

Формирование и исследование сигналов с амплитудно-частотной модуляцией с помощью приборов компании Rigol

Н. Лемешко, д.т.н.¹, М. Горелкин²

УДК 535.131:621.317 | ВАК 2.2.4

В ряде радиосистем нужно передавать совместно два потока данных, различающихся назначением и скоростями. Для этой цели может применяться амплитудно-частотная модуляция (АЧМ). В статье рассматриваются вопросы практического использования сигналов с АЧМ, их генерации и измерения характеристик. Приведен пример формирования сигналов с АЧМ с использованием генератора Rigol DSG3136B-IQ и исследования их свойств с помощью осциллографа Rigol MSO8204 и анализатора спектра Rigol RSA5056-TG.

Одной из основных причин развития радиоэлектроники является всё возрастающая потребность в повышении объемов передаваемой информации. Для увеличения эффективности использования радиочастотного спектра выработан ряд методов, включая временное уплотнение, использование специальных видов модуляции и кодирования информации [1]. На сегодняшний день большинство радиосистем передают и обрабатывают сигналы в цифровом виде и могут быть объединены в специализированные сети передачи данных. Примерами, ставшими классическими, являются сети беспроводного массового радиодоступа 4G LTE, транкинговой связи, Wi-MAX и др. В таких радиосетях используются сигналы с цифровыми видами модуляции, среди которых в сетях 4G LTE наиболее распространены OFDM QPSK, 16QAM, 64QAM. Эти виды модуляции удачно и обоснованно сочетают в себе угловые и амплитудные вариации несущей. Их важной особенностью является то, что передаваемые символы кодируются здесь одновременно с использованием и амплитуды, и фазы. Соответственно, такие сигналы при приеме требуют классического квадратного разложения и служат для передачи единого цифрового информационного потока.

Однако в некоторых сферах применения радиосистем необходимо формировать, передавать и обрабатывать два физических потока информации с сильно отличающимися скоростями. В частности, такие решения могут применяться:

- в радиосистемах, передающих информацию принципиально разного назначения (видео и звук, звук и телетекст);
- в системах закрытой передачи данных, в которых ключ и информация могут передаваться в разных потоках;
- в системах радионавигации, где дальномерные коды и альманахи передаются по отдельности;
- в системах условного доступа, в которых, например, потоковое видео передается в общедоступном формате, а специальные оповещения передаются в отдельном потоке и для их вывода на экран необходимо использовать аппаратный ключ;
- в системах радиосвязи, где реализуется подстройка по частоте на основе вспомогательного сигнала.

Все перечисленные примеры отличаются тем, что информационные потоки в них имеют сильно различающиеся скорости. Передача двух информационных потоков может быть осуществлена при помощи сочетания амплитудной и частотной модуляций (АЧМ) вне зависимости от того, идет ли речь об аналоговых или цифровых данных. Известным достоинством частотной модуляции является ее повышенная помехозащищенность в сравнении с амплитудной модуляцией, а сигналы с амплитудной модуляцией отличаются простотой обработки. Вместе с тем, сочетание двух типов модуляций для одной несущей накладывает некоторые ограничения на характеристики модулирующих сигналов, которые будут обоснованы ниже.

В реальных радиосистемах для формирования сигналов с АЧМ необходимо использовать специализированные модуляторы, работающие с двумя независимыми модулирующими сигналами. В случае отладки

¹ АО «Корпорация «Комета», начальник отдела, nlem83@mail.ru.

² ООО «РШ Тех», менеджер по продукту, mikhail.gorelkin@rsh-tech.ru.

устройств обработки АЧМ целесообразно использовать специальные лабораторные генераторы, допускающие совмещение амплитудной и частотной модуляций. При этом, анализируя перечисленные области потенциального применения АЧМ, можно ожидать, что частотный диапазон будет простирается до 3 ГГц и выше. Следовательно, подавляющее большинство генераторов прямого цифрового синтеза не будут являться универсальным решением для формирования АЧМ, и здесь лучше использовать подходящие аналоговые генераторы.

Целью настоящей публикации является определение подходов к формированию и обработке сигналов с АЧМ применительно к задачам радиосвязи.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ С АЧМ

Для построения математической модели сигнала с АЧМ воспользуемся классическим подходом [2, 3] и рассмотрим синусоидальную несущую на частоте f_0 , подвергаемую одновременно амплитудной и частотной однонаправленной модуляциям с частотами f_A и f_q соответственно. Пусть вначале имеет место только амплитудная модуляция, тогда соответствующий сигнал будет описываться уравнением

$$U_{AM}(t) = U_m (1 + M \cos(2\pi f_A t + \Phi_A)) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где U_m – амплитуда несущей в отсутствие модуляции; M – глубина модуляции; t – время; Φ_A и φ_0 – начальные фазы модулирующего и несущего колебаний. Для получения спектрального состава сигнала преобразуем (1) к виду

$$\begin{aligned} U_{AM}(t) &= U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + MU_m \cos(2\pi f_A t + \Phi_A) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) = \\ &= U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + 0,5MU_m \cos(2\pi(f_0 + f_A)t + \varphi_0 + \Phi_A) + \\ &+ 0,5MU_m \cos(2\pi(f_0 - f_A)t + \varphi_0 - \Phi_A). \end{aligned} \quad (2)$$

Как следует из уравнения (2), при однонаправленной амплитудной модуляции (АМ) в спектре, помимо несущей, будет наблюдаться пара модуляционных составляющих с амплитудой $0,5MU_m$, отстоящих по частоте от несущей на значение f_A .

Теперь перейдем к случаю однонаправленной частотной модуляции (ЧМ). Пусть зависимость частоты от времени описывается уравнением $f(t) = f_0 + \Delta f \cos(2\pi f_q t + \Phi_q)$, где Δf – девиация частоты, Φ_q – начальная фаза модулирующего по частоте сигнала. Для получения зависимости полной фазы от времени проинтегрируем по времени последнее уравнение, умноженное на 2π . Получим

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + (\Delta f / f_q) \sin(2\pi f_q t + \Phi_q) + \varphi_0. \quad (3)$$

В уравнении (3) отношение $\Delta f / f_q = m$ принято называть индексом однонаправленной частотной модуляции. Сигнал с частотной модуляцией описывается так:

$$U_{ЧМ}(t) = U_m \cos(2\pi f_0 t + m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q) + \varphi_0). \quad (4)$$

Сигнал с однонаправленной ЧМ для малых индексов модуляции $m \ll 1$ может быть легко разложен на три спектральные составляющие. Действительно,

$$\begin{aligned} U_{ЧМ}(t) &= U_m \cos(m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q)) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) - \\ &- U_m \sin(m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q)) \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (5)$$

Для малых значений m имеем $\cos(m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q)) \approx 1$; $\sin(m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q)) \approx m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q)$. На основании этого из равенства (5) получаем

$$\begin{aligned} U_{ЧМ}(t) &\approx U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) - U_m m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q) \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) = \\ &= U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + 0,5U_m \cos(2\pi(f_0 + f_q)t + \varphi_0 + \Phi_q) + \\ &+ 0,5U_m \cos(2\pi(f_0 - f_q)t + \varphi_0 - \Phi_q). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, для малых значений индекса однонаправленной модуляции спектр сигнала с ЧМ будет иметь несущую и две модуляционные составляющие с амплитудами $0,5mU_m$. Однако на практике соотношение девиации частоты и частоты модулирующих колебаний оказывается существенно больше единицы, и значение m может достигать многих сотен, поэтому рассмотренное приближение обычно не состоятельно.

При проведении дальнейшего анализа будем считать нулевыми начальные фазы φ_0 , Φ_A и Φ_q , поскольку их значения не имеют определяющего влияния на дальнейший анализ. Для произвольного значения индекса модуляции существует разложение в бесконечный ряд [2], которое имеет следующий вид:

$$U_{ЧМ}(t) = U_m \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) \cos(2\pi(f_0 + kf_q)t) \quad (7)$$

где $J_k(m)$ – функция Бесселя индекса k аргумента m . Из данного представления следует, что спектр сигнала с ЧМ с произвольным индексом модуляции включает в себя ряд синусоидальных составляющих, симметрично расположенных в окрестности несущей частоты и отстоящих друг от друга на f_q .

