

КВАДРАТУРНАЯ МОДУЛЯЦИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА АМ В РАДИОВЕЩАНИИ И СВЯЗИ

QUADRATURE MODULATION AS AN ALTERNATIVE OF AM IN BROADCASTING AND COMMUNICATIONS

В статье предложена новая система радиовещания в диапазонах ДВ, СВ и КВ, основанная не на традиционной амплитудной модуляции (АМ), а на квадратурной (КАМ). Показано, что при равной излучаемой мощности эффективность передатчиков с КАМ и их радиус действия возрастает в несколько раз. Приемники рекомендовано выполнять по гетеродинной схеме с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). Они обеспечивают лучшую селективность, помехоустойчивость и качество демодуляции сигнала.

Ключевые слова: радиовещание, квадратурная модуляция, гетеродинный приемник, фазовая автоподстройка.

The paper proposed a new broadcasting system in the LW, MW and SW bands, based not on the traditional amplitude modulation (AM), but on the quadrature modulation (QAM). It is shown that at the equal transmitted power the efficiency of transmitters with QAM and their range increase by several times. The receivers are recommended to carry on the heterodyne scheme with phase-locked loop (PLL). They provide better selectivity, noise immunity and signal quality demodulation.

Keywords: broadcasting, quadrature modulation, heterodyne receiver, phase locked loop.

Актуальнейшей проблемой в настоящее время является обеспечение информацией всего населения страны, особенно в отдаленных и труднодоступных районах Сибири, Дальнего Востока и Севера. Другой, не менее важной, проблемой является оповещение населения на случай природных или техногенных катастроф или других чрезвычайных ситуаций.

Обе эти проблемы решаются успешно при внедрении новой системы радиовещания, основанной не на традиционной амплитудной модуляции (АМ), а на квадратурной амплитудной модуляции (КвАМ, КАМ, или QAM). Новое – хорошо забытое старое, и все узлы предлагаемой системы давно известны и практически отработаны. Однако, собранные вместе, они могут дать неожиданный и замечательный результат: энергетическая эффективность АМ-радиостанции повышается в разы (при тех же мощности передатчика и полосе частот в эфире), а соот-

ветственно, повышается и дальность действия. Приемники (а они должны быть синхронными) получаются проще, чем существующие, а воспроизводимый ими сигнал – качественнее.

Что такое КАМ? При КАМ амплитудный и энергетический спектры сигнала такие же, как и в обычной АМ, – они содержат несущую частоту и две боковые полосы, соответствующие звуковому модулирующему сигналу (рис. 1). Разница лишь в том, что фаза несущей сдвинута на 90° относительно фазы боковых полос. Эта, казалось бы, незначительная разница радикально меняет вид сигнала.

Пояснить это проще всего с помощью векторных диаграмм. Синусоидальный сигнал удобно представить в виде вращающегося вектора длиной (амплитудой) A и полной фазой φ , где $\varphi = \omega t$, а ω – угловая скорость вращения, $\omega = 2\pi f$ (рис. 2а). Проекции вектора на оси x и y дают колебания $A\cos\omega t$ и $A\sin\omega t$, соответственно. Рассматривать вращающийся вектор, конечно, неудобно, но здесь помогает простой прием. Представим, что мы вращаемся вместе с вектором с

¹ Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры ТСиИБ факультета ИСиКТ АНО ВО «Российский новый университет».



Рис. 1

той же самой угловой скоростью, тогда он будет казаться нам неподвижным. Кстати, этот прием полностью соответствует синхронному детектированию сигнала.

Рассмотрим векторы АМ-сигнала. При модуляции чистым тоном с частотой F сигнал есть сумма трех векторов: несущей с частотой f_0 и двух боковых с частотами $f_0 \pm F$. Поскольку мы вертимся с частотой несущей, этот вектор OA (показан утолщенной стрелкой на рис. 2б) будет неподвижным. Его длина постоянна и соответствует амплитуде несущей A .

