

КВАДРАТУРНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ И ДЕМОДУЛЯТОРЫ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ

В.Голуб

Цифровые методы обработки сигналов получают все более широкое распространение в аппаратуре радиосвязи, причем не только в цепях низкой (НЧ), но и промежуточной (ПЧ) частот [1]. Важное место среди устройств обработки сигналов, предназначенных для систем связи, занимают квадратурные модуляторы и демодуляторы: аналоговые и цифровые, используемые в цепях высокой частоты (ВЧ) и ПЧ, соответственно [2, 3]. Они являются универсальными устройствами, которые могут применяться независимо от вида модуляции, но с дополнительным преобразованием модулирующего и демодулируемого сигналов. Квадратурные модуляторы – устройства балансного типа, не требующие фильтрации для выделения суммарной или разностной составляющей модулированного сигнала. Они могут также использоваться в качестве повышающих преобразователей частоты. Характерные особенности модуляторов и демодуляторов можно проиллюстрировать на примере микросхем ведущей в этой области фирмы Analog Devices [4–10]. Микросхемы фирмы – это универсальные устройства AD66xx, AD834x, AD977x, AD987x и др. для различных систем связи (GSM, GPRS, EDGE, 1S136, AMPS и др.) и специализированные, например, AD6523/4 и AD6534 – для систем связи стандартов GSM/DSC1800/PCS1900/GPRS.

Является ли система связи аналоговой или цифровой, определяется, прежде всего, типом модулирующего сигнала – аналоговым или цифровым. Несущее высокочастотное колебание в обоих случаях аналоговое. Цифровой модулирующий сигнал может иметь параллельный или последовательный формат, например восьмизрядный параллельный формат при 256-позиционной квадратурной амплитудной модуляции QAM-256 (QAM-256) и последовательный формат при двухпозиционной манипуляции типа GMSK (в системах радиосвязи GSM, GPRS и др.) [11]. Понятия "аналоговый" и "цифровой" относятся и к схемотехническим устройствам, в том числе к модуляторам и демодуляторам. Но модулированный сигнал на выходе цифрового модулятора или на входе цифрового демоду-

лятора имеет цифровую несущую, представляемую дискретными (во времени) отсчетами, выражаемыми цифровым кодом.

Структурная схема приемопередатчика. На рис.1 приведен ранний вариант схемы с цифровой обработкой НЧ-сигналов. Квадратурный модулятор и преобразователь ПЧ в ВЧ (в передатчике), а также преобразователь ВЧ в ПЧ и квадратурный демодулятор (в приемнике) являются аналоговыми. На входе модулятора, раздельно в каждом квадратурном канале I и Q, используются ЦАП, а на выходе демодулятора – АЦП. Сигналы с выхода АЦП (в приемном канале) поступают на сигнальный процессор (DSP) или специальный аудиокодек (аудиокодер) для последующей цифровой обработки НЧ-сигнала. В передающем канале сигналы с того же DSP (аудиодекодера, аудиокодека) поступают на ЦАП. В ряде случаев в передающем канале преобразование в ПЧ отсутствует, и несущая на выходе модулятора является ВЧ-несущей. А в приемном канале используется двойное преобразование частоты, не показанное на рис.1. Кроме того, на смену супергетеродинному методу радиоприема приходит супергомодинный – без преобразования ВЧ в ПЧ и с непосредственной демодуляцией ВЧ-сигналов [12].

В схемах современных цифровых приемопередатчиков используются цифровые модулятор и демодулятор. При этом на входе демодулятора должен стоять АЦП (обычно с дециматором), а на выходе модулятора – ЦАП (с интерполятором). При таком включении