При наложении однонаправленной амплитудной модуляции на сигнал, имеющий однонаправленную частотную модуляцию, каждая спектральная составляющая ЧМ-сигнала будет претерпевать расщепление на три гармоники. Действительно, совмещая (7) с (2), получим

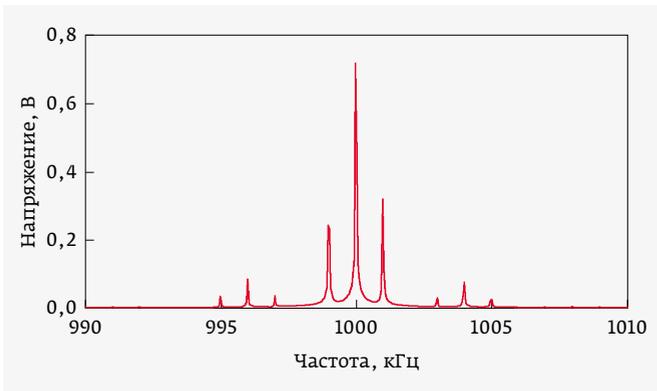


Рис. 1. Результат БПФ для сигнала с АЧМ при однотоновой модуляции по амплитуде и частоте, $f_A = 1$ кГц и $f_q = 4$ кГц

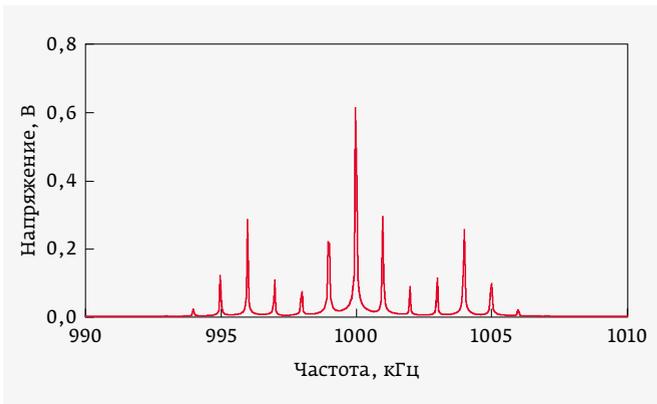


Рис. 2. Результат БПФ для сигнала с АЧМ при однотоновой модуляции по амплитуде и частоте, $f_A = 4$ кГц и $f_q = 1$ кГц

$$\begin{aligned}
 U_{\text{АЧМ}}(t) &= U_m (1 + M \cos(2\pi f_A t)) \cos(2\pi f_0 t + m \sin(2\pi f_q t + \Phi_q)) = \\
 &= U_m (1 + M \cos(2\pi f_A t)) \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) \cos(2\pi(f_0 + kf_q)t) = \\
 &= U_m \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) (\cos(2\pi(f_0 + kf_q)t) + \right. \\
 &\quad \left. + 0,5M(\cos(2\pi(f_0 + kf_q - f_A)t) + \cos(2\pi(f_0 + kf_q + f_A)t))) \right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Аналогичное явление, только с существенно более сложным наложением спектров будет наблюдаться в случае произвольных законов модуляции в АЧМ-сигнале. При этом расщепление за счет наложения АМ будет осуществляться для всех спектральных составляющих. В этом случае частотная модуляция сигналом, содержащим N_q гармоник, при малых значениях парциальных индексов модуляции создаст N_q^2 спектральных составляющих. Если же теперь на такую

последовательность гармоник будет наложена АМ, обусловленная сигналом с N_A гармониками, то спектр сформированного сигнала с АЧМ будет содержать $N_A N_q^2$ составляющих. Таким образом, спектр сигналов с АЧМ имеет существенно более сложную структуру, чем при использовании модуляции только одного вида. Особый интерес представляют случаи, когда модулирующие сигналы изменяются по произвольным законам.

ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА СИГНАЛОВ С АЧМ

Частотные свойства сигналов с амплитудно-частотной модуляцией являются их важнейшей характеристикой, определяющей возможность их конкретного практического применения. В случае использования однотоновой модуляции они вытекают непосредственно из формулы (8), однако этот тривиальный случай имеет для практики небольшую ценность.

Универсальным способом выявления частотных свойств сигналов является использование быстрого преобразования Фурье (БПФ). Отсчеты для его реализации могут быть получены на основе построенной выше математической модели сигналов с АЧМ при любых модулирующих зависимостях, отвечающих условиям непрерывности. Выполним расчетное исследование частотных свойств сигналов с АЧМ с использованием БПФ для случая однотоновой модуляции по амплитуде и по частоте.

На рис. 1 представлены результаты БПФ, полученные в окрестности несущей частоты для синтезированного сигнала с АЧМ с единичной амплитудой, $M = 0,8$, $m = 0,2$, $\Delta f = 800$ Гц, частотами $f_A = 1$ кГц и $f_q = 4$ кГц. Несущая частота равнялась 1 МГц. Частота выборки для построения БПФ составляла $3f_0$, размерность – $R = 65536$ точек, количество элементов разрешения по частоте составило $N_f = 32769$ шт., разрешение

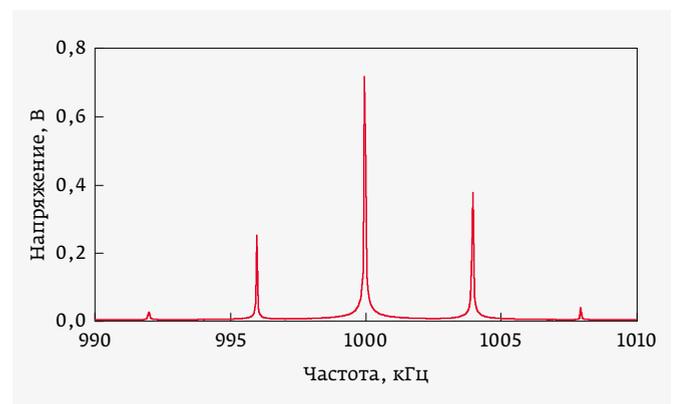


Рис. 3. Результат БПФ для сигнала с АЧМ при однотоновой модуляции по амплитуде и частоте, $f_A = f_q = 4$ кГц

по частоте $\Delta f = 45,8$ Гц. В построенном спектре наблюдается три группы гармоник, относящихся к несущей и модуляционным составляющим, обусловленным ЧМ. Гармоники с максимальной амплитудой разнесены друг от друга по частоте на 4 кГц. Внутри каждой группы таких узкополосных составляющих имеется по три гармоники с частотным разнесом 1 кГц между ними. Боковые составляющие в каждой группе гармоник, как это было обосновано выше, определяются наложением амплитудной модуляции.

На рис. 2 показаны результаты БПФ, полученные при тех же параметрах преобразования и характеристиках сигнала, но теперь $f_A = 4$ кГц и $f_{\text{ч}} = 1$ кГц ($m = 0,8$). Здесь на отстройке ± 4 кГц от несущей у вызванных ЧМ модуляционных составляющих имеются гармоники, вызванные АМ. Такое сочетание модуляций приводит к появлению спектральных составляющих с отстройкой ± 2 кГц от несущей. Таким образом, в спектре сигналов с АЧМ при соответствующем выборе характеристик будет наблюдаться «перемешивание» спектральных составляющих, обусловленных АМ и ЧМ.

Частный случай представлен ситуацией, когда $f_A = f_{\text{ч}}$, и тогда спектральные составляющие, порожденные АМ и ЧМ, накладываются друг на друга и не могут быть разделены, например, фильтрацией. Для этого случая спектр в окрестности несущей представлен на рис. 3 для $f_A = f_{\text{ч}} = 4$ кГц, $m = 0,2$. Амплитуда модуляционных спектральных составляющих при равенстве частот модулирующих гармонических колебаний будет определяться наибольшим из значений M и m . Асимметрия по амплитуде является следствием того, что спектральные составляющие, вызванные ЧМ, находятся в противофазе, а АМ – в фазе друг с другом. Следовательно, при малых значениях m амплитуды гармоник с частотами $f_0 - f_{\text{ч}}$ и $f_0 + f_{\text{ч}}$ составят $0,5U_{f_0}(M - m)$ и $0,5U_{f_0}(M + m)$ соответственно, где U_{f_0} – амплитуда спектральной составляющей на несущей частоте.

Указанная особенность обеспечивает подавление одной боковой полосы при равенстве значений M и m . На рис. 4 построена спектрограмма для $f_A = f_{\text{ч}} = 4$ кГц, $m = M = 0,8$ ($\Delta f = 3200$ Гц). Здесь левая модуляционная составляющая подавлена, а амплитуда правой существенно увеличена за счет совмещения модуляции. Известно [2], что в целях повышения эффективности использования спектрального ресурса многие радиовещательные станции работают на одной боковой полосе (SSB-сигналы). При использовании сигналов с АЧМ и двух одинаковых модулирующих сигналов ослабление одной боковой полосы может быть достигнуто выбором характеристик модуляции, что будет способствовать упрощению схемных решений возбуждателей АЧМ.