Векторы боковых полос (тонкие стрелки) будут вращаться с частотой F , один влево, другой вправо относительно вектора несущей. Их сумма дает вектор модуляции АМ, всегда направленный по линии вектора несущей. Но его длина и направление непостоянны, он направлен то вверх от точки A (когда векторы боковых полос «смотрят» вверх), то равен нулю (когда векторы боковых полос «смотрят» влево и вправо), то вниз от точки A (когда векторы боковых полос «смотрят» вниз). Соответственно меняется и амплитуда модулированного сигнала (вектор OM). Совершенно очевидно, что вектор модуляции АМ не должен быть длиннее вектора OA , иначе наступит перемодуляция, которая приводит к очень сильным искажениям. Другими словами, суммарная амплитуда двух боковых полос не должна превосходить амплитуды несущей. При 100% модуляции амплитуда сигнала изменяет-

ся от нуля до $2A$ – осциллограмма амплитудно-модулированного сигнала всем хорошо известна.

Посмотрим теперь на векторную диаграмму при КАМ (рис. 2в). Сдвиг фазы несущей на 90° означает такой же поворот вектора OA . Вектор модуляции АМ остался без изменений и по-прежнему колеблется вдоль вертикальной линии в такт со звуковым сигналом. Но вектор модулированного сигнала OM теперь меняет направление, т.е. приобретает фазовую модуляцию (ФМ)! Более того, при малых индексах модуляции (тихих звуках, когда длина вектора АМ мала) КАМ и ФМ практически неразличимы. Амплитудная модуляция у КАМ-сигнала (в отличие от ФМ) имеется, но она весьма своеобразна.

Заметим, что на положительной полуволне звукового сигнала вектор OM отклоняется вверх (рис. 2в), а на отрицательной – вниз. Амплитуда КАМ-сигнала (длина вектора OM) возрастает в обоих случаях! Более того, при модуляции она всегда больше амплитуды несущей и равна ей лишь в паузах передачи. Как увидим далее, это существенно повышает помехоустойчивость приёма.

Эффективность АМ. О ней писали много и в разных источниках, например [1; 2]. Если сказать одним словом, то она чрезвычайно низкая. Даже при максимально глубокой, 100% АМ ($m = 1$), амплитуда каждой из боковых полос не превосходит половины амплитуды несущей (рис. 2б). Мощность любого сигнала propor-

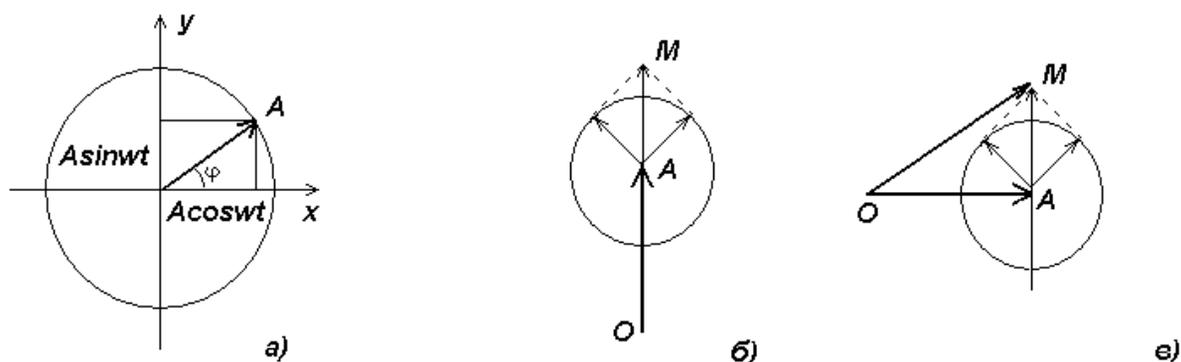


Рис. 2

циональна квадрату амплитуды, поэтому мощность каждой из боковых полос составит четверть от мощности несущей, а суммарная мощность боковых полос – половину от мощности несущей. Таким образом, на передачу полезной информации, заключенной в боковых полосах, тратится всего лишь 1/3 суммарной излучаемой мощности. Остальное – на передачу несущей, нужной лишь для работы детектора огибающей в приёмнике и, возможно, системы АРУ.

Еще хуже обстоят дела при реальной передаче звуковой программы, содержащей много пауз и тихих звуков. Коэффициент модуляции m , равный отношению суммарной амплитуды боковых полос к амплитуде несущей, в среднем составляет не более 0,3, и это отражено даже в ГОСТе (все измерения и испытания АМ-приемников выполняют при $m = 0,3$, или 30%).

