой – отсутствие излучений ведет к повышению пик-фактора [16, 17], представляющего собой отношение пиковой амплитуды сигнала U_{Π} к его среднеквадратичному значению $U_{СК}$

$$\Pi = U_{\Pi} / U_{СК}. \quad (4)$$

Указанные факторы не самым благоприятным образом отразятся на работе передатчика [18]. Так, на рис. 3 представлены спектры сигналов $s_{AM}(t)$ и $s_{ASK}(t)$, соответственно $S_{AM}(f)$ и $S_{ASK}(f)$.

Вместе с тем проведенный анализ спектров $S_{AM}(f)$ и $S_{ASK}(f)$ показал, что при равенстве энергетике E_1^{ASK} и E_1^{AM} , приходящейся на первые гармоники f_1^{ASK} и f_1^{AM} рассматриваемых сигналов, энергия, приходящаяся на несущие колебания E_0^{ASK} и E_0^{AM} , существенно различается. Так, $(E_1^{AM})^2 / (E_1^{ASK})^2 = 0,995$, в то время, как $(E_0^{AM})^2 / (E_0^{ASK})^2 = 9,19$.

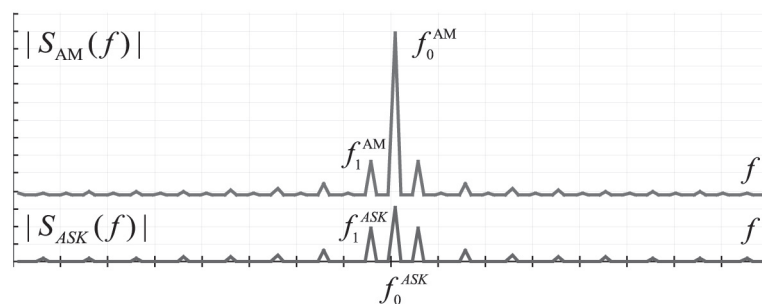


Рис. 3. Спектральное представление формируемых сигналов

Таким образом можно заключить, что сигналы $S_{AM}(f)$ обладают существенным потенциалом для повышения помехоустойчивости их приема за счет перераспределения энергии между частотными компонентами его спектра.

Предложения по перераспределению энергии между частотными компонентами спектра

Анализ аналитического представления сигнала $s_{AM}(t)$, сформированного методом квадратурного синтеза, показал, что основная энергия спектральных составляющих определяется средним значением нормированного значения амплитуды манипулирующего сигнала $s(t)$, которое удовлетворяет условию

$$\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \leq 1, \quad (5)$$

где T – длительность сигнала.

Но так как общая энергия сигнала остается постоянной, то изменение правой части условия, например ее уменьшение, приведет к изменению и левой его части, но уже к ее увеличению [19, 20]. С учетом сделанных замечаний введем новый параметр m_0 – индекс регулировки уровня несущего колебания, и перепишем выражение (2) к виду

$$s_{AM}(t, m_0) = \frac{1}{\sqrt{2}} [m_0 + s(t)] [\cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t)]. \quad (6)$$

В результате изменение значение параметра m_0 приведет к изменению энергетической структуры и формируемого сигнала. В качестве примера на рис. 4 представлены спектры сигнала $s_{AM}(t, m_0)$ при $m_0 = 1$, $m_0 = 0,7$, $m_0 = 0,1$.

Практические результаты подтвердили гипотезу о возможности регулирования уровня несущего колебания при изменении величины индекса m_0 . Следует отметить, что при изменении уровня несущего колебания энергия боковых (информационных компонентов) остается неизменной. И при $m_0 = 0$ сигнал $s_{AM}(t, m_0)$ вырождается в сигнал $s_{ASK}(t)$.

В таблице 1 представлены результаты исследования снижения амплитуды спектральной компоненты несущего колебания в зависимости от значения индекса регулировки уровня несущего колебания.

В таблице 1 значение величины δ рассчитывается как

$$\delta = \frac{M E_0}{E_0}, \quad (7)$$

где $M E_0$ – энергия спектральной компоненты несущего колебания сигнала $s_{AM}(t, m_0)$; E_0 – энергия спектральной компоненты несущего колебания сигнала $s_{AM}(t)$.