В большинстве систем радиовещания, использующих ЧМ, передающие устройства настраивают таким

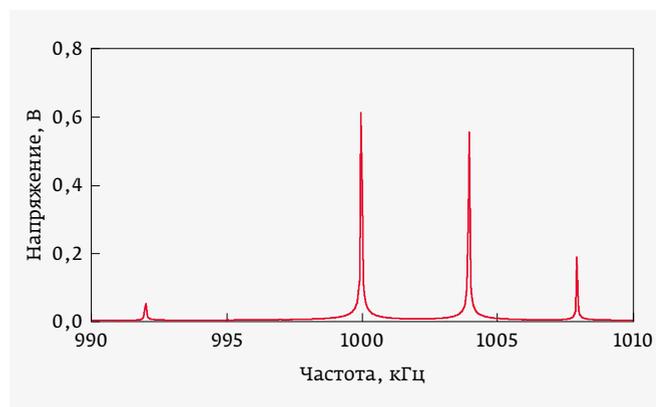


Рис. 4. Результат БПФ для сигнала с АЧМ при однотоновой модуляции по амплитуде и частоте, при $f_A = f_{\text{ч}} = 4$ кГц, $m = M = 0,8$

образом, чтобы индекс ЧМ был существенно больше единицы. Это позволяет расширить спектр сигнала, что повышает устойчивость к узкополосным помехам. После осуществления ЧМ выходной сигнал подвергается фильтрации с тем, чтобы он занимал приемлемую полосу и обеспечивалась бы должная спектральная эффективность. Считается, что качество передаваемой информации будет сохранено, если канал связи имеет ширину полосы пропускания не менее $2\Delta f$ [2]. На рис. 5а представлена спектрограмма сигнала с ЧМ, построенная для $f_{\text{ч}} = 2$ кГц, $\Delta f = 10$ кГц, $m = 5$. Большая часть энергии сигнала (свыше 90%) укладывается в полосу $2\Delta f$, за пределами которой спектральные составляющие резко спадают по амплитуде. На рис. 5б и 5в представлены спектрограммы сигналов с АЧМ при синусоидальной амплитудной модуляции с частотами 500 и 2000 Гц. Видно, что при $f_A = f_{\text{ч}}$ спектр сигнала занимает существенно меньшую полосу. Можно считать, что сигнал с АЧМ при несовпадении частот однотоновых модуляций по амплитуде и частоте имеет полосу $2(f_{\text{ч}} + f_A)$.

Как отмечалось выше, типовым назначением сигналов с АЧМ может являться передача двух независимых информационных потоков, которые будут иметь разные полосы модулирующих сигналов. В рамках дальнейшего анализа будем полагать, что полоса сигнала, модулирующего несущую по амплитуде, существенно меньше, чем модулирующего по частоте, а применяемые для модуляции сигналы в общем случае не являются периодическими.

При использовании для модуляции непериодических зависимостей сигналы с АЧМ не будут иметь линейчатый спектр. На рис. 6а показан результат БПФ, полученный при ЧМ сигналом гладкой формы с девиацией частоты $\Delta f = 100$ кГц и эквивалентным индексом

модуляции порядка 100. БПФ выполнено при размерности $R = 4096$ точек, количество элементов разрешения по частоте составило $N_F = 2049$ шт., разрешение по частоте $\Delta f = 732$ Гц. Огибающая спектра сигнала с ЧМ имеет форму с подъемом ближе к граничным частотам, однако в общем случае ее конкретный вид зависит от характера изменения модулирующего сигнала. На рис. 6б показан спектр АЧМ, когда на тот же сигнал наложена полигармоническая амплитудная модуляция (10 гармоник) с максимальной частотой 20 кГц и парциальным значением глубины модуляции $M_{\Gamma} = 0,08$ для каждой из таких гармоник. Из сопоставления рис. 6а

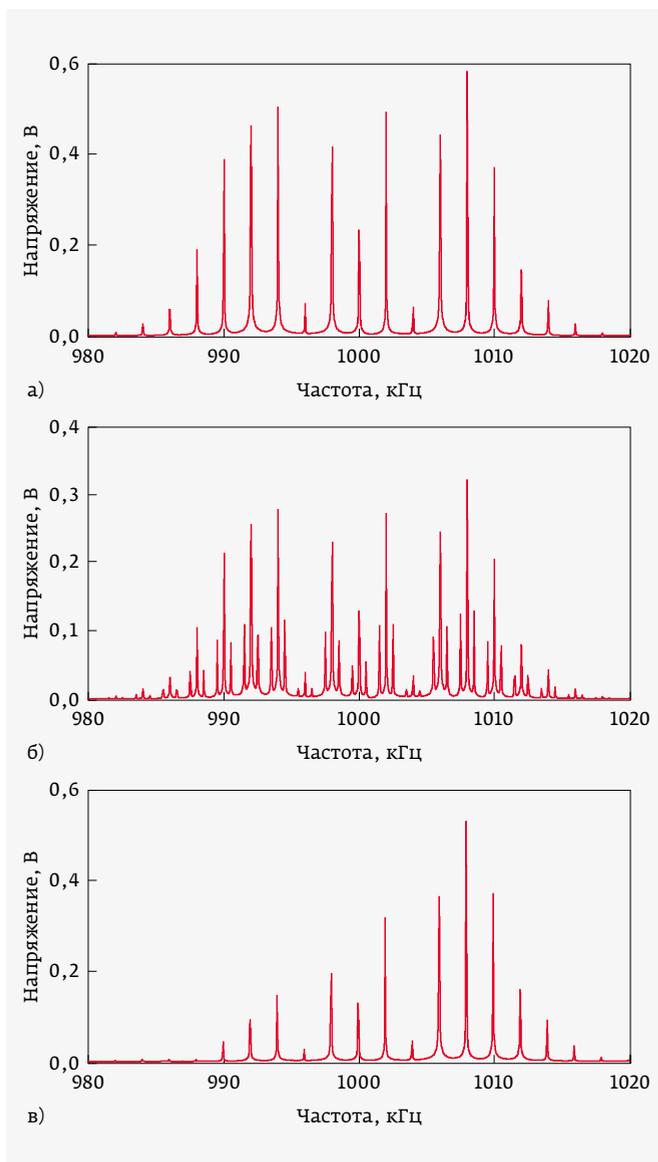


Рис. 5. Результат БПФ для сигнала: а – однотоновой ЧМ, $f_c = 2$ кГц, $m = 5$; б – с АЧМ при $f_A = 500$ Гц; в – с АЧМ при $f_A = 2$ кГц

и 6б следует, что добавление амплитудной модуляции приводит к появлению ее артефактов только на спектральных спадах и несколько снижает среднее значение огибающей спектра в полосе сигнала с АЧМ за счет перераспределения энергии между спектральными составляющими.

Таким образом, основные частотные свойства сигналов с АЧМ состоят в следующем:

1. Спектральные составляющие, порожденные АМ и ЧМ, при произвольных законах модуляции накладываются друг на друга и не могут быть отделены элементарной фильтрацией.
2. Спектр сигналов с АЧМ обычно имеет асимметрию с небольшим подъемом огибающей в высокочастотной его части (рис. 6б) и весьма резкие спады в районе границ занимаемой полосы, что может упростить реализацию фильтрации в приемно-передающих устройствах при условии традиционного ограничения полосы модулирующих сигналов.
3. Ширина полосы сигнала с АЧМ в общем случае составит $\Delta f_3 = 2(\Delta f + f_{A,max})$, где $f_{A,max}$ – наивысшая частота спектра сигнала, модулирующего по амплитуде.

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С АЧМ

Главной особенностью сигналов с АЧМ является сочетание двух видов модуляции – амплитудной и частотной. Соответственно, в предположении о передаче двух независимых потоков информации схема детектора сигналов с АЧМ должна содержать амплитудный и частотный детекторы. Для определенности будем считать, что предельная скорость изменения сигнала, модулирующего по амплитуде, существенно меньше, чем второго модулирующего сигнала. Обработка сигналов с АЧМ должна производиться после переноса на промежуточную частоту.