Амплитуда боковых частот АМ-сигнала при модуляции чистым тоном равна $m/2$, а мощность каждой из боковых – $m^2/4$. Суммарная мощность боковых частот будет $m^2/2$. При $m = 0,3$ она составит всего 4,5% мощности несущей, или 4,3% от полной излучаемой мощности, а ведь именно в боковых полосах содержится полезная передаваемая информация! Видим, что эффективность АМ крайне низка.

Попытки повысить эффективность радиовещания с АМ предпринимали давно. Чаще всего предлагали перейти на однополосную модуляцию (ОБП, или SSB) с полностью или частично подавленной несущей. Но такое решение, полностью оправдавшее себя в области радиосвязи, оказалось неприемлемым в радиовещании, поскольку требовало полной замены существующего парка радиоприемников на значительно более сложные и дорогие однополосные. Так, автором более 40 лет назад был предложен несложный приемник с фазовой селекцией ОБП [3], но и он нашел применение только для связи.

Формирование КАМ-сигнала. Оно не представляет особых технических трудностей (рис. 3). Звуковой сигнал от микрофонного входа с услителем или от иного источника подается на балансный модулятор (БМ). На другой его вход поступает ВЧ-напряжение с несущей частотой от задающего генератора (синтезатора) передатчика. На выходе БМ образуется двухполосный ВЧ-сигнал с подавленной несущей (ДБП, или DSB). Несущая, сдвинутая по фазе на 90° фазовращателем, добавляется к двухполосному сигналу в сумматоре, и сформированный КАМ-сигнал поступает на усилитель мощности и далее в антенну.

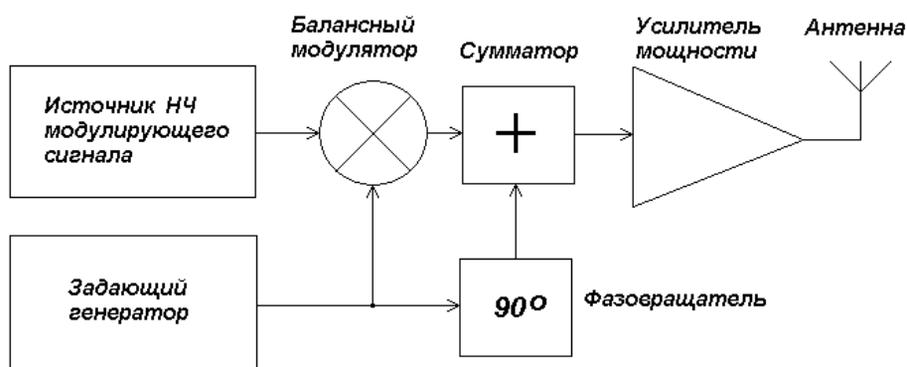


Рис. 3

КАМ удастся осуществить и в выходном каскаде передатчика; возможно, этот способ больше подойдет для модернизации имеющихся АМ-передатчиков с анодной модуляцией. Выходной каскад в этом случае выполняют на трех лампах примерно одинаковой мощности. Две из них включают по схеме мощного БМ, подав на сетки противофазные ВЧ-сигналы несущей, а на аноды – противофазные сигналы звуковой частоты. На сетку третьей лампы подают несущую, сдвинутую по фазе на 90° фазовращателем. Все три анода по ВЧ соединяют вместе и подключают к

выходному контуру, связанному с антенной. В этом контуре и формируется сигнал с КАМ.

Эффективность КАМ и сравнение с АМ. Предположим, что у нас есть два передатчика: один с АМ, другой с КАМ. Для сравнения потребуем, чтобы у них были одинаковыми:

- а) мощность несущей $P_{нес}$,
- б) пиковая мощность P_{max} .

Другими словами, передатчики имеют одинаковые лампы или транзисторы в выходном каскаде. Здесь нам снова придется посмотреть на рис. 2б и 2в. При АМ на пиках модуляции ам-

плитуда сигнала возрастает вдвое (вектор OM вдвое длиннее вектора OA), следовательно, пиковая мощность равна учетверенной мощности несущей $P_{\max} = 4 P_{\text{нес}}$.

