Основной усилитель в ультразвуковых сканерах

Усиление эхо-сигналов в УЗ сканерах имеет специфические особенности, которых нет ни в одном другом устройстве для интроскопии.

УЗ колебания при распространении в мягких тканях претерпевают большие затухания, из-за чего динамический диапазон эхо-сигналов достигает 120 дБ. Амплитуда эхо-сигналов определяет яркость изображения и она должна быть одинаковой (при прочих равных условиях) у объектов, расположенных на разной глубине.

А это значит, что сигналы, приходящие с большей глубины в среднем нужно усиливать больше, чем сигналы, приходящие с меньшей глубины. При этом можно использовать два информативных признака – амплитудный и временной: импульсы большой амплитуды наиболее вероятно приходят с малых глубин, задержка же эхо по отношению к зондирующему импульсу однозначно связана с глубиной залегания объекта.

Как известно, динамический диапазон яркостей экрана монитора составляет 30 дБ (64 раза). Именно он несет в себе полезную информацию. Остальные же 90 дБ полного динамического диапазона эхо-сигналов нужно сжать. Это сжатие производят как бы с двух сторон – логарифмическим усилителем и блоком ВАРУ (временной автоматической регулировки усиления).

Логарифмический усилитель реализует амплитудно-селективный признак усиления: сигналы с большой амплитудой он усиливает с малым коэффициентом усиления и наоборот. Он представляет собой усилитель переменного тока, амплитудная характеристика которого описывается выражением

Uвых = Uвых.н [lg(Uвх/Uвх.н + 1)],

где Uвых.н, Uвх.н – амплитуды выходного и входного напряжений, соответствующие начальному участку амплитудной характеристики усилителя. Такая характеристика называется логарифмической амплитудной характеристикой (ЛАХ). Ее примерный вид показан на рис.1.

Рисунок 1. Характеристики логарифмического усилителя.

Блок ВАРУ автоматически изменяет коэффициент усиления во времени таким образом, чтобы компенсировать среднее систематическое затухание. Наиболее естественной функцией регулирования усиления во времени была бы растущая экспонента, поскольку ультразвук в тканях в среднем затухает по закону падающей экспоненты.

Однако на практике такой закон регулирования осуществить трудно, поэтому используют другие управляющие функции. Компенсация неинформативного среднего затухания, по сути, означает сжатие динамического диапазона.

Получаемое с помощью УЗ сканеров изображение бывает достаточно сложным. Ряд второстепенных (для данного исследования) деталей мешает сосредоточить внимание на более существенных. Блок ВАРУ предоставляет оператору замечательную возможность с помощью ручной регулировки устранять мешающие фрагменты и наоборот, подчеркивать полезные – выделять область интереса.

Для этого на определенных временных участках, соответствующих области интереса, усиление эхо-сигналов увеличивают, а на других участках – уменьшают. На рис.2 глубина локации объекта условно разбита на три зоны. Область интереса находится во второй зоне, а в первой и третьей расположены «мешающие» фрагменты.

Чтобы их ослабить и выделить область интереса, в первой и третьей зонах скорость нарастания функции усиления уменьшают по сравнению со скоростью средней функции, а во второй зоне – увеличивают. Таких зон регулировки усиления по глубине может быть от пяти до восьми. С помощью этих регулировок врач в соответствии со своим опытом и интуицией получает изображение, какое он считает наиболее адекватным исследуемому объекту.

Рисунок 2. Временная регулировка усиления.

В усилительном тракте логарифмический усилитель и блок ВАРУ могут располагаться в различной последовательности. одном из вариантов сигнал вначале поступает на логарифмический усилитель и затем усиливается в блоке ВАРУ, а во втором варианте – наоборот.

В каждом из этих вариантов к отдельным частям тракта усиления предъявляются различные требования. Например, в первом варианте логарифмический усилитель должен сжимать динамический диапазон сигналов на 90 дБ, а 30 дБ предоставляется для регулировки в блоке ВАРУ.

Рисунок 3. Структурная схема общего усилителя.

Во втором случае блок ВАРУ должен обеспечивать больший диапазон регулирования, что обычно вызывает затруднения. Структурная схема общего усилителя, соответствующая первому варианту, приведена на рис.3.

Сигнал от приемо-передатчика поступает на полосовой фильтр, который может перестраиваться в зависимости от рабочей частоты датчика, затем на логарифмический усилитель и ВАРУ. Далее он детектируется и дополнительно усиливается.

Логарифмические усилители выполняют на транзисторах и микросхемах. Хорошо известна, например, микросхема К174УП2. Она реализует кусочно-линейную аппроксимацию логарифмической характеристики. Ее устройство и принцип действия поясняет рис.4.

Рисунок 4. Логарифмический усилитель и его характеристика.

Этот логарифмический усилитель собран по дифференциальной схеме. На рисунке показана половина схемы. Она состоит в свою очередь из двух идентичных секций, а каждая секция содержит два дифференциальных каскада (ступени) ДК с генератором стабильного тока I0. Сигнал на левый вход второго дифференциального каскада передается через делитель R2, R3. Токи левых транзисторов ДК суммируются транзистором VT1, а правых – транзистором VT2.

При увеличении входного сигнала положительной полярности ток левого транзистора ступени ДК1 растет, а правого – уменьшается. Приращения токов равны по абсолютной величине: , где S - крутизна транзистора.

