**Узлы формирования и обработки первичных сигналов**

**Введение**

Современные УЗ сканеры являются сложными многофункциональными устройствами. Они позволяют выполнять исследования в реальном масштабе времени в режиме М и режиме В, а также в смешанном режиме – М/В, запоминать информацию (режим стоп-кадра, или Freeze), производить различные преобразования изображения – поворот, инверсию (позитив-негатив), изменение масштаба (Zoom), некоторые вычисления геометрических характеристик объектов – периметр, площадь, коэффициент формы (отношение площади к периметру) и др. Наиболее сложные сканеры имеют в своем арсенале доплеровский режим, позволяющий исследовать и отображать параметры гемодинамики.

Сложность УЗ сканеров в основном зависит от набора датчиков. Наиболее простые сканеры имеют набор из трех – четырех механических секторных датчиков, которые до сих пор остаются популярными у пользователей. Более сложные (и дорогие) сканеры комплектуются несколькими секторными и несколькими линейными или конвексными датчиками. Датчики отличаются формой, размерами и частотами. От рабочей частоты датчика зависит его глубина локации, так как от частоты зависит затухание звуковых колебаний. Эта зависимость приведена ниже.

Частота, МГц Глубина локации, мм

3,5 200

5,0 100

7,5 50

Датчики с частотой 3,5 МГц используются для обследования абдоминальной области и сердца, 5 МГц – сердца; 7,5 МГц – щитовидной железы. Датчики с частотой 10 МГц используют для офтальмологических исследований. Следует отметить, что В- и М-эхограммы в УЗ сканерах получают с помощью одних и тех же двухмерных датчиков. Для этого, как было сказано выше, в режиме М фиксируют положение пьезопреобразователя секторного датчика или апертуры линейного (конвексного). В смешанном режиме для формирования М-эхограммы регистрируют эхо-сигналы, приходящие с выбранного направления.

На рис.1 приведена структурная схема универсального УЗ сканера. В ходе исследования могут использоваться датчики разных видов (например, секторный и линейный). К аппарату подключаются сразу несколько датчиков и выбираются по мере необходимости сенсорами на пульте. Блок управления секторным датчиком осуществляет привод электродвигателя, возбуждение пьезопреобразователя, прием и предварительное усиление эхо-сигналов, прием сигналов от датчика углового положения и их передачу в блок цифрового конвертора изображения. Блок управления линейным датчиком организует сканирование, фокусировку УЗ луча, предварительное усиление и динамическую фокусировку эхо-сигналов.

Предварительно усиленные сигналы от датчиков поступают на вход общего (основного) усилителя, в котором осуществляется временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ) и ручная регулировка с пульта управления.

Усиленные аналоговые эхо-сигналы направляются в цифровой конвертор изображения, в котором производится их цифровое преобразование, запись в буферную память и множество других весьма сложных преобразований. Из конвертора изображения цифровая информация переписывается в экранное ОЗУ.

В блоке управления выводом она с помощью ЦАП снова преобразуется в аналоговый сигнал, который подается на модулятор ЭЛТ, формируя изображение.

Микропроцессорная система (микроЭВМ) управляет практически всеми блоками, синхронизируя их работу.



Из-за их большого количества часть функций она делегирует местным МПС – микроконтроллерам, работа которых инициируется при запуске программы главной МПС, и в дальнейшем они работают автономно. Приведенная структурная схема достаточно условна и может быть изменена, например, экранное ОЗУ может быть включено в конвертор изображения и т.п.

1. **Блок управления механическим секторным датчиком**

Несмотря на относительную простоту механического датчика его блок управления достаточно сложен. Это объясняется прежде всего тем, что датчик является инерционной системой и управляющее воздействие на двигатель не может однозначно определять угловое положение пьезопреобразователя. Движение вращающихся частей датчика описывается дифференциальным уравнением второго порядка

, (1)



где ϕ - угол поворота, J – суммарный момент инерции, - коэффициент трения, с - коэффициент упругости, М – момент на валу двигателя (М = к1iвх). Идеальной была бы регулировочная характеристика ϕ = к2М. Чтобы к ней приблизиться, применяют различные корректирующие цепочки и отрицательную обратную связь по углу.