Структурная схема приемного устройства, предназначенного для обработки сигналов с АЧМ, в упрощенном виде представлена на рис. 7. Входной сигнал поступает на вход преселектора, выполняющего роль полосового фильтра, настроенного на несущую частоту и предназначенного для ослабления по зеркальному каналу приема. На смеситель подается входной сигнал, прошедший полосовую фильтрацию, и синусоидальное напряжение гетеродина. После переноса на промежуточную частоту сигнал с АЧМ подвергается фильтрации для подавления всех лишних составляющих спектра и помех вне канала передачи. Фильтр промежуточной частоты (ПЧ) должен иметь достаточную полосу пропускания, чтобы искажения показанных на рис. 6б крайних модуляционных составляющих, расположенных на спектральных спадах, были приемлемыми. Оценка необходимой полосы частот для сигналов с АЧМ была дана выше.

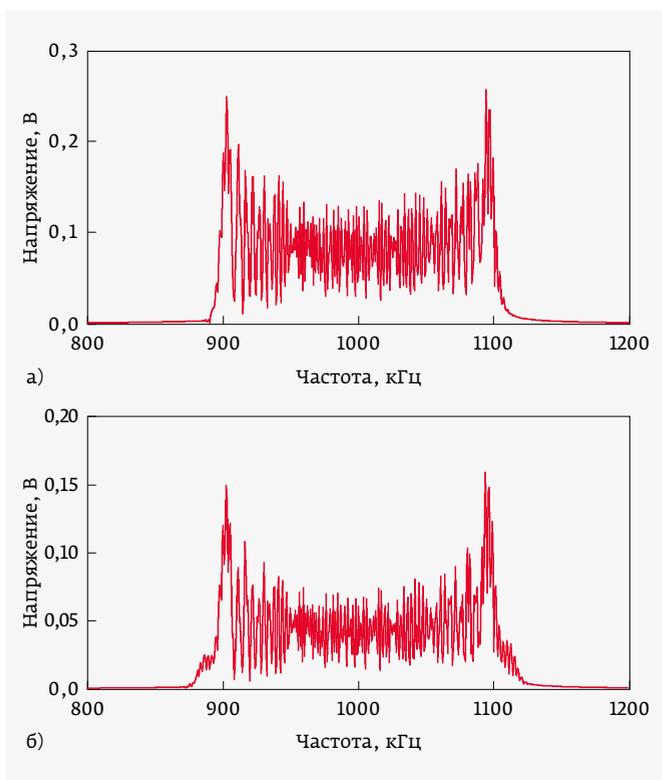


Рис. 6. Результаты БПФ, полученные при частотной модуляции сигналом гладкой формы при $\Delta f = 100$ кГц: а – в отсутствие наложения АМ; б – при наложении полигармонической АМ с максимальной частотой 20 кГц

Далее обработка сигналов производится в двух независимых каналах, реализующих функции амплитудного и частотного детектора (АД, ЧД). АД целесообразно строить по классической схеме [4], включающей нелинейный элемент – диод, образующий однополупериодный выпрямитель, а также фильтр нижних частот на основе RC-цепи. Характеристики фильтра нижних частот должны быть подобраны таким образом, чтобы наложение ЧМ не приводило к появлению заметных ее артефактов в выходном сигнале тракта амплитудной демодуляции. Учитывая, что для радиосвязи используют в основном узкополосные сигналы, можно ожидать соблюдения соотношения $2(\Delta f + f_{A,max})/f_0 < 0,1$. Для случая переноса на ПЧ это соотношение для анализа должно быть заменено на $2(\Delta f + f_{A,max})/f_{ПЧ}$, которое будет существенно больше предыдущего. При выборе граничной частоты фильтра нижних частот

необходимо ориентироваться на значение $f_{ПЧ} - \Delta f - f_{A,max}$ и исходить из условия постоянства выходного напряжения в канале АМ при подаче на вход детектора синусоидального сигнала с постоянной амплитудой и указанной частотой.

Второй канал, предназначенный для выделения информации, передаваемой на основе ЧМ, может включать ЧД разных типов. В схеме на рис. 7 предполагается использование классического ЧД, построенного по балансной схеме и основанного на преобразовании частотной модуляции в амплитудную и последующем детектировании. Входной сигнал здесь поступает на блок автоматической регулировки усиления (АРУ), который должен иметь достаточное быстродействие для того, чтобы компенсировать сравнительно медленные изменения амплитуды, вызванные наложением АМ. Амплитудный ограничитель, являющийся следующим элементом, необходим для того, чтобы исключить подачу на ЧД сигналов чрезмерно больших уровней, способных перевести его в резко нелинейный режим и существенно исказить принимаемую информацию. Ограниченный по амплитуде сигнал относительно постоянного уровня подается на балансный трансформатор и далее на пару колебательных контуров со взаимно отстроенными резонансными частотами, которые трансформируют ЧМ в АМ. Остаточная паразитная амплитудная модуляция, вызванная сочетанием АМ и ЧМ и обусловленная инерционностью АРУ, должна быть ограничена таким образом, чтобы выходной сигнал канала ЧМ имел качество не хуже заданного.

В составе балансного ЧД применяются два колебательных контура, каждый из которых представляет собой полосовой фильтр. Детектирование осуществляется за счет того, что их резонансные частоты расположены выше и ниже значения $f_{ПЧ}$, и оба контура работают на боковой части амплитудно-частотной характеристики. Сформированная таким образом пара сигналов

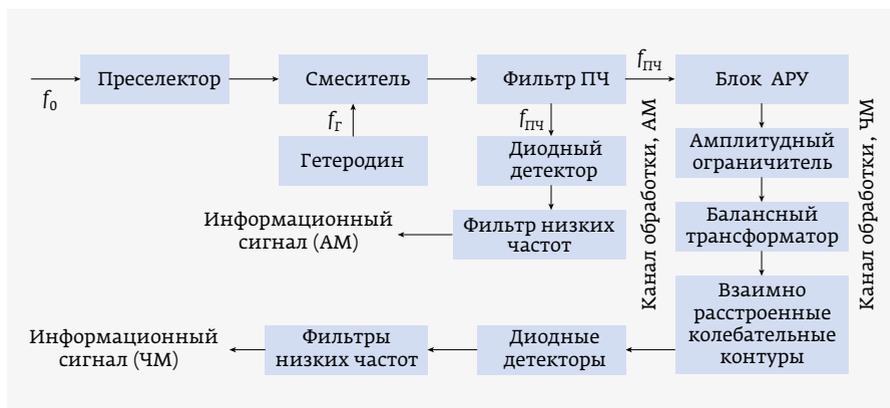


Рис. 7. Структурная схема детектора сигналов с АЧМ

имеет амплитудную модуляцию и находится в противофазе друг по отношению к другу. В результате их обычного амплитудного детектирования формируется дифференциальный информационный сигнал, соответствующий первоначальной ЧМ с точностью до погрешностей обработки.

При необходимости полученные информационные сигналы могут быть усилены для последующего вывода средствами отображения информации либо иной обработки. В составе схемы на рис. 7 могут быть использованы ЧД и АД, построенные по любым другим схемам.

Анализируя предложенную схему демодуляции сигналов с АЧМ с двумя информационными потоками, можно сделать следующие выводы:

1. В зависимости от схемотехнического решения приемного устройства на глубину АМ должны быть наложены такие ограничения, которые обеспечивают нормальный режим работы канала ЧД.
2. Максимальная скорость изменения амплитуды при АМ должна быть ограничена для обеспечения качественной работы АРУ в канале ЧД.
3. Характеристики АД должны выбираться так, чтобы он не реагировал на наличие частотной модуляции.

Описанные функции каналов обработки в схеме на рис. 7 могут быть реализованы после оцифровки сигналов на ПЧ, например, с использованием программируемых логических интегральных микросхем.

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С АЧМ

Принцип формирования сигналов с АЧМ полностью соответствует уравнению (8), согласно которому амплитудная модуляция должна накладываться на частотно-модулированный сигнал. Это, очевидно, должно быть достигнуто сочетанием узлов ЧМ и АМ, построенных, например, на основе биполярных транзисторов и на принципах управления емкостью и модуляции базового напряжения.