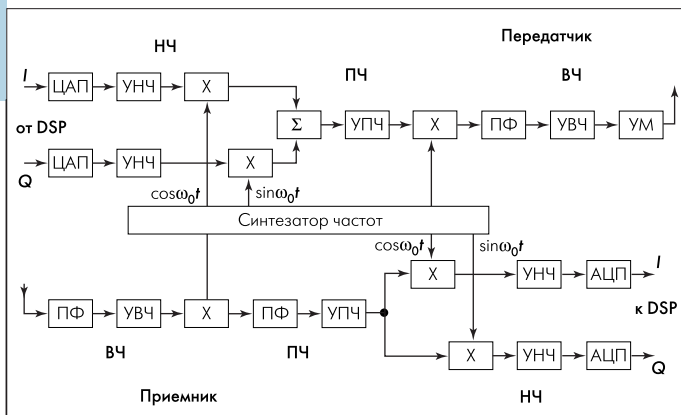


Рис.1. Структурная схема приемопередатчика с аналоговыми модулятором и демодулятором

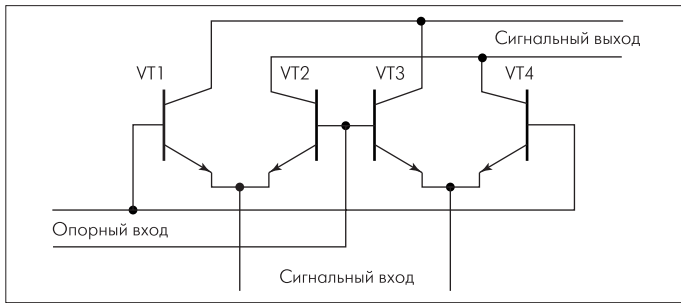


Рис.2. Схема балансного смесительного элемента (перемножителя)

АЦП и ЦАП преобразовывают не НЧ-, а существенно более высокочастотный ПЧ-сигнал. Демодулятор и модулятор как бы встроены в системы преобразования: демодулятор включается между АЦП и дециматором, а модулятор – между интерполятором и ЦАП. В результате, модулятор и демодулятор работают при более высоких частотах дискретизации и, соответственно, при меньших шумах, носимых цифровым преобразованием.

Аналоговые квадратурные модулятор и демодулятор.

Основной элемент модулятора и демодулятора – перемножитель (смеситель). Рассматриваемый перемножитель (рис.2) представляет собой балансное устройство (double balanced Gilbert-cell mixer) на четырех транзисторах с дифференциальными входами (сигнальным и опорного колебания) и дифференциальным выходом. Для входного и выходного сигналов перемножитель представляет собой токовый элемент с низким входным (эмиттерным) и высоким выходным (коллекторным) сопротивлениями. Опорное колебание, с которым перемножается входной сигнал, подается в виде напряжения на базы транзисторов. Перемножитель используется вместе с преобразователем "напряжение–ток", включаемым на его эмиттерном входе. В квадратурном модуляторе (рис.3) для суммирования выходных сигналов соответствующие коллекторные выводы двух перемножителей соединяются.

При подаче на входы перемножителя сигнала, в общем случае выражаемого как

$$a_1(t) = A_1(t)\cos[\omega_1 t + \Delta\varphi(t)], \quad (1)$$

где $A_1(t)$ и $\Delta\varphi(t)$ – модулированные амплитуда и изменение фазы, и опорного колебания $a_0(t) = A_0\cos\omega_0 t$ с его выхода снимается сумма двух колебаний – с суммарной и разностной частотами:

$$a_2(t) = A_2(t)\cos[(\omega_1 + \omega_0)t + \Delta\varphi(t)] + A_2(t)\cos[(\omega_1 - \omega_0)t + \Delta\varphi(t)], \quad (2)$$

где $A_2(t)$ пропорционально $A_1(t)$. Нужное колебание выделяется путем фильтрации или без фильтрации – в квадратурных преобразователях. Первая составляющая, с суммарной частотой $\omega_1 + \omega_0$, выделяется в повышающих преобразователях частоты, а вторая, с разностной частотой $\omega_1 - \omega_0$, – в понижающих преобразователях (при $\omega_1 > \omega_0$). При $\omega_1 < \omega_0$ вторая составляющая в выражении (2) равна $A_2(t)\cos[(\omega_0 - \omega_1)t - \Delta\varphi(t)]$. В модуляторах реализуется ре-