Структурная схема блока управления приведена на рис.2. Параметры режима управления загружаются в микроконтроллер при запуске программы. Он выдает коды управляющего и опорного сигналов на цифро-аналоговые преобразователи ЦАП1 и ЦАП2, которые вырабатывают несколько отличающиеся по форме сигналы. Сигнал ЦАП1 аппроксимирован функцией arctg (t), которая является наиболее оптимальной для динамики подвижной системы. Датчик углового положения ДУП, представляющий собой трансформаторный преобразователь, запитывается от источника переменного тока повышенной частоты и выдает сигнал, пропорциональный углу поворота. Электродвигатель ЭД секторного датчика запитывается током, который является результатом суммирования управляющего сигнала ЦАП1 и сигнала обратной связи, поступающего от детектора. Далее суммарный сигнал в блоке коррекции разветвляется по звеньям – пропорциональному, дифференцирующему и интегрирующему – и затем снова суммируется. Благодаря введению корректирующих звеньев и обратной связи по углу поворота удается свести до минимума влияние первого и второго членов уравнения (1), т.е. максимально приблизить реакцию к управляющему воздействию.



Для посылки зондирующих УЗ импульсов и записи информации по нужному адресу необходимо вырабатывать специальные импульсы с учетом фактического положения ПЭП. Такие импульсы формируются с помощью выходного напряжения датчика углового положения и ЦАП2. На его выходе создается напряжение, близкое по форме к напряжению датчика углового положения (рис 3). Оба напряжения подаются на входы компаратора. В моменты равенства напряжений происходит переключение компаратора, который вырабатывает импульсы запуска. Они запускают генератор зондирующих импульсов и поступают в блок конвертора, где формируют номер луча для адресации памяти. Таким образом, адресация ОЗУ при использовании механического датчика осуществляется непосредственно под его управлением.

Контроллер, кроме того, определяет тип подключенного датчика. Для этого в разъеме датчика устанавливают специальную кодирующую перемычку.

**Рис. 3**



**2. Генераторы УЗ импульсов**

Действие этих генераторов обычно основано на заряде – разряде пьезоэлемента. Между обкладками заряженного пьезоэлемента действует сила, которая сжимает кристалл. При его разряде сжимающее усилие исчезает и кристалл совершает свободные затухающие колебания. Схемы генераторов зависят от типа и размеров датчика. Например, пьезопреобразователь секторного датчика общего назначения имеет большие размеры и должен излучать сравнительно большую мощность. Поэтому возбуждающий импульс имеет большую амплитуду – до 200 В.

Одна из простых схем генератора УЗ импульсов приведена на рис.4. До подачи управляющего импульса оба транзистора закрыты, и на коллекторе VT2 присутствует высокий потенциал (около 50 В).

**Рисунок 4. Генератор УЗ импульсов с пассивным разрядом**



Конденсатор С1 и пьезоэлемент заряжены. Так как емкость С1 берется намного большей собственной емкости С0 пьезоэлемента, то к нему будет приложено почти все напряжение питания.

С приходом управляющего импульса оба транзистора открываются, и емкости С1 и С0 разряжаются, а кристалл пьезопреобразователя совершает затухающие колебания. Такой генератор реализует пассивный способ формирования УЗ импульса. Его форма определяется параметрами ПЭП и демпфера. Диод VD1 в схеме исключает насыщение транзисторов, т.е. обеспечивает высокое быстродействие.

Применяют и активные способы формирования УЗ импульса. Один из них заключается в управлении разрядом предварительно заряженного пьезоэлемента. Показанный на рис.5 генератор применяется для возбуждения массивных преобразователей механических датчиков. Здесь конденсатор заряжается от источника питания через диод VD1. При этом диод VD2 остается закрытым. Поступающий импульс запуска вызывает сигнал специальной формы, управляющий выходным полевым транзистором.