В отсутствие сигнала . Когда приращения токов достигнут этой величины, наступает их ограничение, но токи транзисторов второй ступени будут продолжать изменяться, так как сигнал на ее вход поступает ослабленным делителем R2, R3.

Для расширения диапазона ЛАХ к одному из входов подключают внешний резистор R0. На рис.4 показан также один из способов включения микросхемы как дифференциального логарифмического усилителя и аппроксимация его ЛАХ.

Микросхема К174УП2 обеспечивает сжатие амплитуд в диапазоне около 50 дБ. Этого оказывается недостаточно для целей УЗ эхоскопии, и логарифмическому усилителю на микросхеме обычно предшествует многоступенчатый усилитель-ограничитель, который осуществляет дополнительное сжатие. Функциональная схема такого комбинированного усилителя приведена на рис 5.

Рисунок 5. Комбинированный логарифмический усилитель.

Вначале сигнал усиливается многокаскадным усилителем, у которого в каждом каскаде имеются двусторонние диодные ограничители, которые принимают участие в формировании ЛАХ. Первый каскад представляет собой резистивный делитель (R1, R2) и поэтому он не усиливает, а ослабляет сигнал. Следующий каскад является повторителем, а остальные каскады осуществляют усиление. Разница в уровнях выходных сигналов соседних каскадов составляет 20 – 30 дБ.

Сигналы каждого выхода многокаскадного усилителя поступают на входы отдельных секций интегрального ЛУ и сжимаются ими примерно в 5 раз. Входной сигнал, при котором наступает ограничение тока в первой ступени секции, равен примерно100 мВ. Следовательно, во второй ступени ограничение наступит при напряжении около 0,6 В, т.е. как раз при пороговом напряжении диодного ограничителя. Вначале такое ограничение наступит в последнем каскаде усилителя, затем во втором и, наконец, при самом большом входном сигнале (который наиболее вероятно придет из приповерхностной области) – в первом. Таким образом, многокаскадный усилитель дает дополнительное сжатие сигнала на 50 – 60 дБ.

Блоки ВАРУ различных поколений УЗ сканеров отличаются количеством ступеней регулирования и способом воздействия на параметры схемы. Один из ранних методов ВАРУ основан на ручной регулировке усиления в пределах нескольких временных зон. По окончании регулировки коэффициент усиления в каждой зоне оказывается фиксированным. Такой способ не учитывает пространственного затухания эхо-сигналов. В более поздней разработке фирмы Aloka ВАРУ осуществлялась на основе детектора с управляемой характеристикой. Пример реализации такого метода показан на рис.6.

Рисунок 6. ВАРУ с управляемым детектором

Выходной ток Ic от согласующего дифференциального каскада поступает на двухтактный детектор, состоящий из диодов и транзисторов VT1 и VT2. На управляющий вход подается напряжение с периодом строки Тстр. В среднем оно изменяется по линейному закону (тонкая линия), но его крутизна может и регулироваться на отдельных участках – ближней и дальней зонах. Под действием этого напряжения увеличивается постоянная составляющая тока в цепи диодов и эмиттерных переходов транзисторов VT1 и VT2. Это приводит к уменьшению их дифференциального сопротивления rд. Найдем из эквивалентной схемы входной ток детектора Iд:

 .

Отсюда видно, что с ростом Uупр входной ток детектора, а значит и его выходной сигнал, растут.

Для выделения объектов в ближней зоне Uупр изменяют по закону ломаной 1, для выделения в дальней зоне – по закону ломаной 2, а смещая его вверх или вниз, регулируют общее усиление. Выходной ток детектора усиливается двухтактным усилителем тока с очень малым дрейфом. Недостатками рассмотренной ВАРУ является малое количество ступеней регулирования и неадекватность регулировочной характеристики среднестатистическому закону затухания ультразвука.

Более совершенной является система ВАРУ, представленная на рис.7. Здесь используется регулируемый усилитель и специальный (полиномиальный) генератор управляющего напряжения. Усилитель ВАРУ представляет собой аналоговый перемножитель сигналов. Его коэффициент усиления определяется формулой

Рисунок 7. ВАРУ с полиномиальным управляющим генератором.

Ku = SR1, где S – крутизна транзисторов VT1 и VT2.

При воздействии управляющего напряжения на базу транзистора VT3 его коллекторный ток растет, а значит растут и эмиттерные токи транзисторов VT1 и VT2, что приводит к увеличению их крутизны и коэффициента усиления.

Управляющее напряжение формируется с помощью интеграторов на операционных усилителях DA1 и DA2. Интегрируемое напряжение поступает от потенциометров и может иметь различную полярность. Каждым из потенциометров осуществляется регулировка усиления в определенной зоне (глубине). Для этого они подключаются к интегратору коммутирующими ключами.

На интервале данной зоны регулирования интегратор DA1 интегрирует некоторое постоянное напряжение U0 и его выходное напряжение будет равно

 , где τ = RC

Выходное напряжение второго интегратора будет равно

.

Таким образом, управляющее напряжение изменяется по закону параболы (отсюда и название генератора – полиномиальный). Параболический закон изменения уже достаточно близок к экспоненциальному. Регулируя потенциометрами напряжение U0, можно изменять крутизну управляющего напряжения на отдельных участках, как это показано на рис.3. Процесс интегрирования инициируется строчным импульсом СИ, который замыкает ключи, разряжающие конденсаторы интеграторов.