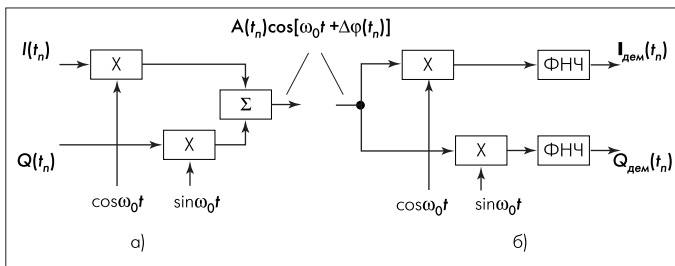


Рис.3. Структурная схема квадратурных модулятора (а) и демодулятора (б)

жим с ω_0 (при $\omega_1 = 0$), а в демодуляторах используется составляющая разностной частоты, равной нулю (при $\omega_1 = \omega_0$).

Основные режимы квадратурных модулятора и демодулятора (см. рис.3) – модуляция/демодуляция сигнала с синфазной $I(t_n)$ и квадратурной $Q(t_n)$ модулирующими посылками и модуляция/демодуляция аналогового сигнала с одной боковой полосой (ОБП, SSB). В первом режиме модулирующие посылки – аналоговые, с постоянным уровнем в течение каждой посылки и дискретным изменением уровней от посылки к посылке. Уровни содержат информацию о цифровом коде модулирующего сигнала. На выходе модулятора

$$a_{мод}(t_n) = A(t_n)\cos[\omega_0 t + \Delta\varphi(t_n)], \quad (3)$$

где $A(t_n) = \sqrt{I^2(t_n) + Q^2(t_n)}$ и $\Delta\varphi(t_n) = \arctg[Q(t_n)/I(t_n)]$ – дискретно изменяемые амплитуда и фаза модулированного сигнала. Сигналы на выходе демодулятора

$$I_{дем}(t_n) = k_{дем}A(t_n)\cos\Delta\varphi(t_n); \quad (4)$$

$$Q_{дем}(t_n) = k_{дем}A(t_n)\sin\Delta\varphi(t_n) \quad (5)$$

пропорциональны входным сигналам модулятора $I(t_n)$ и $Q(t_n)$. Отметим, что НЧ-составляющие $I(t_n)$, $Q(t_n)$ на входе модулятора и $I_{дем}(t_n)$, $Q_{дем}(t_n)$ на выходе демодулятора представляют сигнал в прямоугольной системе, тогда как сигнал на выходе модулятора и входе демодулятора, согласно выражению (3), – в полярной системе координат.

Во втором режиме на квадратурные входы модулятора подаются "комплексные" составляющие модулирующего НЧ-сигнала (со сдвигом 90°). С выхода модулятора, в зависимости от знака суммирования, снимается один из двух модулированных сигналов:

$$a_{мод}(t) = k_{мод}\sum A_i(t)\cos[(\omega_0 + \Omega_i)t + \Delta\varphi_i(t)] \quad (6)$$

или

$$a_{мод}(t) = k_{мод}\sum A_i(t)\sin[(\omega_0 - \Omega_i)t - \Delta\varphi_i(t)], \quad (7)$$

содержащих верхнюю или нижнюю боковые полосы (без инверсии и с инверсией спектра, соответственно). В выражениях (6) и (7) $A_i(t)$ и $\Delta\varphi_i(t)$ – амплитуды и изменения фазы спектральных составляющих модулирующего сигнала.

Пример аналоговых квадратурных модуляторов/демодуляторов – микросхемы серии AD834х фирмы Analog Devices (модуляторы AD8345/6/9 и демодуляторы AD8347/8, см. таблицу) [4]. Модуляторы могут быть использованы также в качестве повышающих бесфильтровых преобразователей частоты. Другая серия аналоговых микросхем – AD607 и ее вариант AD61009. Это – микросхемы подсистем приемного тракта, содержащих понижающий преобразователь частоты и квадратурный демодулятор.