В той же ситуации при КАМ (вектор OM вдвое длиннее вектора OA) длина вектора модуляции АМ будет больше и достигнет $\sqrt{3} = 1,7$ амплитуды несущей A . Отклонение вектора OM по фазе достигнет 60° . Амплитуда каждой из боковых полос составит $(\sqrt{3/2})A$, и мощность – $3/4$ мощности несущей. Суммарная мощность двух боковых полос будет теперь $3/2$ мощности несущей, т.е. ровно в 3 раза больше, чем в аналогичном передатчике с АМ. А ведь это информационная мощность, которая собственно и определяет дальность уверенного приема.

Достоинства КАМ этим не ограничиваются. Если АМ «боится» перемодуляции, поскольку возникают сильные искажения сигнала, то при КАМ увеличение амплитуды боковых полос, даже намного большее амплитуды несущей, не приводит ни к каким нежелательным последствиям. При этом лишь увеличивается громкость приема и повышается информационная эффективность передатчика, в пределе приближаясь к эффективности однополосных (SSB) и двухполосных (DSB) передатчиков с подавленной несущей.

Более того, если при АМ, особенно глубокой, бывают моменты, когда амплитуда излучаемого сигнала приближается к нулю, и в эти моменты в приемнике «вылезают» шум и помехи, то при КАМ амплитуда сигнала не уменьшается никогда, и этого недостатка не наблюдается.

Приём КАМ. На обычный приемник с амплитудным детектором сигнал с КАМ принимать нельзя, поскольку огибающая кривая сигнала вовсе не соответствует звуковому напряжению. Возможно, что-то удастся принять на узкополос-

ный приемник АМ, расстроив его относительно несущей, но искажения всё равно будут, и рекомендовать такой способ не следует. Нужен синхронный детектор с собственным гетеродином, синхронизированным с точностью до фазы с несущей принимаемой станции. В простейшем случае синхронизация достигается прямым захватом частоты гетеродина сигналом несущей станции [2].

Однако в этом простейшем случае напряжение гетеродина оказывается синфазным с несущей принимаемого сигнала, и данный способ годится лишь для приема АМ. Радиохоббиисты с успехом использовали и до сих пор используют этот способ при приеме на регенератор, обратную связь которого устанавливают немного выше порога самовозбуждения. При достаточно точной настройке на частоту сигнала колебания в контуре регенератора захватываются несущей и становятся синхронными с ней. За счет значительного подъема несущей сигнал демодулируется с малыми искажениями, одновременно повышается и селективность. Такой приемник назвали автодинным (автодин, или синхродин).

Для приема КАМ колебания гетеродина должны быть в квадратуре с несущей, т.е. сдвинуты на 90° относительно фазы несущей. При этом они будут в фазе с вектором модуляции АМ (рис. 2в), что и требуется для синхронного детектирования. Что касается самого детектора, то лучше использовать не простейший однотактный, как в регенераторе, а балансный или дважды балансный (кольцевой), как в приемниках прямого преобразования (гетеродинных), это значительно расширит динамический диапазон и увеличит помехоустойчивость.

Поставленным условиям полностью удовлетворяет гетеродинный приемник с ФАПЧ. Его структурная схема показана на рис. 4.