**Рисунок 5. Генератор УЗ импульса с управляемой формой**



Через него и через диод VD2 разряжаются конденсатор и пьезоэлемент. Для запуска пьезоэлементов линейных датчиков рассмотренными генераторами их потребовалось бы столько, сколько элементов содержится в апертуре, т.е. от 16 до 32. Понятно, что возникающие при этом аппаратные затраты получаются большими, и эту задачу решают иным путем.

**3. Блок управления линейным датчиком**

Содержание этого блока уже известно из описания структурной схемы и принципа сканирования линейным датчиком. Поэтому не будем здесь приводить его структурную схему. Тем более что, как сейчас увидим, узлы этого блока трудно разделить на отдельные части из-за совмещения некоторыми элементами нескольких функций.

Наиболее важным узлом блока линейного датчика является многоканальный приемо-передатчик. Число его каналов равно числу элементов в апертуре. На рис.6 приведена упрощенная принципиальная схема одного канала, в которой как раз и имеет место совмещение нескольких функций отдельными элементами.

Транзисторы VTк (коммутирующие) не только коммутируют элементы решетки, но и принимают участие в формировании УЗ импульса. Их количество равно общему числу элементов решетки и если оно достигает 128 – 256, то их следует выделить в отдельный блок. Часть схемы с транзисторами VT1 – VT4 осуществляет предварительное усиление эхо-сигналов, участвует в запуске пьезоэлемента и в фокусировке луча.



**Рисунок 6. Схема канала приемо-передатчика**

Фазоимпульсное управление запуском пьезоэлементов осуществляется импульсами от сдвигающего регистра СР и блока фокусировки луча БФ. Сдвигающий регистр тактируется строчными импульсами СИ. Каждый такой импульс обозначает начало строки УЗ изображения. Взаимное расположение строчных импульсов, СР и БФ показано на рис.227.

СИ

# Тстр

СР

БФ

**Рисунок 7.Управляющие импульсы**

Пока ни один из импульсов СР и БФ не поступил, все транзисторы в схеме закрыты. Пьеоэлемент заряжен от источника – 50 В через резистор с большим сопротивлением (около 20 кОм). Импульс СР подготавливает транзистор VTк к открытию. Полностью он откроется, когда придет импульс БФ. При этом откроются транзисторы VT1-VT3, и ток транзистора VT2 пройдет через VTк. Его ток быстро разрядит ПЭП, что вызовет колебания кристалла. Этот же ток создаст большой импульс на коллекторе VT3. Для его ограничения применяют двухсторонний диодный ограничитель (диоды и резистор R2). Тем не менее, этот импульс получается намного больше нормального эхо-сигнала, что вызывает перегрузку общего усилителя (в нем на этот случай также предусмотрены ограничители) и довольно длительный переходный процесс. Прием эхо-сигналов в это время невозможен, и, значит, УЗ информация из некоторой приповерхностной области будет потеряна. Эта область называется **мертвой зоной**. Ее протяженность составляет 20-30 мм.

Сдвиг фронта импульса БФ относительно СР вырабатывается блоком фокусировки луча для каждого канала в отдельности в соответствии с алгоритмом фокусировок. От начала импульса БФ и до конца строки транзисторVTк остается открытым и пропускает в обратном направлении эхо-сигналы. Они усиливаются транзисторами VT2 и VT3, которые для эхо-сигналов представляют каскодный усилитель. К каналу приемо-передатчика подключено несколько транзисторов VTк, которые коммутируют элементы пьезорешетки с периодом n. На рис.6 – это VTк1, VTкn+1, VTк2n+1 и т.д. Однако на каждой УЗ строке импульсом от сдвигающего регистра из них выбирается только один.