Цифровые модуляторы с интерполятором и ЦАП.

На рис.4 показана часть структурной схемы приемопередатчика с цифровыми модулятором и демодулятором. На входе канала модуляция используется цифровой двухканальный интерполирующий ФНЧ (интерполятор), повышающий частоту дискретизации в модуляторе, а на выходе канала, после цифрового квадратурного модулятора, – ЦАП. На вход канала поступают составляющие $I(t_n)$ и $Q(t_n)$ модулирующего цифрового сигнала в параллельном формате. На интерполятор от синтезатора частот поступают, как минимум, две последовательности тактовых импульсов, определяющих частоту отсчетов, – входных с частотой $f_{д1}$ и выходных с большей частотой $f_{д2} = f_{д1}K_{инт}$, где $K_{инт}$ – коэффициент интерполяции. Последовательность импульсов с частотой $f_{д2}$ подается также и на ЦАП.

Цифровое опорное колебание, определяющее частоту несущей на выходе модулятора, может быть синусоидальным, формируе-

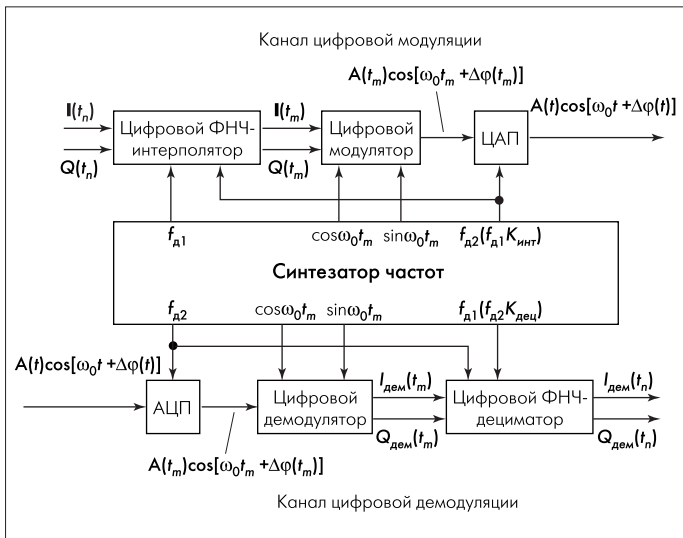


Рис.4. Структурная схема приемопередатчика с цифровыми модулятором и демодулятором

мым, например, методом прямого цифрового синтеза (DDS), или прямоугольным, формируемым системой ФАПЧ. Отсчеты составляющих синусоидального опорного колебания $\cos\omega_0 t_m$ и $\sin\omega_0 t_m$ на рис.4) характеризуются значениями описывающего их много-разрядного цифрового кода. Частота их следования равна $f_{д2}$ (на рис.4 не показана). В модуляторе цифровые коды входного сигнала и опорного колебания перемножаются, и, в зависимости от знака суммирования, выбирается сумма или разность их произведений.

Прямоугольное опорное колебание (последовательность чередующихся "0" и "1"), которое можно рассматривать как одnorазрядное, дополнительно содержит нечетные гармоники. В результате в выходном сигнале модулятора возникают дополнительные спектральные составляющие, которые могут либо фильтроваться на выходе ЦАП, либо одна из гармоник может быть использована для образования более высокочастотной несущей.

Синусоидальное DDS-колебание применяется в микросхемах AD9853/6/7 и AD9873/7/9, а прямоугольное – в AD9773/5/7 и AD9782/4/6 (усовершенствованные варианты AD9773/5/7, содержащие цепи компенсации для уменьшения искажений преобразуемого сигнала). Следует отметить особенность микросхем AD9773/5/7 – наличие двух модуляторов и двух ЦАП. Это позволяет выполнять

