

**ПЕРЕДАТЧИКИ СВ ДИАПАЗОНА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
РАДИОВЕЩАНИЯ DRM И IBOC**

ВЫХОДЕЦ А.А., КУЗНЕЦОВА А.С.
ГП УНИИРТ

**TRANSMITTERS OF MW RANGE TO DIGITAL BROADCASTING
SYSTEMS OF DRM AND IBOC**

VYKHODETS A.A., KUZNETSOVA A.S.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы звукового вещания могут передавать высококачественные звуковые программы и обеспечивать устойчивый прием.

Необходимость в новой технике цифрового радиовещания особенно важна для подвижных и переносных приемников. Новые цифровые системы, в которых применяются современные методы модуляции и пониженная скорость передачи битов для кодирования источника звуковых сигналов, предназначены для решения проблем, обусловленных явлениями многолучевости в канале распространения радиоволн, при сохранении высокой эффективности использования спектра и снижении до минимума требований к мощности передатчиков.

Кроме того, система цифрового звукового радиовещания (ЦЗР) может обеспечить намного более широкий выбор звуковых программ и набор вспомогательных данных, а также другие возможности по сравнению с обычными аналоговыми системами звукового радиовещания. Гибкость системы уплотнения может также позволить динамично изменять размещение частотных каналов в ЦЗР.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время для радиовещания в диапазоне ДГМВ разработаны две системы ЦЗР: DRM (Digital Radio Mondiale – Всемирное цифровое радиовещание) [1] и IBOC (In Band On Channel – американский стандарт цифрового вещания).

В системе DRM может быть реализован режим гибридной передачи, когда АМ передатчик используется для передачи как аналогового, так и цифрового DRM сигнала. Такой режим передачи позволяет осуществить плавный переход от аналогового к чисто цифровому режиму передачи в диапазонах ниже 30 МГц.

Следует отметить, что как для гибридной передачи (одновременно передается как аналоговый, так и цифровой DRM сигнал), так и для передачи только цифровых DRM сигналов не требуется выделения дополнительных радиочастот. Могут быть задействованы радиочастоты, используемые в настоящее время для аналогового вещания. Условием передачи только цифровых DRM сигналов является требование уменьшения на 6 дБ мощности передатчика, используемого для аналоговых передач.

Система DRM разрабатывалась с таким расчетом, чтобы иметь возможность использования радиоканалов системы АМ вещания. Предусмотрена возможность использования как одного радиоканала для одновременной передачи АМ и DRM радиосигналов, так и двух смежных каналов. При этом АМ радиосигнал может иметь обе боковые полосы (ДБП), одну боковую полосу (ОБП) или частично подавленную одну полосу (ЧПБМ).

На рисунке 1 показаны примеры размещения радиоканалов, в которых передаются АМ и DRM радиосигналы.

Передача этих радиосигналов может быть осуществлена как одним АМ передатчиком, так и двумя, из которых один передает АМ сигнал, а второй - DRM сигнал.

Как видно из рисунка 1, опорная частота DRM сигнала f_R может отстоять от несущей частоты АМ радиосигнала на полосу частот, равную одному АМ радиоканалу (± 9 кГц или ± 10 кГц), двум АМ радиоканалам (± 18 кГц или ± 20 кГц) или на половину ширины полосы частот АМ радиоканала (4,5 кГц или 5 кГц).

DRM радиоканалы имеют номинальную ширину полосы частот, равную 4,5 кГц (рисунок 1). При использовании более широкой полосы появляется возможность улучшения качества передачи или увеличения числа одновременно передаваемых аудиопрограмм.

Заметим, что если при амплитудной модуляции на рисунке фактически представлен спектр одно- или двухполосного АМ радиовещательного сигнала, то в случае с DRM это группа несущих, т.е. сигнал OFDM [1].

В США разработана система цифрового радиовещания (ЦРВ) IBOC (In-Band-On-Channel) [2].