На рис. 8 представлена структурная схема такого модулятора для формирования АЧМ с наиболее простой структурой, без дополнительных средств стабилизации несущей частоты. В схеме применяются два масштабирующих перестраиваемых усилителя/аттенюатора, которые предназначены для обеспечения изменения управляющих напряжений в диапазонах частот, соответствующих требуемым девиации частоты и глубине амплитудной модуляции при сохранении необходимой линейности ЧМ и АМ. Сигнал, задающий закон ЧМ, через такой усилитель подается на варикап, включенный, например, в состав колебательного контура перестраиваемого автогенератора, построенного по схеме индуктивной трехточки [5]. Варикап проявляет зависимость емкости от частоты, и при правильном подборе его характеристик резонансная частота

колебательного контура может приобретать линейную зависимость от модулирующего напряжения. В качестве усилительного элемента обычно используют биполярные транзисторы соответствующего частотного диапазона. Частотно-модулированный сигнал выводится из схемы через разделительный элемент, который необходим для устранения влияния постоянных токов на рабочие точки усилительных элементов, определяемые постоянным смещением на базе, если в схеме используются биполярные транзисторы. В качестве разделительного элемента обычно используется конденсатор, однако сигнал с ЧМ можно снимать с колебательного контура посредством индуктивной связи.

Далее сигнал с ЧМ поступает на амплитудный модулятор, который в одном из наиболее простых случаев может быть построен по схеме базовой модуляции. Здесь ключевым моментом является выбор рабочей точки усилительного элемента (биполярного транзистора), которая обычно обеспечивает режим работы с отсечкой с углами Берга, равными 60–120° (в отсутствие сигнала АМ угол отсечки составляет 70–80°). Установка рабочей точки осуществляется задачей постоянного смещения на базу транзистора. Для выделения полезного сигнала с АЧМ в схеме амплитудного модулятора можно использовать колебательный контур с резонансом на частоте несущей и полосой пропускания не менее $2(\Delta f + f_{A,max})$. После формирования сигнал с АЧМ усиливается до требуемого уровня для дальнейшего применения.

На рис. 9 представлена соответствующая структурной схеме (рис. 8) принципиальная электрическая схема, в которой перестраиваемый автогенератор построен на основе варикапа, а амплитудный модулятор – по принципу базовой модуляции. Принцип функционирования узлов в составе схемы соответствует представленному выше описанию и не требует полного разъяснения.

Особенности данного схемотехнического решения состоят в следующем:

1. В схеме необходимо применять индуктивности и трансформаторы с ферритовыми магнитопроводами с учетом их фактических магнитных свойств на несущей частоте.
2. Частотный диапазон генерации сигналов с АЧМ ограничен паразитными свойствами используемых элементов. Для несущих частот выше 30 МГц предъявляются особые требования к качеству монтажа, которое должно соответствовать принятому для цифровых схем высокого быстродействия. В частности, необходимо применять поверхностный монтаж, минимизировать длину проводников и использовать линии передачи для исключения расстройки контуров из-за паразитных реактивностей.

3. Колебательный контур в перестраиваемом автогенераторе может быть заменен кварцевым резонатором при условии соблюдения ограничений на максимальный протекающий ток. Это позволит повысить максимальную частоту несущей.
4. Коэффициент усиления биполярных транзисторов, как и любых других усилительных элементов, всегда снижается с ростом частоты. Учитывая специфику назначения узлов схемы формирования сигналов с АЧМ и то, что эти сигналы являются узкополосными, усилительные элементы могут работать в режиме с низким коэффициентом усиления, то есть на спаде собственной амплитудно-частотной характеристики для выбранной схемы включения.
5. Размах сигнала, модулирующего по амплитуде, должен обеспечивать соблюдение ограничений на глубину модуляции M , чтобы на приемной стороне обеспечивалась качественная работа ЧД.

Представленные на рис. 8 и 9 схемы не являются единственно возможными решениями для формирования несущей с амплитудно-частотной модуляцией. Схема управляемого автогенератора с варикапом может быть заменена решением на основе реактивного транзистора, схемами с ферромодуляцией или с разновидностями фазового модулятора [5]. Представленная схема АМ может быть заменена на одно- и двухтактные схемы коллекторной амплитудной модуляции, на балансные схемы с подавлением несущей, схемы с подавлением одной боковой полосы.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ С АЧМ

Целью проведения измерений характеристик сигналов с АЧМ будет являться определение глубины АМ и девиации частоты при ЧМ путем измерения занимаемой полосы, а также определение законов АМ и ЧМ на некотором интервале времени. Соответственно, для этого необходимо использовать анализ во временной и в частотной областях, который в достаточном объеме может быть реализован с применением современных осциллографов с функцией спектрального анализа при достаточной мощности сигналов с АЧМ. Однако в общем случае для проведения таких измерений потребуются и осциллограф, и анализатор спектра.

Для оценки значения M необходимо наблюдать на осциллографе сигнал с АЧМ на интервале времени, достаточном для оценки максимального и минимального размаха сигнала. Высокочастотное заполнение в этом случае не будет влиять на результаты измерений. Для таких измерений можно использовать амплитудные гистограммы, если их построение поддерживается осциллографом. Кроме того, закон амплитудной модуляции может быть выявлен по форме огибающей,

а также при помощи детекторных головок [6], которые предназначены для выделения огибающей радиосигналов и нечувствительны к ЧМ. Использование детекторных головок дает возможность анализировать огибающую сигналов на интервалах времени, исчисляемых десятками и сотнями секунд, если осциллограф имеет функцию архива.

Девиация частоты при ЧМ может быть оценена на основе измерений занимаемой полосы Δf_3 в режиме анализа в частотной области. Как отмечалось выше, она составляет $2(\Delta f + f_{A,max})$. Значение $f_{A,max}$ может быть получено спектральным анализом выделенной амплитудной огибающей сигнала с АЧМ, характер изменения которой определен наложением АМ. Полоса Δf_3 при измерениях может определяться по критерию 99% мощности либо по заданному уровню спада спектральных составляющих [7].

Определение закона ЧМ не может быть осуществлено классическим спектральным анализом. Для решения этой задачи могут быть использованы следующие подходы:

1. Использование анализа спектра реального времени с функцией построения диаграммы «водопад», которая позволяет делать отсчеты по частоте и по времени.
2. Использование эталонного ЧД, который позволяет получить закон изменения сигнала, использованного для частотной модуляции.
3. Использование измерительных схем, включающих амплитудные ограничители, фильтры, сумматоры, генератор синусоидального сигнала, принцип действия которых основан на анализе биений между опорным и измеряемым сигналом с АЧМ.

При осуществлении измерений характеристик сигналов с АЧМ следует особое внимание обратить на соблюдение нагрузочного режима модулятора, формирующего сигнал с АЧМ. В части наложения АМ режимы холостого хода и номинальной нагрузки могут существенно отличаться друг от друга как нелинейными искажениями, так и амплитудой выходного сигнала. Для получения объективных результатов необходимо иметь априорную информацию о режиме нагрузки при эксплуатации модулятора и соблюдать его при измерениях.

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С АЧМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА СЕРИИ RIGOL DSG3136B-IQ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Оборудование и схемы измерений. Для формирования сигналов с АЧМ использовался генератор Rigol DSG3136B-IQ, имеющий диапазон рабочих частот от 9 кГц до 13,6 ГГц и, таким образом, перекрывающий подавляющее большинство приложений, в которых потенциально могут использоваться сигналы с АЧМ.