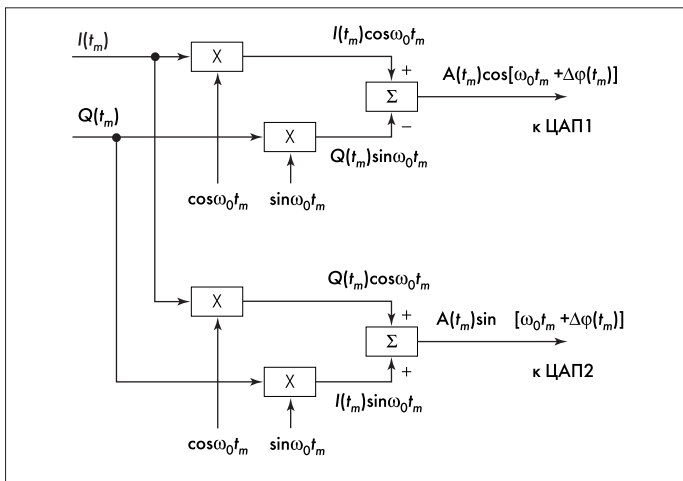


Рис.5. Структурная схема квадратурного модулятора с комплексным (cos/sin) выходом

преобразование Гильберта (Hilbert transform), т.е. формировать "комплексный" модулированный сигнал, состоящий из двух составляющих с фазовым сдвигом 90° (рис.5). Комплексный сигнал (с выхода ЦАП) используется, например, при работе AD9773/5/7 или двух AD9782/4/6 с аналоговым модулятором AD8345 (или AD8346/9), выполняющим функцию квадратурного повышающего преобразователя частоты (рис.6).

Фирма Analog Devices выпускает также серию четырехканальных процессоров AD6622/3 (Transmit Signal Processor – TSP). Процессоры выполняют функции: преобразования и расщепления (на квадратурные составляющие) модулирующего цифрового сигнала – для получения различных видов модуляции (PSK, MSK, GMSK, QPSK и др.); интерполяции; квадратурной модуляции; суммирования четырех потоков информации в один широкополосный поток. Они не имеют своего ЦАП и могут входить в состав чипсета SoftCell вместе с ЦАП AD9754.

Цифровые демодуляторы с АЦП и дециматором. Канал демодуляции содержит АЦП, встроенный цифровой демодулятор и децимирующий фильтр (см.рис.4). Пример – микросхемы AD9870/4, представляющие собой подсистемы приемника и содер-

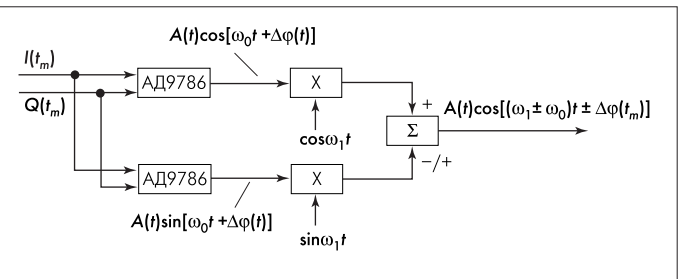


Рис.6. Схема включения двух AD9786 с квадратурным модулятором, используемым в качестве повышающего преобразователя частоты

жащие аналоговый преобразователь частоты и канал демодуляции. АЦП является узкополосным, так как его задача – произвести цифровое преобразование ПЧ-сигнала, поступающего с выхода преобразователя частоты. Узкополосность обеспечивается полосовой фильтрацией, ограничивающей спектр преобразуемого сигнала. При этом частота дискретизации может быть меньше верхней частоты спектра, но должна быть больше отфильтрованной полосы частот.

Обычно используется сигма-дельта АЦП, содержащий, в общем случае, сигма-дельта модулятор и преобразующий децимирующий фильтр [13]. В простейшем случае сигма-дельта модулятор формирует одnorазрядную частотно-модулированную последовательность посылок "0" и "1", синхронизированную тактовыми импульсами с частотой f_t . Частота модулятора, пропорциональная модулирующему сигналу, равна $f_{мод} = f_t n_1 / (n_0 + n_1)$, где n_0 и n_1 – число посылок со значениями "0" и "1", соответственно, на интервале дискретизации. Интервал определяется частотой дискретизации f_d в преобразующем фильтре и равен $1/f_d$. Частоту f_t , которая значительно выше частоты дискретизации f_d , называют также частотой передискретизации, а частоту f_d – частотой децимации. Обычно $f_t = 2^N f_d$, где 2^N – коэффициент передискретизации (он же – коэффициент децимации), а N – разрядность получаемого на выходе АЦП цифрового сигнала. Частоты f_t и f_d соответствуют $f_{д2}$ и $f_{д1}$ на рис.4 (в канале демодуляции).