IBOC система диапазона ГМВ спроектирована в США для обеспечения улучшения качества воспроизведения звука, а также для повышения эффективности использования спектра путем осуществления рационального перехода от аналогового к цифровому вещанию при существующем распределении частот для служб радиовещания в диапазоне ГМВ.

Система IBOC разработана для работы как в «гибридном», так и «полностью цифровом» режимах. В гибридном режиме работы имеется возможность одновременного вещания идентичного программного материала и в аналоговом, и в цифровом формате по каналу, занимаемому, в настоящий момент, аналоговым сигналом. Цифровой режим позволяет получить улучшенные характеристики работы системы в том же канале или в канале, не используемом в данное время для аналоговых передач.

В гибридном режиме цифровой сигнал передается в боковых полосах по обе стороны аналогового сигнала, а также в той же полосе, что и аналоговый сигнал, но с более низким уровнем, как показано на рисунке 2.

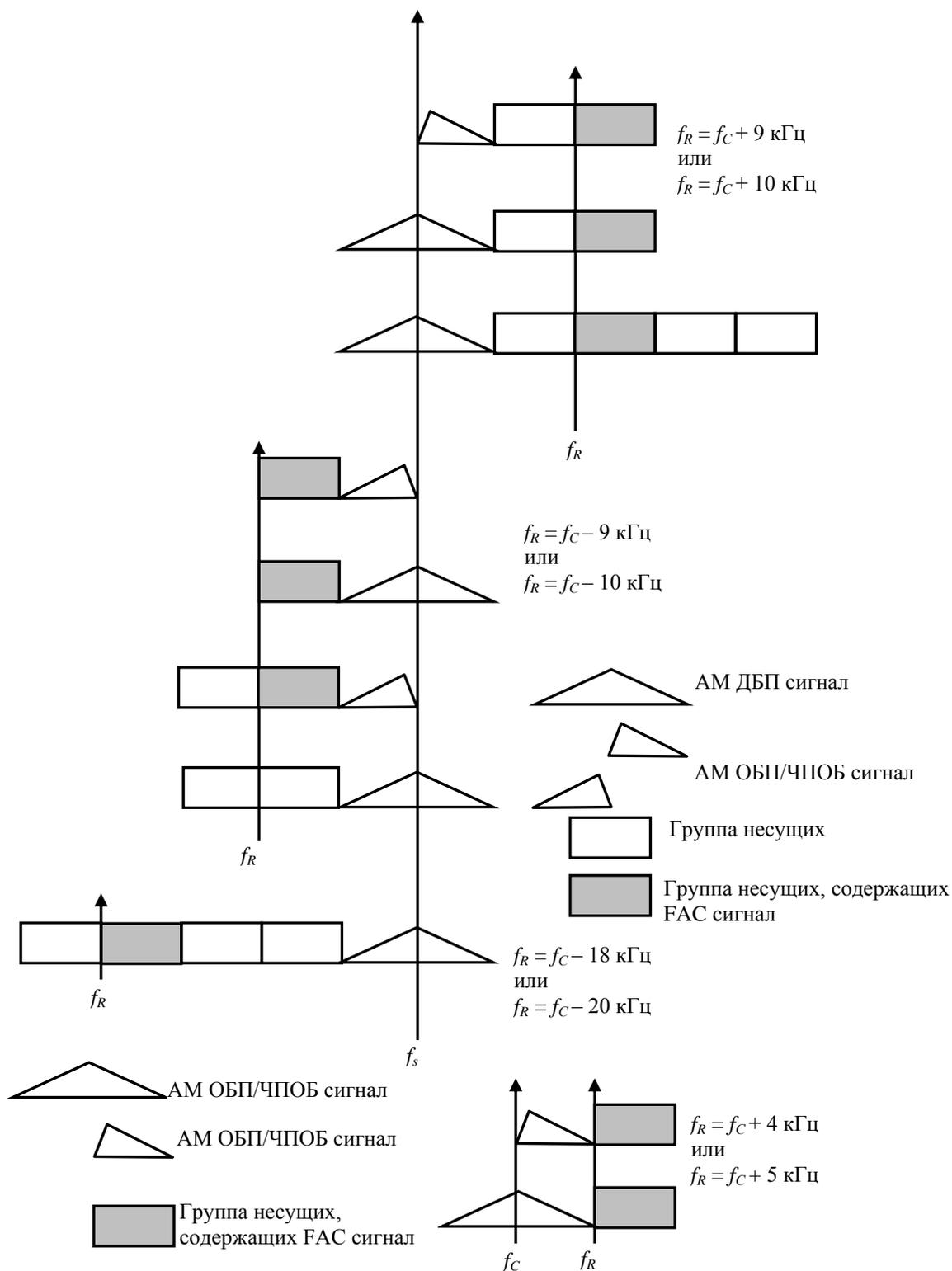


Рисунок 1. – Пример использования радиоканала при совместной передаче AM и DRM

Уровень мощности каждой OFDM поднесущей фиксируется относительно основной несущей, как показано на рис. 2. OFDM несущие, или цифровые несущие, расположены на оси частот примерно на $\pm 14,7$ кГц от АМ несущей. Цифровые несущие, расположенные в той же полосе, что и спектр аналогового сигнала, модулируются так, чтобы избежать помехи аналоговому сигналу.

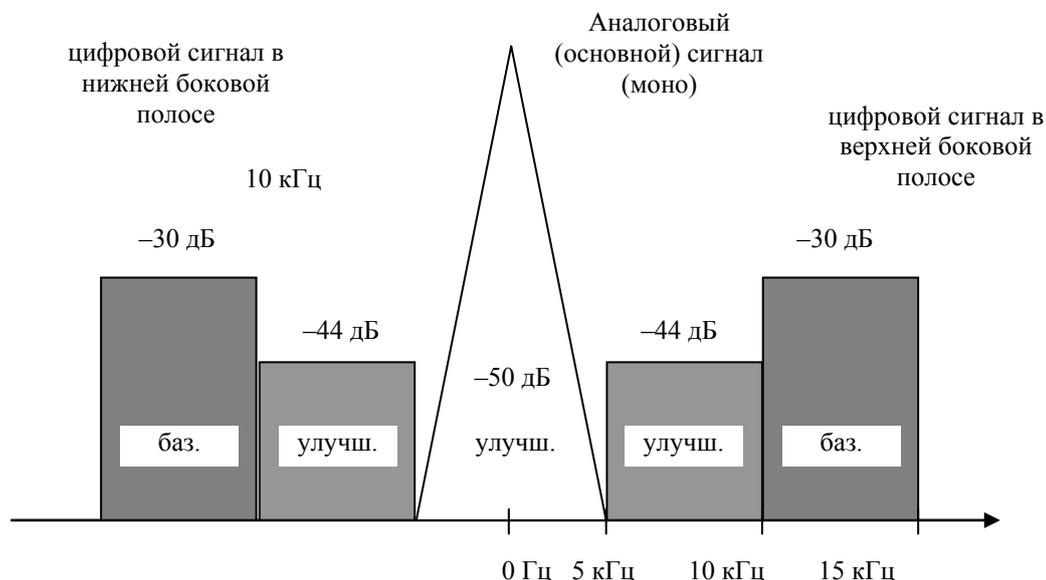


Рисунок 2 – Спектральная плотность мощности гибридного сигнала в системе ЦЗР ИВОС в ГМВ диапазоне

Гибридный режим разработан для станций, работающих в ГМВ диапазоне, где необходимо обеспечить рациональный переход от аналогового к цифровому формату вещания. Использование гибридного режима дает возможность введения передачи цифровых сигналов без оказания мешающего воздействия на существующий аналоговый сигнал.