**4. Блоки фокусировок**

Задержки для фокусировки УЗ луча проще всего организовывать цифровыми способами, например, путем подсчета определенного числа импульсов известной частоты – чем больше импульсов, тем больше задержка. На практике этот принцип реализуется в виде обратного счета с помощью реверсивных счетчиков. В реверсивный счетчик заносится известное число, и по команде СИ (строчный импульс) начинается обратный счет. Когда число станет равным нулю, счетчик выдаст специальный сигнал, который используется для запуска соответствующего пьезоэлемента. Структурная схема одного канала задержки, организованного по такому принципу, показана на рис.8.



**Рисунок 8. Структурная схема блока фокусировки УЗ луча**

Перед запуском строки производится загрузка данных о задержках в регистры каналов. Для этого с помощью адреса через дешифратор поочередно формируются сигналы записи, по которым данные заносятся в регистры. Затем приходит строчный импульс, который сбрасывает D-триггер и по входу L одновременно переписывает информацию из регистров в реверсивные счетчики. Сразу после этого начинают поступать тактовые импульсы ТИ, и числа в счетчиках станут убывать. Когда число, первоначально записанное в счетчике, достигнет нуля, на выходе переноса PD возникает импульс, устанавливающий D-триггер в «1». Импульс, снимаемый с его выхода, как раз и является тем импульсом БФ в схеме рис.6, который запускает пьезоэлемент. Уровень 1 с выхода Q блокирует логическую схему ИЛИ-НЕ и вместе с ней счетчик. Так как задержки лежат в диапазоне 10 – 2000 нс, то их можно представлять восьмиразрядными числами. Чтобы получить минимальную задержку в 10 нс, необходима частота тактовых импульсов 100 МГц.



Динамическая фокусировка эхо-сигналов осуществляется путем задержки электрических сигналов аналоговыми линиями задержки. Впервые линии задержки типа LC для фокусировки применила японская фирма Aloka. Такая линия задержки представляет собой цепочку из LC-звеньев и является аналогом длинной линии (рис.9).

**Рисунок 9. Линия задержки типа LC**



Линия задержки состоит из катушки индуктивности, которая наматывается на тонкий ферритовый сердечник. Через равные интервалы от нее делаются отводы, к которым припаивают конденсаторы. Вся эта конструкция заливается компаундом и своими выводами впаивается в печатную плату. Таким образом, линия задержки состоит из звеньев L1C1. Следует иметь в виду, что LC-цепочка является цепью с сосредоточенными параметрами, по сути, многозвенным ФНЧ. Распространение в ней импульса происходит не так, как в линии с распределенными параметрами. Если на вход линии задержки типа LC подать прямоугольный импульс, то на выходе немедленно появится напряжение, и его фронт будет плавно нарастать. Поэтому задержку в такой линии обычно понимают как сдвиг середины фронта импульса на выходе по отношению к фронту на входе. Главными параметрами искусственной линии задержки являются характеристическое (волновое сопротивление) и время задержки:

; ,



где n - число звеньев. Характеристическое сопротивление и постоянная передачи LC –цепочки очень сильно зависят от частоты. Это приводит к искажениям передаваемых импульсов.

На рис 9 показан также способ получения разных задержек от одной линии. Для этого отводы от звеньев подключены к многоканальному коммутатору –мультиплексору. Линия при этом нагружается на ее характеристическое сопротивление Zc. Для регулирования задержки с достаточной точностью в широком диапазоне применяют две линии – точной и грубой задержки. В первой линии задержки коммутируются с шагом 10 –20 нс, а во второй – 100 – 200 нс. Однако таким способом трудно обеспечить установку задержки с высокой точностью (точнее 10 нс). Для этого линии точной задержки организуют по двоичному принципу (рис.10).