Преобразующий фильтр, входящий в состав сигма-дельта АЦП и называемый также децимирующим, выполняет преобразование частотно-модулированного сигнала сигма-дельта модулятора в мно-

гораздней цифровой сигнал, сопровождаемое цифровой фильтрацией и децимацией. Используется цифровой фильтр (обычно трансверсальный или эквивалентный ему рекурсивный), суммирующий посылки "1", существующие на интервале дискретизации. Результаты суммирования выражаются цифровым кодом на много-разрядном выходе фильтра [13].

Рассмотренный сигма-дельта модулятор – одноразрядный, однако в AD9870/4 используется многоразрядный, работающий аналогично, но формирующий на выходе многоразрядную последовательность посылок. Его можно рассматривать как АЦП с передискретизацией. Допускается и применение других типов АЦП. Важно, чтобы дискретизация была с повышенной частотой ($c.f_{д2}$, см. рис.4), при которой в канале демодуляции уровень шумов, обусловленных цифровым преобразованием, снижается.

К микросхемам с цифровыми демодуляторами, встраиваемыми в АЦП с дециматором, относятся также процессоры серии AD66xx – AD6620/24/24A/34/35/52 (Receive Signal Processor – RSP). В микросхемах этой серии демодуляторы именуются частотными трансляторами. Микросхемы AD66xx, кроме AD6652, требуют применения

Квадратурные модуляторы и демодуляторы фирмы Analog Devices

Тип ИС	$F_{-зdB}/f_{T1}^1$ (макс.), МГц/MSPS	f_0 , МГц	Число кана- лов	Разре- шение, бит	$K_{инт}^2$, $K_{дец}$	$f_{д1}^1$ (макс.), MSPS	Коррек- тировка специ- фикации
<i>Аналоговые квадратурные модуляторы</i>							
AD8345	80/-	25...1000	1	-	-	-	0/2001
AD8346	70/-	800...2500					0/1999
AD8349	200/-	800...2700					PrH/2002
<i>Цифровые квадратурные модуляторы с интерполятором (на входе) и ЦАП (на выходе)</i>							
AD9773	-/50 ... 160	70 (ПЧ)	2 (90°)	12	1, 2, 4, 8	160 ($K_{инт}=1$)	0/2002
AD9775							0/2002
AD9777							0/2002
AD9782	-/ ≤ 160	-	1	12	-	400 ($K_{инт}=8$)	PrB/2002
AD9784							-
AD9786							PrB/2002
AD9853	-/28	84	1	10	6...1953	168	C/1999
AD9856	-/25	80		12	8...504	200	B/1999
AD9857	-/50	65		14	4...252	200	B/2002
AD9873	-/19,3	65	12	12...16	-	232	0/2000
AD9877	5,8/19,3						A/2002
AD9879	5,8/14,5						0/2002
<i>Аналоговые квадратурные демодуляторы</i>							
AD8347	90/-	800...2700	1	-	-	-	0/2001
AD8348	60/-	50...1000					PrC/2002
<i>Аналоговые квадратурные демодуляторы (в подсистеме с преобразователем частоты)²</i>							
AD607	1,5/-	0,4...12	1	-	-	-	C/2002
AD61009		1,0...12					0/2001
<i>Встроенные цифровые квадратурные демодуляторы с АЦП (на входе)³ и дециматором (на выходе)</i>							
AD6620	-/65	-	1	16	2...512	32,5	A/2001
AD6624	-/80						80
AD6624A	-/100						100
AD6634	-/80						80
AD6635	-/80						80
AD6652	-/65	200	4	12	65	PrA/2002	
<i>Встроенные цифровые квадратурные демодуляторы с АЦП и дециматором (в подсистеме с аналоговым преобразователем частоты)²</i>							
AD9870	0,01...0,15/ 13...18	$f_{д1}/8$	1	16	60...960	-	0/2001
AD9874	0,0068... 0,27/13...26						0/2002