При полностью цифровом режиме работы к системе предъявляются другие требования, чем при гибридном режиме. Во избежание помехи от второго соседнего канала, полностью цифровая передача ограничена по ширине полосы до 20 кГц, как показано на рис. 3. В части канала, занимающей средние 10 кГц (± 5 кГц от центральной частоты) сигналы имеют большую среднюю мощность, чем в остальных боковых полосах по 5 кГц (от 5 кГц до 10 кГц от центральной частоты).

Применение полностью цифрового режима дает возможность улучшить характеристики работы системы после удаления аналогового сигнала.

Как показано на рисунке 3, принципиальное различие между гибридным режимом и цифровым режимом – удаление аналогового сигнала и увеличение мощности несущих, которые располагались ниже аналогового сигнала. Дополнительная мощность в полностью цифровом колебании повышает помехоустойчивость, а «ступенчатая» форма спектра сигнала оптимальна для работы при сильной помехе по соседнему каналу.

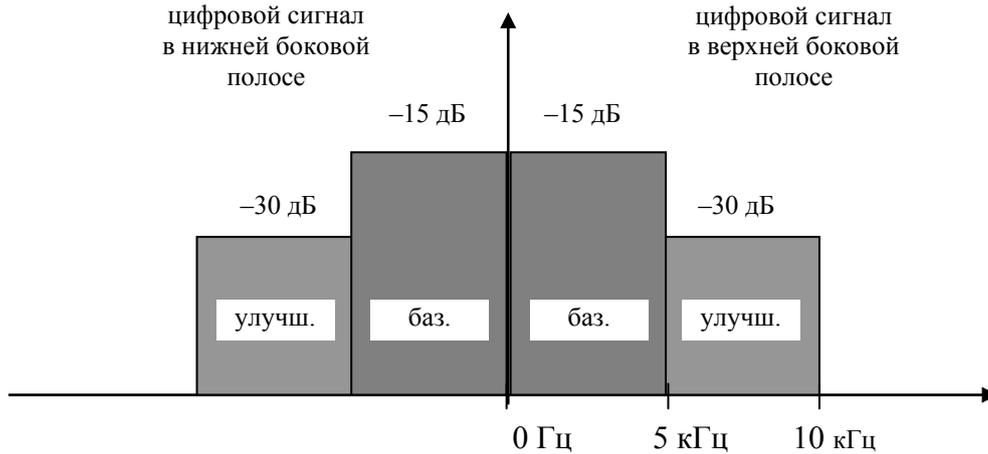


Рисунок 3 – Спектральная плотность мощности полностью цифрового сигнала в системе ЦЗР ИВОС

Для формирования цифрового сигнала в систем ЦЗР используется модуляция OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex - мультиплексирование ортогонально разделенных несущих).

OFDM сигнал можно записать как:

$$S(nT) = \text{Re} \left[\sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp(j2\pi kn/N) \right], n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

где C_k – информационный параметр, $N = T_u/T$, T_u – длительность полезной части OFDM символа, $T = 1/F$ – тактовый интервал, F – тактовая частота, n – номер отсчета [3].

Если в соответствии с формулой обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) выполнить вычисление вещественной и мнимой частей, а затем осуществить цифро-аналоговые преобразования, то получим следующее выражение:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{Ik} \cos(2\pi f_k t) - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Qk} \sin(2\pi f_k t) = I(t) - Q(t), \quad (2)$$

где $f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}$, f_0 – граничная частота. Частота f_k представляет собой k -ую гармонику основной частоты $1/T_s$, то есть величины, обратной длительности полезной части символа и равной расстоянию между частотами соседних несущих. $Q(t)$ – мнимая часть (квадратурная составляющая), $I(t)$ – вещественная часть (синфазная составляющая) (рисунок 4).