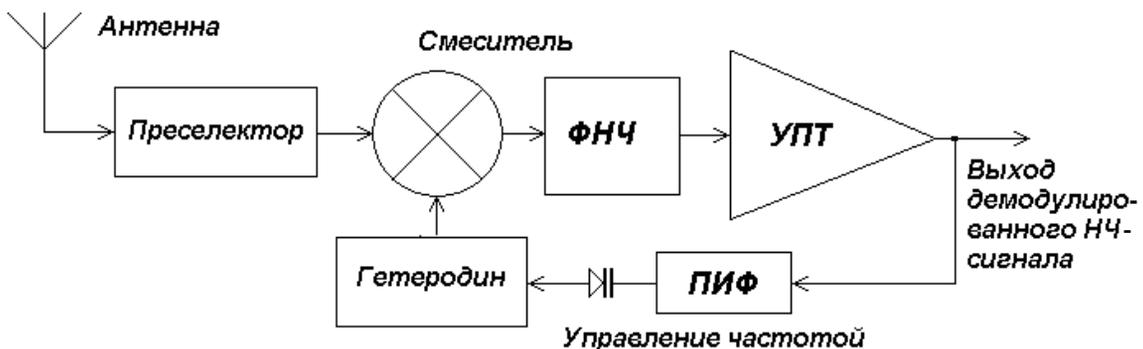


Рис. 4

Входной сигнал с КАМ, предварительно отфильтрованный преселектором (входным контуром) от мощных внедиапазонных помех, поступает на балансный смеситель. На другой его вход подан сигнал гетеродина, работающего на той же частоте. Схемотехника смесителей (балансных модуляторов) и других узлов гетеродинных приемников хорошо отработана и подтверждена многолетней практикой [4–6]. Возможно применение смесителей на встречно-параллельных диодах или полевых транзисторах с гетеродинами, работающими на половинной частоте сигнала [8–10], обладающих рядом достоинств.

Далее, как и в обычном гетеродинном приемнике, демодулированный сигнал проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 3–10 кГц. Он обеспечивает селективность по соседнему каналу. Низкочастотный усилитель приемника должен обеспечить передачу постоянной составляющей демодулированного сигнала, поэтому его надо выполнить по схеме усилителя постоянного тока (УПТ) с непосредственной связью между каскадами. Хорошо подойдут операционные усилители (ОУ), широкий ассортимент которых теперь освоен промышленностью.

Демодулированный сигнал поступает на выход приемника, к которому можно подключить оконечный усилитель мощности звуковой частоты (УМЗЧ) или телефоны. Постоянная составляющая через пропорционально-интегрирующий фильтр (ПИФ) подается на варикап, управляющий частотой гетеродина, замыкая петлю фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Частота среза ПИФ выбирается ниже звукового диапазона, порядка единиц или десятков герц.

Подобные приемники автор разрабатывал для приема УКВ-станций с ЧМ [11; 12], но там задача была намного сложнее, поскольку петля ФАПЧ должна была отслеживать значительные и быстрые изменения частоты сигнала при девиации до ± 50 кГц в диапазоне 66–74 МГц или ± 75 кГц в диапазоне 88–108 МГц. Тем не менее, приемники с ФАПЧ обеспечивают некоторый выигрыш относительно приемников с традиционным детектором ЧМ-сигналов [13] и могут быть рекомендованы для спутникового радиовещания в диапазоне УКВ ЧМ [14].

В диапазонах ДВ, СВ и КВ, где и предполагается использовать КАМ, всё гораздо проще – необходимо лишь синхронизировать гетеродин с несущей сигнала на фиксированной частоте и отследить возможные медленные (в основном, температурные) уходы частот передатчика и гетеродина приемника, не превосходящие единиц, в худшем случае – десятков герц.

Задача еще более упрощается при использовании современных синтезаторов частоты, обеспечивающих, по сути дела, не плавную перестройку по частоте, а переключение каналов в соответствии с установленной сеткой частот радиостанций ($\times 9$ кГц на ДВ и СВ, $\times 5$ кГц на КВ). В этом случае в приемнике необходима лишь очень небольшая подстройка опорного кварцевого генератора в синтезаторе для достижения фазового синхронизма [15].

Опыты автора с синхронным приемом в СВ-диапазоне, проведенные более 30 лет назад [16], убедительно показали возможность синхронизации гетеродина приемника с несущими радиостанций, но тот приемник для «классической» АМ содержал фазовращатель и два квадратурных канала, т.е. был вдвое сложнее предлагаемого теперь! Многие радиолюбители повторили тот приемник и были приятно удивлены качеством приема на СВ, мало уступающему качеству УКВ ЧМ. Через полтора десятка лет журнал «Радио» снова опубликовал схему и описание этого приемника под рубрикой «Не устарело и сегодня».