Примечания: ¹ f_T соответствует $f_{д1}$ для модулятора и $f_{д2}$ для демодулятора, а $f_{д1} - f_{д2}$ для демодулятора и $f_{д2}$ для модулятора. ² Частоты на входах преобразователей частоты: в AD607 и AD61009 – до 500 МГц, AD9870 и AD9874 – до 300 МГц. ³ Для демодуляторов AD66xx (кроме AD6652) АЦП – внешний.

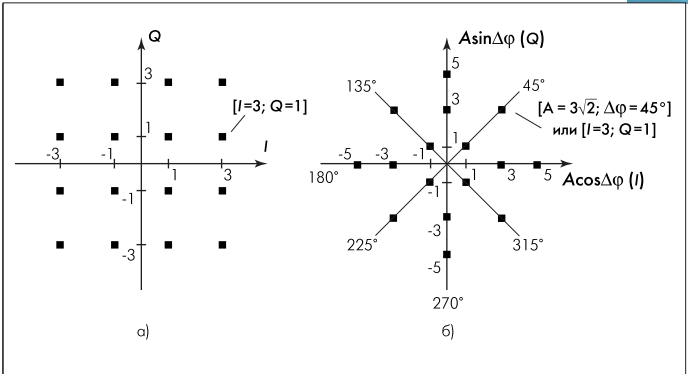


Рис.7. Структура сигналов КАМ-16 (а) и АФМ/КАМ-16 (б)

внешнего АЦП – AD6600/40/42 или AD9042, AD922x, AD923x, AD924x, AD943x. Микросхемы AD6600/40/42 (из той же серии AD66xx) – АЦП другого, конвейерного, типа.

Квадратурная и другие виды модуляции. Квадратурные модулятор и демодулятор предназначены, прежде всего, для сигналов КАМ – квадратурной амплитудной модуляции (манипуляции) и ОБП, но могут применяться и для сигналов других видов. Несущее колебание сигнала КАМ модулируется по амплитуде и фазе, например в соответствии со структурами, приведенными на рис.7. Но структура сигналов КАМ специально приспособлена для того, чтобы позиции манипуляции можно было характеризовать не амплитудой и фазой (в полярной системе координат), а проекциями амплитуды (через косинус и синус фазы) на оси I и Q прямоугольной системы координат. Сказанное соответствует выражениям (4) и (5). Классической в этом смысле является структура, приведенная на рис.7а (КАМ-16). Структура на рис.7б в равной мере может рассматриваться как АФМ-16 (амплитудно-фазовая манипуляция), так и КАМ-16. Структуру, приведенную на рис.7б, может иметь и сигнал с АОФМ-16 – амплитудной и относительной фазовой манипуляцией. Сигналы других видов – АМ, ФМ и ОФМ (ФРМ) – могут рассматриваться как частные случаи КАМ и АФМ (АОФМ).

Особое место занимают сигналы с частотной модуляцией (манипуляцией). Примером может быть сигнал с GMSK – гауссовской частотной манипуляцией с минимальным сдвигом [11, 14]. В сигнале с GMSK помимо гауссовской фильтрации обеспечивается и непрерывность фазы манипулируемого колебания, что обусловлено минимальным сдвигом (изменением) частоты при манипуляции. Используемый в этом случае частотный квадратурный модулятор содержит частотный предмодулятор (ЧПМ) и "стандартный" квадратурный модулятор (рис.8). На вход ЧПМ подается последовательность модулирующих посылок. ЧПМ производит гауссовскую фильтрацию (с аппроксимацией по Гауссу), интегрирование (для формирования функции фазы) и образование функций косинуса и синуса: $A \cos[\pm \Delta\varphi(t_n)]$ и $A \sin[\pm \Delta\varphi(t_n)]$, где "+" или "-" – знаки манипулирующих посылок, соответствующих "0" и "1". Преобразован-