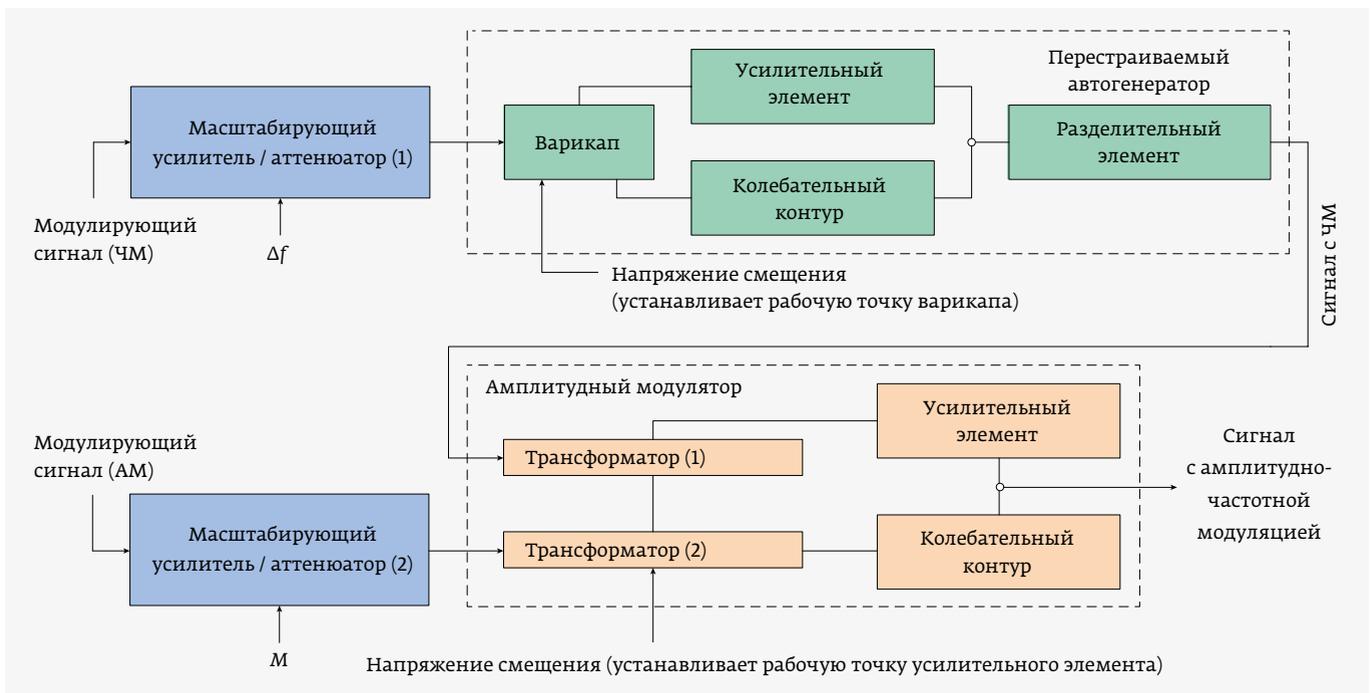


Рис. 8. Структурная схема модулятора, формирующего сигнал с амплитудно-частотной модуляцией

Модель Rigol DSG3136B-IQ – это комбинированный высокочастотный генератор лабораторного класса, применяемый для решения задач, требующих высокой точности воспроизведения сигнала. Для этих целей он имеет передовую систему генерации с точностью установки амплитуды не хуже 0,7 дБ, широкий динамический диапазон – от -130 до 27 дБм, превосходную чистоту спектра выходного сигнала (собственный фазовый

шум на частоте несущей 1 ГГц при отстройке 20 кГц не более -110 дБн / Гц; уровень гармонических искажений во всей полосе пропускания не выше -30 дБн), а также встроенные аналоговые и импульсный модуляторы, позволяющие ему формировать сигналы с амплитудной, частотной, фазовой и импульсной модуляциями, а также совмещать импульсную модуляцию с одним из видов аналоговой, либо использовать амплитудную

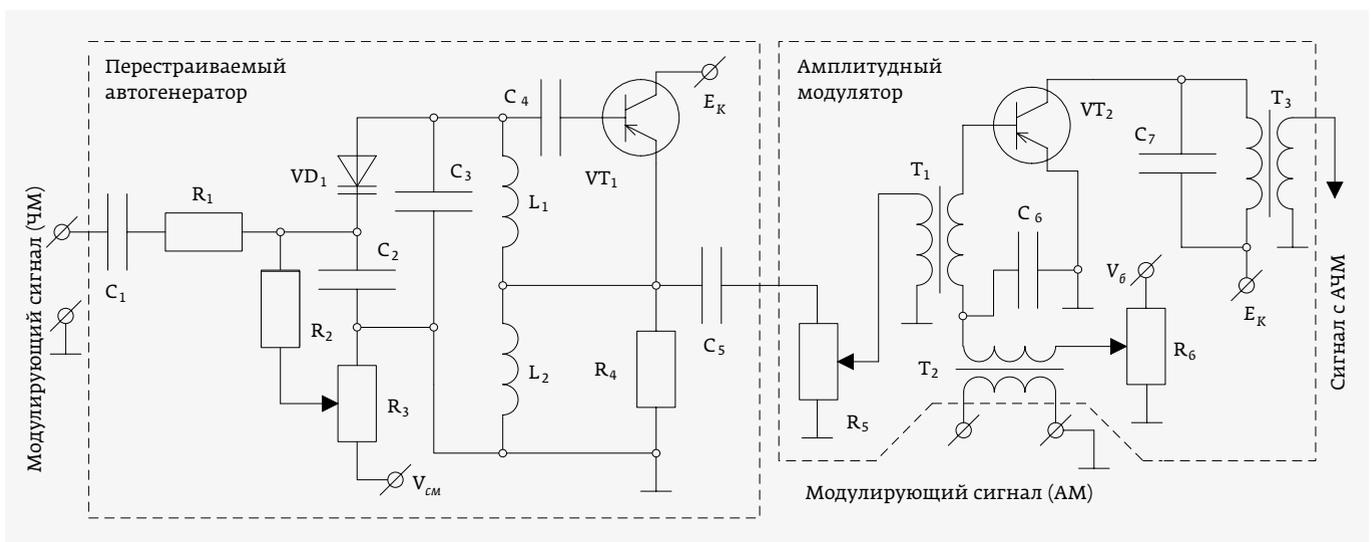


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема модулятора, формирующего сигнал с АЧМ



Рис. 10. Вкладка настройки AM генератора Rigol DSG3136B-IQ

модуляцию одновременно с частотной или фазовой. Версия генератора с индексом «-IQ» также оснащается встроенным квадратурным модулятором с полосой модуляции 60 МГц, который имеет внешние входы, что расширяет возможности по генерации, по сути, позволяя использовать Rigol DSG3136B-IQ как векторный генератор ВЧ-сигналов или генератор сигналов произвольной формы (ARB-генератор). Генератор имеет внутренний источник модулирующего сигнала, который отличается возможностью формирования синусоидального и других типов сигналов. Настройки генерации выполняются с использованием двух отдельных вкладок. В качестве примера на рис. 10 показана

вкладка для настройки амплитудной модуляции. Как видно, настройка модуляции на генераторе и его интерфейс отличаются простотой и понятностью.

Для реализации измерений сформированные сигналы с АЧМ подавались через коаксиальную линию либо на осциллограф, либо на анализатор спектра. При исследовании во временной области использовался осциллограф Rigol MSO8204 с рабочей полосой до 2 ГГц и четырьмя каналами. Измерения осуществлялись непосредственно по осциллограмме, а также с использованием функции статистической обработки выборок. Схема и фотография установки для проведения измерений во временной области показаны на рис. 11. Входное сопротивление канала осциллографа составляло 50 Ом, что необходимо не только для согласования, но и для сопоставления результатов измерений во временной и в частотной областях.

При исследовании сигналов с АЧМ в частотной области использовался анализатор спектра Rigol RSA5056-TG с диапазоном рабочих частот от 9 кГц до 6,5 ГГц и полосой анализа реального времени до 40 МГц.

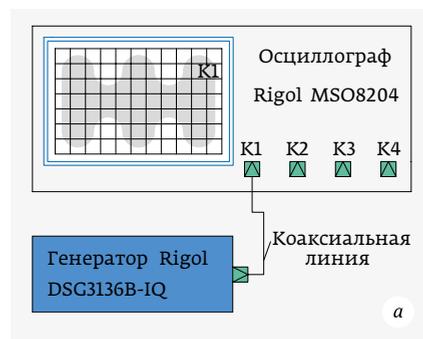
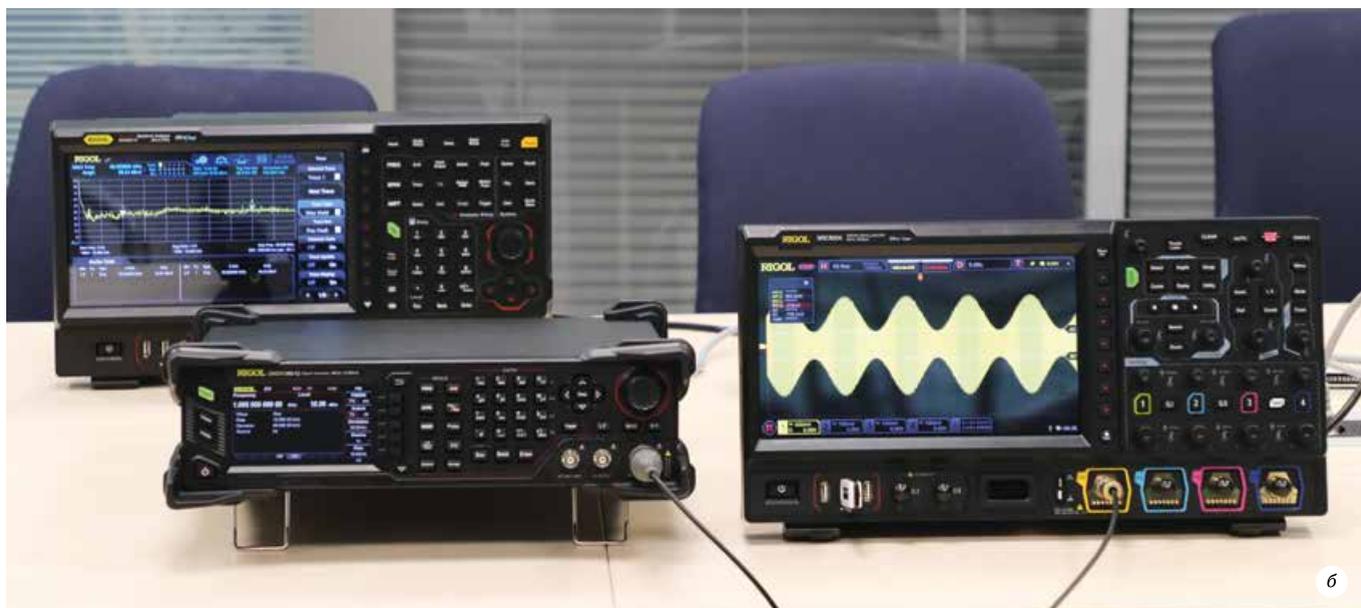