**Рисунок 10 Структурная схема блока динамической фокусировки**



Блок динамической фокусировки также состоит из n каналов. Каждый канал содержит регистр, секцию точных задержек и секцию грубых задержек. Напомним, что динамическая фокусировка предусматривает большое количество фокусов для эхо-сигналов – 8 –16. Информация о задержках для каждого следующего фокуса во всех каналах должна быть подготовлена, пока луч движется к нему от предыдущего. Для этого используется общий дешифратор и двухступенчатые регистры. На системной шине поочередно выставляются данные о задержках и адреса. Дешифратор расшифровывает адрес и вырабатывает импульс загрузки L, по которому данные загружаются в первую ступень соответствующего регистра. Так будет подготовлена информация по всем каналам. В расчетное время на входы С всех регистров действует специальный фокусный импульс ФИ, который переносит данные во вторую ступень, т.е. на выход. Пять младших разрядов данных используются побитно для управления коммутирующими ключами секции точной задержки, а три старших – для адресного управления мультиплексором, подключающим канал к секции грубой задержки. Коммутирующие ключи S1 – S5 вводят или исключают LC-звенья точной задержки. Очевидно, что время точной задержки можно регулировать в диапазоне t1 – 31t1.

Сигналы отдельных каналов суммируются в общей линии грубых задержек. С помощью коммутаторов-мультиплексоров они могут подключаться к любой ее точке. Чем дальше точка подключения отстоит от выхода линии, тем больше будет задержка. Задержки звеньев общей линии Т1 – Т7 можно взять одинаковыми. Если минимальную задержку t1 точной секции выбрать равной 7 нс, то задержки Т1 – Т7 можно взять равными 200 нс. Не следует однако думать, что звенья с большими задержками можно выполнить из одной большой индуктивности и одной большой емкости. Они также дробятся на маленькие звенья, чтобы как можно точнее копировать свойства длинных линий. Иными словами, общее количество LC- звеньев получается очень большим. Их изготовление требует кропотливой ручной работы и практически не поддается автоматизации.

Ведутся разработки искусственных линий задержки в виде полосковых линий с распределенными параметрами. Конструкция одной из таких линий представлена на рис.11.



**Рисунок 11. Полосковая линия задержки**

Она выполняется фотогальваническим способом из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита и состоит из двух зигзагообразных дорожек (меандров), сдвинутых на половину пространственного периода. Распределенные емкость и индуктивность такой линии определяются толщиной стеклотекстолита, шириной дорожек и размерами окна. Индуктивность и емкость одного звена рассчитываются по формулам

; ,



где

, Гн/м ; , Ф/м.



Для стеклотекстолита = 4,92.



Волновое сопротивление и время задержки линии определяются по формулам

; tз = n.



Для получения длительности задержки в 12,5 нс требуется около 60 звеньев с параметрами a = 0,5 мм; b = 1 мм; m = 5 мм; d = 0,02 мм. Длина линии при этом получается около 70 мм а волновое сопротивление – 100 Ом. Для сравнения заметим, что такую же задержку можно получить с помощью отрезка коаксиального кабеля длиной 2 –3 м. Чтобы получить большие задержки, из таких печатных линий составляют многослойную сборку. Технология изготовления полосковых линий намного проще, чем линий типа LC. Большинство операций здесь можно автоматизировать и только на заключительной стадии требуется ручная сборка.

Полосковая линия задержки является симметричной линией и поэтому ее выводы нельзя заземлять, а для соединения с другими устройствами приходится применять согласующие каскады – обычно дифференциальные усилители на транзисторах (рис.12).

**Рисунок 12. Включение полосковой линии задержки**



Входной дифференциальный каскад преобразует несимметричный сигнал в симметричный, а выходной – наоборот. Заодно дифференциальные усилители компенсируют затухание сигнала в линии.

Дополнительная возможность уменьшения общего количества линий задержки заключена в симметрии задержек относительно оси приемно-излучающей группы (апертуры) пьезорешетки. Ее можно реализовать с помощью специального коммутатора, который электрически объединяет эхо-сигналы от симметрично расположенных элементов. При этом общее количество линий задержки уменьшается более, чем вдвое, так как в одном канале – «крайнем», их вообще не будет. Коммутатор включается после приемо-передатчика и объединяет попарно его каналы с учетом изменения порядковых номеров элементов апертуры при сканировании.