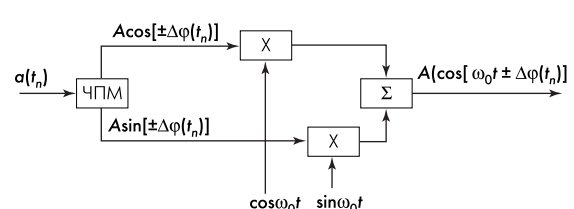


Рис.8. Частотный квадратурный модулятор

ный в ЧПМ сигнал модуляции поступает на вход модулятора, на выходе которого

$$\text{Acos}[\omega_0 t \pm \Delta\varphi(t_n)] \approx \text{Acos}[\omega_0 t \pm \Delta\omega t_n] \quad (8)$$

при $\Delta\varphi(t_n) \approx \Delta\omega t_n$. Правая часть выражения (8) не учитывает переходные процессы при смене знака посылок и поэтому является приближенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлеев С. Е. Элементная база и архитектура цифровых радиоприемных устройств. – Цифровая обработка сигналов, 1999, № 1.
2. Парамонов А., Куропаткин О. Цифровая обработка при когерентной демодуляции сигналов. – Chip News, 2000, № 8, с.2.
3. Гольцова М. Быстродействующие широкополосные ЦАП. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 2, с.24.
4. Электронные компоненты и системы (журнал). – Киев: VD MAIS, № 4/99 (AD9850/1), № 5/99 (AD9853/6), № 6/99 (AD8346), № 10/99 (AD9751/3/5, AD9763/5/7, AD9772), № 11/99 (ADF4xxx), № 2/00 (AD9852/4), № 3/00 (AD6630, AD8350), № 5/00 (Othello: AD6523/4), № 9/00 (SoftCell: AD6622/24/44, AD9754), № 7/01 (AD9857, AD9773/5/7); № 10/01 (AD9870/3/5/6), № 2/02 (AD9220/1/3/4/5/6, AD9235, AD9244, AD9430/2/3), № 11/02 (AD9858), № 12/02 (AD831, AD834x).
5. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. – Analog Devices, 1999.
6. Gentile K. Digital Upconverter IC Tames Complex Modulation. – Microwaves & RF, August 2000.
7. Cushing R. Single-Sideband Upconversion of Quadrature DDS Signals to the 800-to-2500-MHz Band. – Analog Dialogue, 2000, 34-3.
8. Hendriks P., Schreier R., DiPilato J. High Performance Narrowband Receiver Design Simplified by IF Digitizing Subsystem in LQFP. – Analog Dialogue, 2001, 35-3, (также – в Chip News, 2002, N7).
9. Mehr I., DiPilato J., Kessler M. AD9873 Mixed-Signal Front End (MxFE) for Broadband Digital Set-Top Boxes. – Analog Dialogue, 2001, 35-1.
10. Голуб В. Новые синтезаторы частот серии ADF4xxx. – Chip News, 2002, № 4, с.20.
11. Голуб В. Модуляция GMSK в современных системах радиосвязи. – Chip News, 2001, № 8, с.18 (поправка в № 9, с.63).
12. Шахнович И. Сотовый телефон третьего поколения: SuperHomodyne versus SuperHeterodyne. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 3, с.20.
13. Голуб В. Цифровая обработка сигналов: сигма-дельта АЦП. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 4, с.22.
14. EN 300 959 ETSI European Standard: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Modulation (GSM 05.04 version 8.1.2 Release 1999). – ETSI Catalogue, 3rd Quarter 2002.

Голуб Владислав Сергеевич. Канд. техн. наук.
 Научно-производственная фирма VD MAIS, г.Киев
<http://www.vdmais.kiev.ua>; info@vdmais.kiev.ua
 тел. (+38 044) 2271356, 2272262, 2275281.