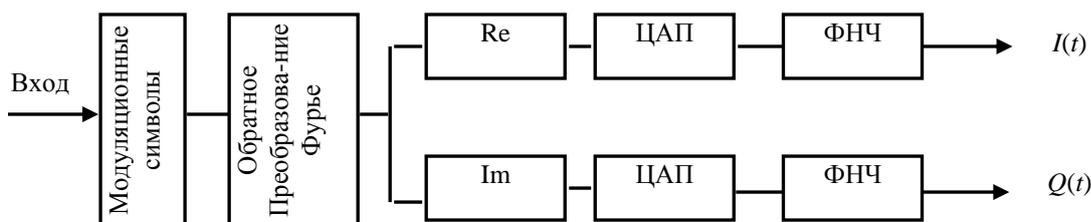


Рисунок 4 – Схема формирования OFDM символа

Если после вычисления вещественной I и мнимой Q частей ОДПФ умножить вещественную (синфазную) часть на колебание $\cos 2\pi ft$, а мнимую (квадратурную) на колебание $\sin 2\pi ft$, то при суммировании произведений получим OFDM радиосигнал:

$$\begin{aligned} U_{\text{шл}}(t) &= U_{01}(I(t)\cos 2\pi ft - Q(t)\sin 2\pi ft) = \\ &= R(t)\cos(2\pi ft - \varphi(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} R(t) &= \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}; \\ \varphi(t) &= \operatorname{arctg} \frac{Q(t)}{I(t)} = \operatorname{arccos} \frac{I(t)}{R(t)} = \operatorname{arcsin} \frac{Q(t)}{R(t)}. \end{aligned}$$

В передатчиках системы DRM и ИВОС модулирующий цифровой сигнал обычно модулируется в каскадах низкого уровня [4].

Усиление модулирующего сигнала или модуляция им несущего колебания может быть осуществлено двумя путями:

1. Посредством использования АМ передатчика с анодной модуляцией.
2. Путем использования линейного усилителя в АМ передатчике. При этом формируется однополосный радиосигнал.

При использовании мощных СВ передатчиков, в которых применяется анодная модуляция необходимо преобразование цифровых сигналов I и Q в сигналы модуляции несущей по амплитуде $R(t)$ и по фазе $\varphi(t)$ (3).

Такое преобразование нелинейно, и как к высокочастотному, так и к низкочастотному трактам передатчика предъявляются особые требования.

Полосы частот, занимаемые спектрами сигналов $R(t)$ и $\cos [\omega t - \varphi(t)]$ теоретически бесконечны, поэтому сигнал $U(t)$ будет занимать полосу частот равную удвоенному значению полосы звуковых частот $2F_{\text{в}}$ только в том случае, если спектры сигналов $R(t)$ и $\cos [\omega t - \varphi(t)]$ не будут ограничиваться.

Только в этом случае составляющие спектров этих сигналов, находящиеся за пределами полосы $2F_{\text{в}}$, взаимно компенсируются.

Реально высокочастотный тракт усиления фазомодулированного несущего колебания и низкочастотный тракт модулятора имеют ограничение полосы пропускания, поэтому появляются внеполосные излучения и нелинейные искажения огибающей.

Результаты исследований показывают, что для обеспечения нелинейных искажений огибающей аналогового сигнала $U(t)$ менее 1 % и уровня внеполосных излучений менее -40 дБ, что требуется при передаче цифровых сигналов, полоса пропускания тракта сигнала $R(t)$ на уровне -1 дБ должна быть не менее, чем в три раза шире полосы частот модулирующего сигнала. Такой же должна быть и ширина полосы пропускания тракта сигнала $\cos [\omega t - \varphi(t)]$.

При этом в полосе пропускания неравномерность АЧХ не должна превышать 1 дБ при линейной фазовой характеристике.