Вопрос о помехоустойчивости системы ФАПЧ при слабых сигналах с КАМ вообще не стоит. Дело в том, что полоса пропускания петли ФАПЧ в предлагаемом приемнике (она определяется частотой среза ПИФ), по крайней мере, в 100 раз меньше полосы звуковых частот, следовательно, отношение сигнал/шум в ней на 20 дБ больше. Если для того чтобы только-только разобрать речь, нужно отношение сигнал/шум хотя бы 10 дБ, то при этом в петле ФАПЧ оно будет 30 дБ, что должно обеспечить уверенный захват частоты. Это и открывает дальнейшие возможности повышения энергетической эффективности КАМ путем ослабления несущей в пользу дальнейшего увеличения мощности боковых полос.

Закключение. Опыты радиовещания и телефонной связи с КАМ еще не проводились. Квадратурную модуляцию (скорее, манипуляцию) с успехом используют лишь в современных цифровых телекоммуникационных системах, где она показала очень высокую эффективность.

Теперь очередной виток прогресса совершился, и если сделать «всё как следует», т.е. использовать КАМ и синхронный приемник, можно получить замечательные результаты. Все предпосылки для этого есть, отдельные узлы предлагаемой аппаратуры уже описаны, поэтому автор и прилагает обширный список литературы, включая книгу [17] и относительно недавнюю статью [18]. Дело за вами, экспериментаторы!

Литература

1. Поляков В. QAM, экспериментаторы! // CQ-QRP. – 2015. – № 52. – С. 4–10 [Электронный ресурс]. – <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1165-cq-qrp-52>
2. Момот Е.Г. Проблемы и техника синхронного радиоприема. – М. : Связьиздат, 1961.
3. Поляков В.Т. Однополосный модулятор-демодулятор // Радиотехника. – Т. 29. – 1974. – № 10. – С. 89–90.
4. Поляков В. Гетеродинный приём // Радио-ежегодник 1988. – 1988. – С. 16–38.
5. Поляков В.Т. Приемники прямого преобразования для любительской связи. – М. : ДОСААФ, 1981.
6. Поляков В.Т. Трансиверы прямого преобразования. – М. : ДОСААФ, 1984.
7. Поляков В.Т. Радиолюбителям о технике прямого преобразования. – М. : Патриот, 1990.
8. Поляков В. Смеситель приемника прямого преобразования // Радио. – 1976. – № 12. – С. 18–19.
9. Поляков В.Т., Степанов Б.Г. Преобразователь частоты. Авторское свидетельство № 1020969 от 12.09.1979.
10. Поляков В., Степанов Б. Смеситель гетеродинного приемника // Радио. – 1983. – № 4. – С. 19–20.
11. Поляков В. ЧМ детектор с ФАПЧ приемника прямого преобразования // Радио. – 1978. – № 11. – С. 41–43.
12. Поляков В.Т. Радиовещательные ЧМ-приемники с фазовой автоподстройкой. – М. : Радио и связь, 1983.
13. Лахманова Е.М., Поляков В.Т. Два способа повышения чувствительности бытовых радиовещательных УКВ ЧМ-приемников // Цивилизация знаний: российские реалии : труды Семнадцатой Международной конференции (г. Москва, 22–23 апреля 2016 г.). – М. : РосНОУ, 2016. – С. 346.
14. Поляков В.Т., Сахарова М.О. О возможности непосредственного УКВ ЧМ радиовещания с искусственного спутника Земли // Цивилизация знаний: российские реалии : труды Семнадцатой Международной конференции (г. Москва, 22–23 апреля 2016 г.). – М. : РосНОУ, 2016. – С. 350.
15. Поляков В. Упорядочение эфира и когерентная радиосвязь // Радио-ежегодник 1989. – 1989. – С. 9–17.
16. Поляков В. Синхронный АМ приемник // Радио. – 1984. – № 8. – С. 31–34; Радио. – 1999. – № 8. – С. 16–18 [Электронный ресурс]. – http://www.chipinfo.ru/literature/radio/199908/p16_18.html
17. Поляков В.Т. Техника радиоприема: простые приемники АМ сигналов. – М. : ДМК Пресс, 2001 [Электронный ресурс]. – <http://amfan.ru/>
18. Поляков В.Т. DSB – решение для QRP phone? // CQ-QRP. – 2014. – № 48. – С. 3–7 [Электронный ресурс]. – <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1044-cq-qrp-48>