Таблица 1

Зависимость уровня несущего колебания в спектре сигнала амплитудной модуляции от значения параметра m_0

m_0	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
δ	1	0,87	0,75	0,64	0,54	0,45	0,37	0,29	0,22	0,17	0,12

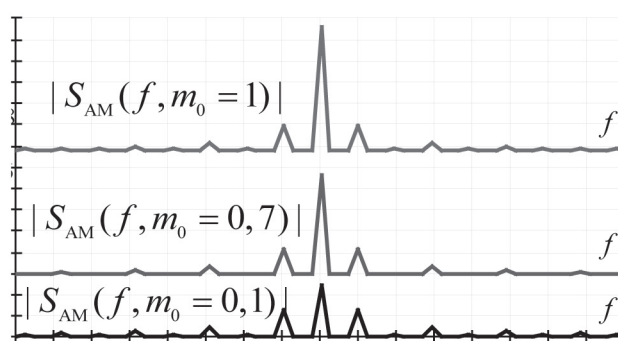


Рис. 4. Спектральное представление сигналов с регулируемым уровнем несущего колебания

Согласно полученным результатам функция $\delta(m_0)$ является нелинейной, что не позволяет напрямую получить значение энергетического выигрыша при переходе к сигналу вида $s_{AM}(t, m_0)$.

Однако, полученные в [4, 21] результаты позволяют утверждать, что на несущее колебание приходится 2/3 общей энергии сигнала. Следовательно, переход к сигналам $s_{AM}(t, m_0)$ с учетом того, что при $m_0 = 0$ на остаток спектральной составляющей несущего колебания $s_{AM}(t, m_0)$ будет приходиться всего 12%, то энергетика информационного контента боковых полос возрастет более чем в 1,76 раз, что эквивалентно повышению помехозащищенности линии радиосвязи на 2,45 дБ.

Очевидно, что сигналы $s_{AM}(t, m_0)$ в общем случае уступают по помехоустойчивости сигналам SSB. Но при этом следует учитывать, что отсутствие пилот-сигнала требует высокой линейности трактов обработки и высокостабильных дорогих опорных генераторов [22]. Именно по этой причине сигналы SSB практически не используются в переносных и портативных радиостанциях. А широко используемые для связи с быстро движущимися объектами сигналы АЗА-А1 (сигналы однополосной модуляции с верхней боковой и 10 % остатком несущей) и сигналы АЗА-В1 (сигналы однополосной модуляции с нижней боковой и 10 % остатком несущей) [23] по своим энергетическим параметрам сопоставимы с сигналом $s_{AM}(t, m_0)$ при $m_0 = 0$ и условии того, что информационный контент будет передаваться лишь в одной из боковых полос. Но даже без применения процедур перераспределения информационного контента, $s_{AM}(t, m_0)$ превосходят по помехоустойчивости приема сигналы однополосной модуляции АЗН-А₁ и АЗН-В₁, у которых сохранено 70 % несущей.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что переход к сигналам АМ с регулируемым уровнем несущего колебания позволяет повысить помехоустойчивость линий радиосвязи морской подвижной службы порядка 2,5 дБ. При этом в отличие от сигналов АСК, характеризующихся изначально высоким показателем пик-фактора (и как результат расширением спектра), предлагаемые конструкции позволяют адаптивно подстраивать спектр формируемого сигнала под имеющийся канал. Дальнейшие исследования авторы связывают с возможностью управления верхней и нижней боковыми полосами разработанной конструкции сигнала в зависимости от содержания информационного контента. А также применения методов совместной частотно-временной обработки сигналов на приеме [24-27].

Литература

1. Афонин, И. Л. Повышение эффективности проведения аварийно-спасательных работ на море с помощью теле-

коммуникационных систем / И.Л. Афонин, А.Л. Поляков // Теория и практика проектного образования. – 2022. – № 1 (21). – С. 20–24.

2. Barzdun, V. Global Maritime Distress and Safety System / V. Barzdun, V. Timofeev, I. Shirokov // Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies. – 2022. – No. 1. – P. 154–157.

3. Грошева, Л. С. Исследование элементов судовой приемопередающей аппаратуры на базе сигнального процессора TMS320C5510 / Л.С. Грошева, Т.В. Гордяскина // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 63. – С. 40–47.

4. Дворников, С. В. Помехоустойчивость сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания / С.В. Дворников, С.С. Дворников, К.Д. Жеглов // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 261–288.