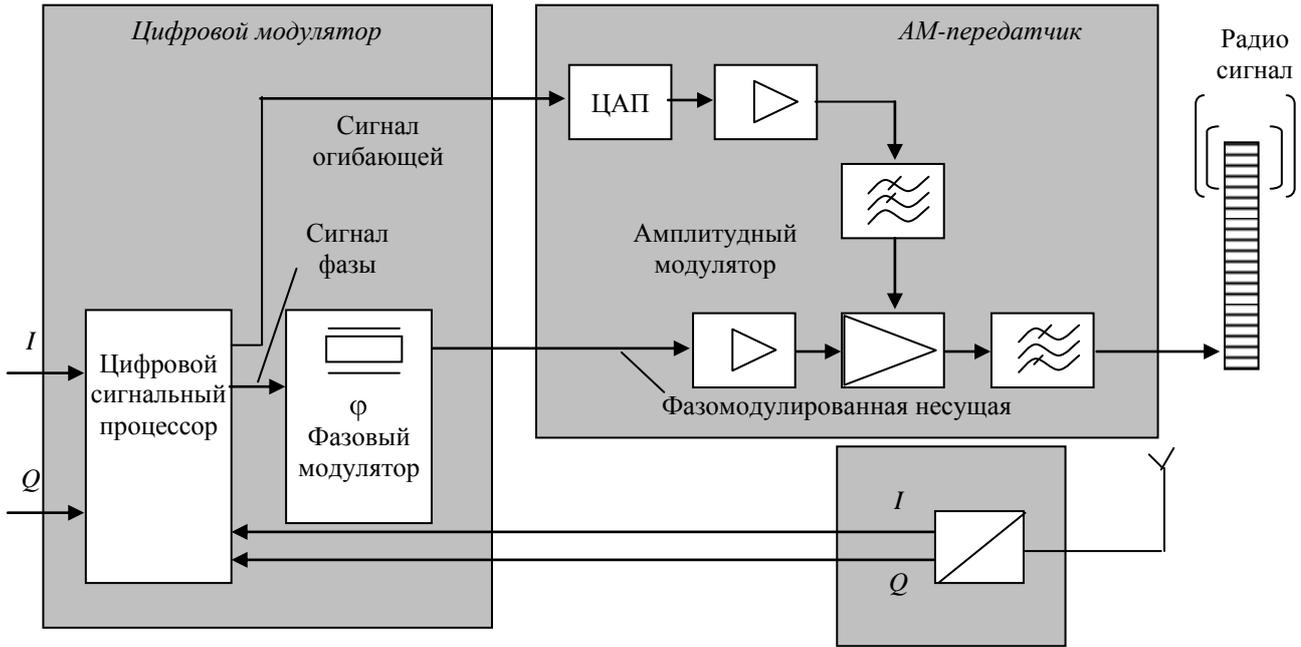


Рисунок 5 – Структурная схема АМ передатчика большой мощности [4]

На рисунке 5 приведена структурная схема цифрового передатчика ГМВ диапазона. В цифровом сигнальном процессоре формируются сигналы огибающей $R(t)$ и фазы $\varphi(t)$. После цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) сигнал огибающей $R(t)$ в аналоговом виде направляется к модулятору. На его второй вход поступает аналоговая фазомодулированная несущая $\cos [2\pi f t - \varphi(t)]$, сформированная в фазовом модуляторе.

Однополосный радиосигнал OFDM используют в передатчике меньшей мощности:

$$U_{1ц} = U_{01} \left[\sum_{k=0}^{N-1} C_{I_k} \cos(2\pi f_k + f)t - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Q_k} \sin(2\pi f_k + f)t \right]. \quad (5)$$

На рисунке 3 показана структурная схема такого передатчика.