Рис. 11. Установка для исследования сигналов с АЧМ во временной области:
а – схема;
б – фотография



Использовавшийся прибор имел встроенный трекинг-генератор, который позволяет проводить анализ амплитудно-частотных характеристик. Схема и фотография установки для проведения измерений во временной области показаны на рис. 12.

Исследуемый сигнал. Как было показано выше, основными параметрами сигналов с АЧМ являются формы и частоты сигналов амплитудной и частотной модуляций, глубина амплитудной модуляции и девиация частотной модуляции. Лабораторные генераторы сигналов позволяют реализовывать сигналы с АЧМ с произвольными законами АМ и ЧМ, в особенности при использовании внешних источников модулирующих сигналов. При отладке реальных радиосистем целесообразно при модуляции использовать имитацию передаваемой информации для осуществления сопоставления входной и выходной информации в рамках реализации кольцевого тестирования трактов.

Для проведения измерений, результаты которых представлены ниже, посредством генератора Rigol DSG3136B-IQ формировались сигналы с совпадающими синусоидальными законами амплитудной и частотной модуляций, что, как было показано выше, соответствует важному частному случаю их формирования. Частота несущей для

исследований во временной области была выбрана равной 1000 МГц, мощность сигнала на выходе генератора равнялась 10 дБм.

Результаты измерений во временной области для сигналов с АЧМ, как это отмечалось выше, позволяют получить в первую очередь представление о законе и характеристиках амплитудной модуляции, а также измерить частоту несущей. С использованием генератора Rigol DSG3136B-IQ был сформирован такой сигнал с $M = 0,6$, $\Delta f = 50$ кГц, частотами $f_A = f_C = 10$ кГц ($m = 5$). На рис. 13 показана его осциллограмма при длительности развертки 1 нс/дел. и с использованием режима послесвечения. На осциллограмме хорошо видна область вариации по амплитуде, а изменение частоты незаметно вследствие его малости. Период несущей может быть отсчитан непосредственно по шкале времени осциллографа, в среднем он составляет 1 нс. При меньшей длительности развертки могут быть оценены границы изменения несущей частоты, однако для этого лучше использовать анализатор спектра.

На рис. 14 представлены осциллограммы, полученные при длительности развертки 50 мкс/дел. На них размещены курсоры для определения максимальной и минимальной амплитуд при АМ. Для максимума огибающей курсоры расположены на уровнях 1,34 и -1,4 В, для минимума – на уровнях 0,38 и -0,38 В. Соответственно, для точек максимумов и минимумов огибающей удвоенная амплитуда сигнала составит $V_{max} = 2,74$ В и $V_{min} = 0,76$ В.

Из принципов АМ ясно, что $2U_m(1 + M) = V_{max}$; $2U_m(1 - M) = V_{min}$. Если взять отношение этих уравнений, то получим $(1 + M) / (1 - M) = V_{max} / V_{min}$, откуда легко получить $M = (V_{max} - V_{min}) / (V_{max} + V_{min})$. Подстановка значений V_{max} и V_{min} в крайнее уравнение дает результат $M = 0,57$, что почти совпадает с установленной на генераторе глубиной модуляции 0,6.

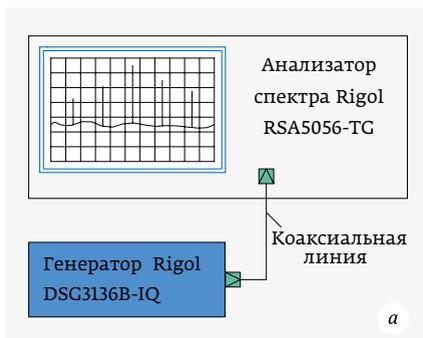


Рис. 12. Установка для исследования сигналов с АЧМ в частотной области:
 а - схема;
 б - фотография



Генераторы Rigol серии DSG3000B



Основные характеристики

- Диапазон частот: от 9 кГц до 13,6 ГГц
- Мощность выходного сигнала: от -110 до +13 дБм
- Поддержка АМ, ЧМ, ФМ, ИМ
(налоговая и импульсная модуляции совместно)
- Поддержка IQ-модуляции (в модификации DSG3000B-IQ)
- Фазовый шум: -110 дБн/Гц при несущей 1 ГГц и отстройке 20 кГц

Сервисный центр:
+7 495 981 35 67
SERVICE@RSH-TECH.RU

Отдел продаж:
+7 495 981 35 60
INFO@RSH-TECH.RU

ООО «РШ ТЕХНОЛОГИИ»
WWW.RSH-TECH.RU



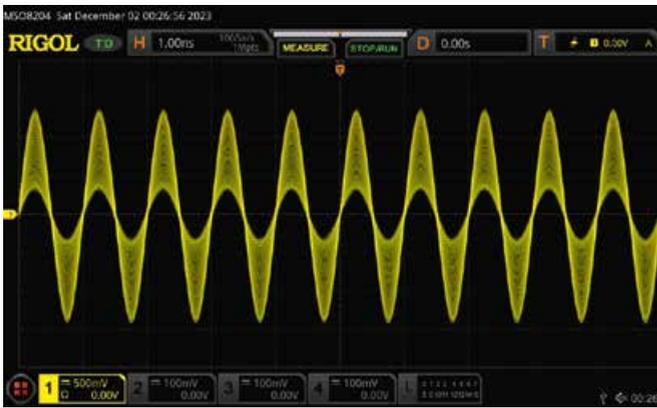


Рис. 13. Осциллограмма сигнала с АЧМ в режиме послесвечения при длительности развертки порядка одного периода

Измерить частоту модулирующего сигнала при его периодическом характере можно непосредственно по временной шкале осциллографа, например, с использованием курсоров. В рассматриваемом случае измерения удобно проводить без курсоров, они дают значение частоты модулирующего сигнала, равное 10 кГц.

Статистические измерения во временной области.

В общем случае закон изменения модулирующего сигнала может быть определен путем вторичной обработки осциллограмм, при которой выбираются максимальные значения сигнала за период несущей. Если же модулирующий по амплитуде сигнал периодический, то некоторую информацию о нем можно почерпнуть из статистического распределения выборок. На рис. 15 представлены результаты построения гистограммы, характеризующей плотность вероятности получения тех или иных отсчетов для исследуемого сигнала. Плотность вероятности обратно пропорциональна скорости изменения сигнала, для которого есть две причины. Это собственно синусоидальный характер изменения несущей и наложенная на нее амплитудная модуляция. С учетом того, что частота модулирующего сигнала несоизмеримо меньше частоты несущей, можно ожидать, что оба этих фактора дадут визуально отличимые распределения. Результат статистических измерений показан на рис. 15. Здесь гистограмма наложена на шкалу амплитуд в левой части рисунка.

Ожидаемо гистограмма имеет симметричную форму. Верхняя и нижняя ее части характерны для сочетания двух арксинусных распределений, которым подчиняются эквидистантные выборки синусоидального сигнала [8]. В общем случае для формулировки выводов о характере модулирующего сигнала на основе статистических гистограмм необходима дополнительная информация.

Результаты измерений в частотной области.