5. Кулинич, А. И. Судовые ВЧ-радиоустановки – единственное средство дальней связи в морском районе А4 ГМССБ (Арктическом бассейне России) / А.И. Кулинич, А.В. Припотнюк, Ю.М. Устинов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 201–210.

6. Дворников, С. В. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных частотно-временных распределений / С.В. Дворников // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 2. – С. 7–11.

7. Шадрин, Б. Г. Метод повышения скорости передачи данных в системах КВ-радиосвязи и его реализация (часть 1) / Б.Г. Шадрин, В.А. Дворянчиков, Б.С. Боганков // Техника радиосвязи. – 2020. – № 4 (47). – С. 7–22.

8. Предложения по формированию сигналов квадратурной манипуляции с повышенной помехоустойчивостью / С.В. Дворников, С.В. Мичурин, С.С. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2020. – № 2. – С. 90–98.

9. Манаенко, С. С. Теоретические аспекты формирования сигнальных конструкций сложной структуры / С.С. Манаенко, С.В. Дворников, А.В. Пшеничников // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 68–94.

10. Оценка степени приближения информационной системы к границам Шеннона путем использования оптимальных по критерию максимальной концентрации энергии в полосе частот сигналов / А.С. Овсянникова, С.Б. Макаров, С.В. Завьялов, С.В. Волвенко // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 1. – С. 5–22.

11. Дворников, С. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 221–228.

12. Частотно-временное оценивание параметров сигналов на основе функций огибающих плотности распределения их энергии / С.В. Дворников, Е.Ю. Бородин, Х. Маджар, Ю.Х. Махлуф // Информация и Космос. – 2007. – № 4. – С. 41–45.

13. Зиатдинов, С. И. Формирование аналитического сигнала с заданной начальной фазой / С.И. Зиатдинов //

- Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 53–56.
14. Дворников, С. В. Предложения по демодуляции сигналов ASK в каналах с замираниями / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, Д.Ю. Гордиенко // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 10–15.
15. Суржиков, В. Ф. Физическое моделирование цифровых каналов СВЧ-связи с бинарным амплитудно-манипулированным сигналом в среде MATLAB / В.Ф. Суржиков, А.В. Компанийцев // Мир науки, культуры, образования. – 2022. – № 1 (92). – С. 119–122.
16. Жила, А. В. Оценка эффективности применения ограничения на пик-фактор излучаемых колебаний при синтезе оптимальных спектрально-эффективных сигналов / А.В. Жила, А.С. Овсянникова, С.В. Завьялов // СПбНТОРЕС: труды ежегодной НТК. – 2020. – № 1 (75). – С. 119–122.
17. Дворников, С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений / С.В. Дворников. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2007. – 268 с.
18. Бузов, А. Л. Методы снижения пик-фактора в радиовещательных передатчиках стандарта DRM / А.Л. Бузов, К.Ю. Морозов // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, № 6 (7). – С. 24–29.
19. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость сигналов квадратурной амплитудной манипуляции / С.В. Дворников, А.А. Устинов, А.А. Русин [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
20. Брюханов, Ю. А. Влияние гармонической помехи на прием сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией / Ю.А. Брюханов, С.С. Поелуев, В.С. Надин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2022. – Т. 76, № 9. – С. 66–72.
21. Вешкурцев, Ю. М. Исследование помехоустойчивости модема цифровых систем с амплитудной манипуляцией при работе в канале с гауссовым шумом / Ю.М. Вешкурцев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 9. – С. 21–26.
22. Довбня, В. Г. Влияние качества функционирования гетеродинов на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией / В.Г. Довбня, Д.С. Коптев // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 9 (17). – С. 40–48.
23. Вагин, С. В. Однополосная модуляция / С.В. Вагин // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2016. – № 10-2. – С. 114–116.
24. Дворников, С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) / С.В. Дворников // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 47–60.
25. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии / С.В. Дворников, В.К. Железняк, В.Ф. Комарович, Р.Н. Храмов // Информация и Космос. – 2005. – № 4. – С. 13–16.
26. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации / А.А. Алексеев, В.А. Аладинский, В.К. Железняк [и др.] // Научное приборостроение. – 2001. – Т. 11, № 1. – С. 65–76.
27. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией / С. В. Дворников, А. А. Погорелов, М. А. Вознюк, Р. В. Иванов // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 32–35.