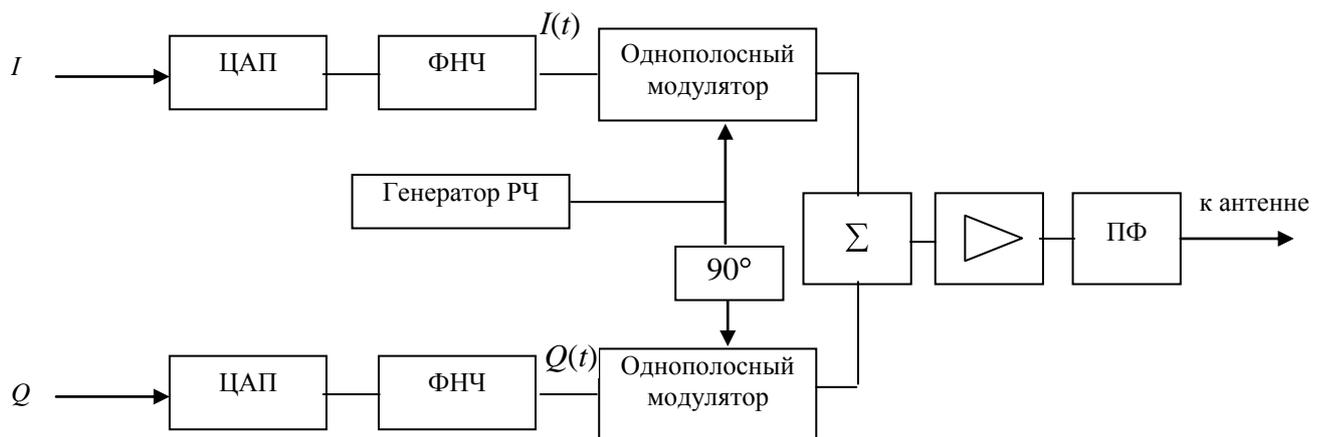


Рисунок 6 – Структурная схема однополосного передатчика с линейным усилителем

Цифровые сигналы I и Q (рис. 4) после цифро-аналогового преобразователя поступают к однополосным модуляторам. После суммирования аналоговые сигналы $I(t)$ и $Q(t)$ поступают на вход линейного усилителя и после полосового фильтра ПФ направляются к антенне.

В приемном устройстве разделение квадратурных составляющих происходит путем перемножения радиосигнала на синфазные $\cos 2\pi ft$ и квадратурные $\sin 2\pi ft$ колебания, получаемые от опорного генератора.

При приеме радиосигналов мощного передатчика после несложных преобразований в тюнере цифрового приемника получим:

$$\sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \cos[2\pi ft + \varphi(t)] \cos 2\pi ft = I(t) + \Sigma \text{Верхних частот}, \quad (6)$$

$$\sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \cos[2\pi ft + \varphi(t)] \sin 2\pi ft = -Q(t) + \Sigma \text{Верхних частот}. \quad (7)$$

После фильтров нижних частот сигналы $I(t)$ и $Q(t)$ направляются к цифровому процессору приемника.

Аналогичные операции выполняются в тюнере цифрового приемника при приеме однополосных радиосигналов:

$$\left[\sum_{k=0}^{N-1} C_{I_k} \cos 2\pi(f_k + f)t - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Q_k} \sin 2\pi(f_k + f)t \right] \cdot \cos 2\pi ft = I(t) + \Sigma \text{Верхн. частот}, \quad (8)$$

$$\left[\sum_{k=0}^{N-1} C_{I_k} \cos 2\pi(f_k + f)t - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Q_k} \sin 2\pi(f_k + f)t \right] \cdot \sin 2\pi ft = Q(t) + \Sigma \text{Верхн. Частот}. \quad (9)$$

Как и в выше рассмотренном случае после фильтра верхних частот сигналы $I(t)$ и $Q(t)$ поступают к цифровому процессору.

DRM и IBOC передатчики могут работать в синхронной сети.

Рассмотрим радиоприем при работе двух синхронных передатчиков П1 и П2.

а) Мощный передатчик

Если на вход приемника поступает радиосигнал от передатчика П2 с задержкой во времени τ относительно передатчика П1, то сигнал от этого передатчика:

$$U_{и2}(t) = U_{02} \sqrt{I^2(t - \tau) + Q^2(t - \tau)} \cos[2\pi f(t - \tau) - \varphi(t - \tau)]. \quad (10)$$

На входе цифрового приемника сигналы от передатчиков П1 (4) и П2 (10) суммируются:

$$U_{\Sigma и}(t) = U_{и1} + U_{и2} = U_{01} \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \cos[2\pi ft - \varphi(t)] + \\ + D \sqrt{I^2(t - \tau) + Q^2(t - \tau)} \cos[2\pi f(t - \tau) - \varphi(t - \tau)], \quad (11)$$

где $D = \frac{U_{02}}{U_{01}}$.

Преобразуем выражение (11) в соответствии с выражениями (2) и (4):

$$U_{\Sigma и}(t) = U_{01} \left[I(t) \cos 2\pi ft - Q(t) \sin 2\pi ft + \right. \\ \left. + D \left[I(t - \tau) \cos 2\pi f(t - \tau) - Q(t - \tau) \sin 2\pi f(t - \tau) \right] \right]. \quad (12)$$

Выражение (12) представляет собой сумму двух OFDM сигналов, конвертированных в область радиочастот.

Для уверенного разделения символов OFDM при одновременном радиоприеме сигналов от разных передатчиков, работающих в синхронной сети, между ними имеется так называемый «защитный интервал» длительностью T_g [3].

Если $\tau < T_g$, то мощности символов OFDM конструктивно складываются [3], и в цифровом приемнике будет обрабатываться сигнал OFDM с напряжением:

$$U_{\Sigma}(t) = U_{01} \sqrt{(1 + D^2)} \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \cos[2\pi ft - \varphi(t)]. \quad (13)$$

б) Однополосный передатчик

Суммарный сигнал на входе приемника от синхронных передатчиков П1 и П2:

$$U_{\Sigma}(t) = U_{01} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} C_{I_k} \cos 2\pi(f_k + f)t - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Q_k} \sin 2\pi(f_k + f)t + D \left[\sum_{k=0}^{N-1} C_{I_k} \cos 2\pi(f_k + f)(t - \tau) - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Q_k} \sin 2\pi(f_k + f)(t - \tau) \right] \right\}. \quad (14)$$

Выражение (14), как и (12) представляет собой сумму двух OFDM сигналов.

Если $\tau < T_g$, то мощности символов OFDM конструктивно складываются и в приемнике будет обрабатываться сигнал с напряжением:

$$U_{\Sigma}(t) = U_{01} \sqrt{(1 + D^2)} \left[\sum_{k=0}^{N-1} C_{I_k} \cos 2\pi(f_k + f)t - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Q_k} \sin 2\pi(f_k + f)t \right]. \quad (15)$$

Таким образом, на базе рассмотренных передатчиков диапазона ГМВ могут быть организованы одночастотные (синхронные) сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью мощных АМ передатчиков, используемых для передачи цифровых сигналов, являются повышенные требования к линейности и ширине полосы модулятора. Последняя должна быть по крайней мере в три раза больше ширины полосы, занимаемой символами OFDM.

В настоящее время разработан мощный средневолновый передатчик серии NX с мощностью от 100 кВт до 2000 кВт с КПД более 90%. Оконечные каскады работают в ключевом режиме, что позволяет передавать однополосные OFDM символы. Передатчик позволяет работать как в цифровом формате DRM, так и в формате IBOC.

При работе систем DRM и IBOC в гибридном режиме качество приема в зоне искажений аналогового сигнала в синхронной сети будет компенсироваться высококачественным приемом цифровых сигналов.

Литература

- 1 ETSI TS 101 980 V1.1.1 Digital Radio Mondiale (DRM) System Specification.
- 2 ITU R Document 6E/22. Digital system C. System description. 2000.
- 3 Рихтер С.Г. Цифровое радиовещание. – М.: Горячая линия. Телеком, 2004. – 352 с.
- 4 Jeff R. Detweiler. AM&FM Radio™ Transmission. J. Biquity Digital Corporation. Columbia. 2001.