На рис. 16 представлены результаты измерений занимаемой полосы для сигнала с теми же характеристиками. Поскольку индекс частотной модуляции более единицы, то на спектре видно множество узкополосных составляющих, являющихся результатом ЧМ. Максимальный их уровень составляет около 0 дБм, маркеры поставлены на те составляющие, которые оказываются наиболее близкими к несущей и при этом не менее чем на 30 дБ ниже указанного уровня. Если использовать данный критерий, принятый в радиосвязи, то занимаемая сигналом с АЧМ полоса частот составит 160–180 кГц в соответствии с положением маркеров на спектрограмме.

Согласно данной выше оценке, занимаемая полоса сигнала с АЧМ составляет $\Delta f_3 = 2(\Delta f + f_{A,max})$. Для выбранных параметров АМ и ЧМ имеем $\Delta f_3 = 120$ кГц. Это значение соответствует спаду спектра сигнала с АЧМ на 7–10 дБ. Таким образом, при оценке занимаемой в эфире сигналом с АЧМ полосы лучше использовать полосу, на 20–30% большую расчетной, в особенности

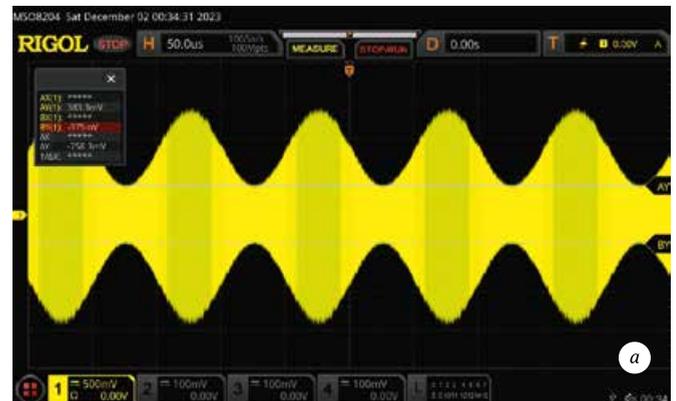


Рис. 14. Курсорные измерения по огибающей для расчета глубины АМ: а – для минимума; б – для максимума



МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ 2024

29 мая – 1 июня
ПАТРИОТ ЭКСПО

ОРГАНИЗАТОР
САЛОНА



МЧС РОССИИ

ОПЕРАТОР
САЛОНА



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

www.isse-russia.ru



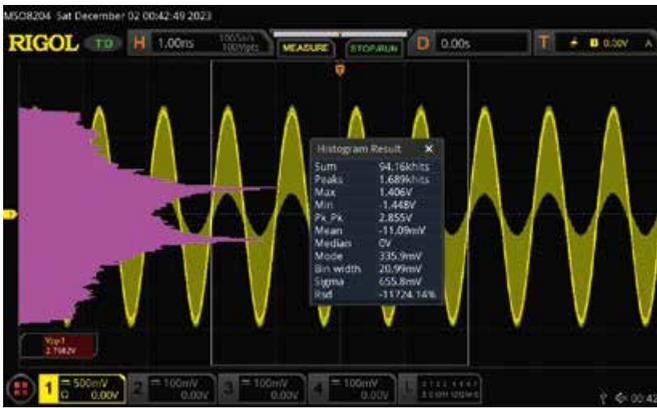


Рис. 15. Результат статистических измерений для сигнала с АЧМ



Рис. 16. Результаты измерений занимаемой полосы сигнала с АЧМ

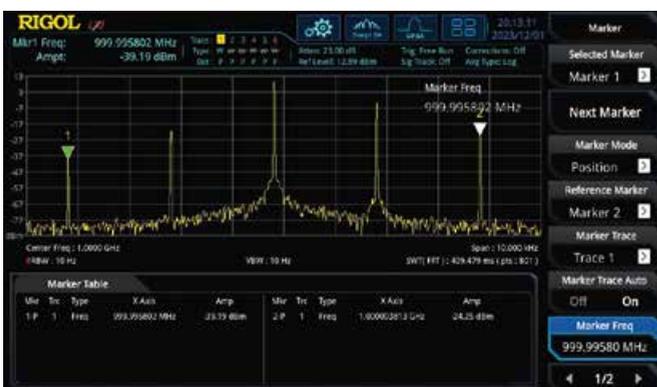


Рис. 17. Спектрограмма сигнала с АЧМ при синусоидальных АМ и ЧМ

при невысоком качестве выходных фильтров передатчика. Необходимую ширину полосы пропускания внутренних трактов приемников и передатчиков можно оценивать непосредственно по представленному соотношению.

Для оценки подавления левой модуляционной полосы при совпадении законов АМ и ЧМ и равенстве $m = M$ на генераторе Rigol DSG3136B-IQ был сформирован сигнал с $M = 0,2$, $\Delta f = 400$ Гц, $f_A = f_C = 2$ кГц ($m = 0,2$). На рис. 17 показана его спектрограмма в окрестности несущей. Здесь ближайшие к несущей модуляционные составляющие имеют амплитуды $-3,5$ и $-21,5$ дБм (разница 18 дБ), а вторые, удаленные от несущей на удвоенную частоту модулирующего сигнала, – амплитуды $-24,3$ и $-39,2$ дБм (разница 14,9 дБ). Наличие АЧМ для сигнала подтверждается несимметрией спектра относительно несущей. Как мы видим, математически точного подавления низкочастотных модуляционных составляющих в данном случае достигнуть не удалось, однако в деле радиосвязи наблюдаемый выигрыш в 18 дБ в соответствующих приложениях позволит снизить требования к фильтрам и, соответственно, упростить схемотехнику передатчиков.

Что касается вторых модуляционных составляющих, то они порождаются ЧМ и имеют амплитуду порядка $m/2$ относительно первых для частот выше несущей.

Таким образом, мы рассмотрели подходы к измерениям характеристик сигналов с АЧМ во временной и в частотной областях.

Экспериментальные исследования сигналов с АЧМ, проводимые в обеспечение отладки радиотрактов, приемных и передающих устройств должны выполняться с использованием надежных и функциональных средств измерений, для которых наиболее востребованными оказываются типовые измерительные функции. Важнейшим вопросом является качество формирования таких сигналов, поскольку его погрешности способны проявляться на измерениях как во временной, так и в частотной областях. Это может стать причиной ошибочной трактовки полученных результатов и неоправданных затрат времени на поиски несуществующих проблем в проектируемых устройствах.

Как было показано выше, генераторы Rigol серии DSG3000 отлично справляются с задачей формирования сигналов с АЧМ, однако этим их назначение и функции, естественно, не ограничиваются. Приборы данной серии являются универсальными в части формирования сигналов с амплитудной, частотной, фазовой и импульсной модуляциями, что делает их востребованными в радиолaborаториях и сервисных центрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. и др.** Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под ред. Ширмана Я.Д. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. **Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2003. 462 с.
3. **Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971. 672 с.
4. **Румянцев К.Е.** Радиоприемные устройства. М.: Академия, 2006. 336 с.
5. **Першин В.Т.** Основы радиоэлектроники и схемотехники. Учебное пособие. Ч. 2. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2006. 152 с.
6. **Фомин А., Виктор Д.** Метрология и радиоизмерения. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. 508 с.
7. Справочник инженеров по радиомониторингу / Под ред. Слободнюка П.В. Киев, 2012. 720 с.
8. **Левшина Е.С., Новицкий П.В.** Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 975 руб.

РАДИОЛОКАЦИЯ ДЛЯ ВСЕХ

Верба В. С., Гаврилов К. Ю., Ильчук А. Р., Татарский Б. Г., Филатов А. А.

Под ред. чл.-корр. РАН Вербы В. С.

Настоящая книга одобрена научным советом Российской академии наук «Научные основы построения вычислительных, телекоммуникационных и локационных систем» отделения нанотехнологий и информационных технологий, возглавляемого академиком РАН Ю. В. Гуляевым, как научно-популярное издание

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2020. – 504 с.,
ISBN 978-5-94836-555-8

Представленный в научно-популярной книге материал можно назвать начальным курсом по радиолокации. В издании рассмотрены основные физические и теоретические вопросы радиолокации, принципы построения радиолокационных систем и основные области их практического использования. Рассмотренные в книге примеры типовых радиолокаторов и области их применений не исчерпывают весь возможный диапазон использования радиолокационной техники и принципов получения информации радиолокационными методами в повседневной жизни человека.

Книга ориентирована в первую очередь на выпускников школ и студентов младших курсов технических вузов, может быть интересна и для студентов старших курсов радиотехнических факультетов, а также для всех интересующихся радиолокацией.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru