

ФИКСИРОВАННЫЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

Линии задержки активно применяются в радиолокации и радионавигации, технике связи и в измерительной технике. Диапазон предъявляемых к ним требований очень широк, соответственно широк и спектр применяемых для их изготовления технологий. Статья знакомит читателя с технологиями и рынком фиксированных линий задержки.

ВВЕДЕНИЕ

Линия задержки (ЛЗ) — устройство, предназначенное для задержки электрических или электромагнитных сигналов на заданный промежуток времени. ЛЗ электрических сигналов на интервалы времени от единиц пикосекунд до десятков микросекунд при сохранении формы колебания необходимы для согласования скорости распространения колебаний в устройствах сложения мощностей, в фазированных антенных решетках, при параллельной многоканальной обработке сигналов и в других приложениях. При работе с импульсными сигналами цифровых систем управления коррекция положения и выравнивание общей задержки фронтов необходимы для синхронизации процессов, для отладки многоканальных цифровых структур, для программируемого управления положением диаграммы направленности и других приложений.

ЛЗ широко применяются в радиолокации и радионавигации, технике связи и в измерительной технике. ЛЗ электрических сигналов на интервалы времени от единиц пикосекунд до десятков микросекунд при сохранении формы колебания необходимы для согласования скорости распространения колебаний в устройствах сложения мощностей, в фазированных антенных решетках, при параллельной многоканальной обработке сигналов и в других приложениях. При работе с импульсными сигналами цифровых систем управления коррекция положения и выравнивание общей задержки фронтов необходимы для синхронизации процессов, для отладки многоканальных цифровых структур, для программируемого управления положением диаграммы направленности и других приложений.

Задержка синусоидального сигнала с циклической частотой ω на время t эквивалентна изменению его фазового сдвига на величину $\varphi = \omega t$. Часто вводится такой параметр, как групповое время задержки (ГВЗ), определяемое как производная фазы сигнала по частоте, взятая с обратным знаком: $ГВЗ = -d\varphi(\omega)/d\omega$.

В идеальной ЛЗ ГВЗ не зависит от частоты. Это означает, что все спектральные составляющие входного сигнала задерживаются на одинаковое время, поэтому форма задержанного импульсного сигнала не искажается. В реальных ЛЗ обеспечить постоянное ГВЗ удается лишь в ограниченном диапазоне частот. ЛЗ, обеспечивающие равное время задержки для всех спектральных составляющих сигнала (инвариантность ГВЗ от частоты), в зарубежной литературе носят название True Time Delay (TTD) — «настоящие линии задержки». К разряду TTD могут относиться ЛЗ совершенно разных конструкций и прин-

ципов работы, важно лишь, чтобы они не имели частотной зависимости ГВЗ и сохраняли форму задержанного сигнала.

Иногда частотная зависимость ГВЗ — частотная дисперсия — создается намеренно. Для согласованной фильтрации сложных сигналов создаются т. н. дисперсионные ЛЗ (ДЛЗ), ГВЗ которых зависит от частоты по определенному закону. Например, для согласованной фильтрации радиолокационных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) используются ДЛЗ с линейной частотной зависимостью ГВЗ. Дисперсионные ЛЗ, у которых ГВЗ зависит от частоты и форма сигнала на выходе меняется, не являются TTD и используются не как ЛЗ, а как фильтры.

Идеальная ЛЗ считается пассивным и линейным узлом по отношению к входному сигналу. Однако явления пассивной интермодуляции (Passive Intermodulation, PIM), мультипакторного эффекта (вторичной эмиссии), отражения от границ кристалла в акустоэлектронных линиях и др. ограничивают максимально допустимый уровень входной мощности и уровень многократных (тройных) отражений от входного и выходного преобразователей или портов.

Измерение параметров ЛЗ обычно выполняется при помощи монохроматического тестового входного сигнала. Основными техническими характеристиками ЛЗ выступают статическая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента передачи и линейность статической фазочастотной характеристики (ФЧХ) в пределах рабочей полосы частот.

В простейшем случае ЛЗ обеспечивает фиксированное значение времени задержки сигнала, но во многих приложениях это значение необходимо варьировать. Для этого используются управляемые ЛЗ, причем управление может быть ручным (механическим), электромеханическим или электронным, а изменение времени задержки в каждом случае может быть непрерывным или дискретным. Для управляемых ЛЗ важен такой параметр, как инерционность цепи управления.

Задержка неперiodических импульсных (двухуровневых) входных сигналов сводится к запаздыванию на указанное время фронта и спада входного сигнала со стандартизованными логическими уровнями напряжения. В некоторых моделях импульсных ЛЗ с фиксированными уровнями напряжения выполняется буферизация выходного сигнала, при которой устраняются шумы и погрешности, имеющиеся во входном сигнале. Если импульсный сигнал периодически повторяется, например, является тактовым, то условно говорят о фазовом сдвиге его фронта в ЛЗ, принимая его период повторения за 360° .

В качестве типовых параметров ЛЗ без дисперсии выступают:

- ГВЗ и погрешность его установки;
 - затухание сигнала между входом и выходом;
 - интервал рабочих частот;
 - входное и выходное активные сопротивления, по умолчанию равные 50 Ом;
 - значения коэффициента стоячей волны напряжения КСВН (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) или коэффициенты отражения от входного и выходного портов (Return Loss, RL);
 - чувствительность к вариациям температуры и интервал рабочих температур;
 - искажения формы выходного сигнала в виде тройного прохождения из-за отражений от выходного и входного портов;
 - допустимый уровень мощности входного сигнала;
 - массогабаритные и присоединительные показатели.
- По реализации способа задержки ЛЗ могут быть:
- с распределенными параметрами;
 - с сосредоточенными параметрами;
 - цифровые;
 - с преобразованием электрических сигналов в ультразвуковые или оптические и обратно.

ЛЗ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Электрические цепи, в которых индуктивность, емкость и активное сопротивление сосредоточены соответственно в катушке, конденсаторе и резисторе, называются цепями с сосредоточенными параметрами. Но есть электрические цепи, в которых эти параметры распределены по длине цепи, например в линиях передачи электромагнитных колебаний. Такие цепи называются цепями с распределенными параметрами или длинными линиями. В линиях с распределенными параметрами в любой момент времени ток и напряжение меняются при переходе от одной точки линии к другой. В результате напряжения и токи на различных участках цепи отличаются друг от друга, т. е. являются функциями двух независимых переменных: времени и пространственной координаты. У цепей этого класса каждый бесконечно малый элемент их длины характеризуется сопротивлением, емкостью и индуктивностью.

Наиболее простой способ задержки электрического сигнала заключается в использовании длинных линий передачи. Скорость распространения сигнала в них конечна и довольно стабильна, а время задержки пропорционально длине линии. Во избежание переотражения сигнала от ее концов длинная линия должна иметь резистивную нагрузку, равную ее волновому сопротивлению. В качестве линии обычно используются радиочастотные кабели, а также полосковые и микрополосковые линии.

ЛЗ НА КООКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

Наиболее часто используемым вариантом линии с распределенными параметрами является коаксиальный кабель. ЛЗ на коаксиальных кабелях отличаются наибольшей широкополосностью (от постоянного тока до десятков гигагерц) и высокой допустимой входной мощностью. Такие линии могут значительно отличаться по основным техническим параметрам (задержке, затуханию, виду коаксиального соединителя и кабеля, рабочему интервалу температур, конструктивному оформлению, массогабаритным показателям), поэтому часто они изготавливаются по спецификации заказчика и не являются серийными изделиями.

Многие производители коаксиальных кабелей радиочастотного диапазона предлагают заказные кабельные сборки с согласованными соединителями в качестве широкополосных ЛЗ. Например, компании Waka Manufacturing, Micro-Coax, API Technologies, Spectrum Elektrotechnik и др. предлагают ЛЗ на ка-

белях с пониженным погонным затуханием и с типами соединителей по согласованию с заказчиком.

Кабельные ЛЗ от API Technologies (рис. 1) работают в диапазоне частот до 6 ГГц, обеспечивают задержку от 1 до 250 нс при ослаблении от 0,2 до 50 дБ. Они характеризуются температурной стабильностью 0,15 ppm/°C в интервале рабочих температур $-20...+100$ °C, в термостатированных конструкциях она достигает 0,001 ppm/°C. Паразитные отклики и уровень помех тройного прохождения не более -70 дБ. В ЛЗ используются соединители типа SMA, N, TNC, а также выводы для поверхностного монтажа. Допустимая мощность входного сигнала составляет 25 дБм.



▲ Рис. 1. Коаксиальная ЛЗ производства компании API Technologies

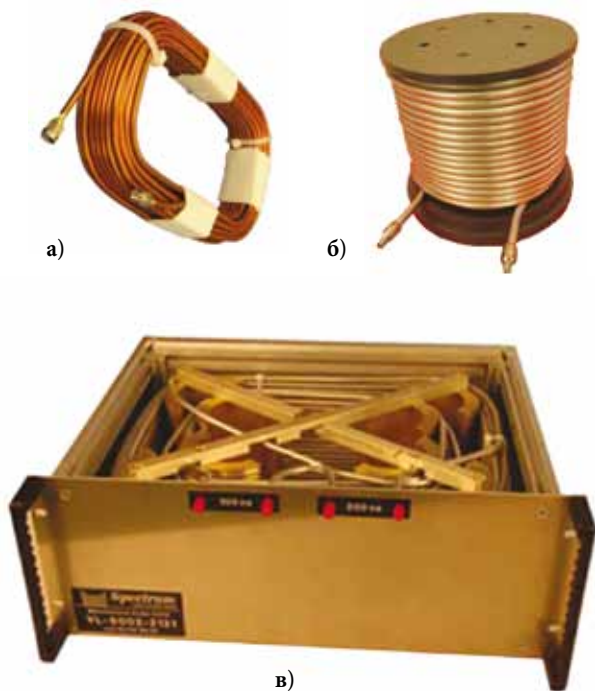
Японский производитель коаксиальных кабелей Waka Manufacturing предлагает заказные ЛЗ на основе полужесткого кабеля и соединителей типов K, V, SMA и SSMA (рис. 2). Погрешность времени задержки составляет не более 5 пс для кабелей длиной до 20 см и не более 500 пс для кабелей длиной до 10 м. При использовании кабеля типа SX-12 граничная частота может достигать 110 ГГц.



▲ Рис. 2. ЛЗ фирмы Waka Manufacturing на основе полужестких кабелей

Компания Spectrum Elektrotechnik предлагает несколько десятков стандартизованных конструкций кабельных ЛЗ. В них используется полужесткий кабель диаметром от 0,047" (0,12 мм) до 0,25" (6,4 мм) на основе фторопласта (PTFE) или диэлектрика с низкой плотностью (варианта вспененного фторопласта). Преимущества последнего заключаются в более широком диапазоне температур, меньшей температурной зависимости времени задержки и в меньшем уровне потерь. К примеру, отрезок кабеля типа 421–281 диаметром 0,25" с диэлектриком низкой плотности с задержкой 10 нс на частоте 10 ГГц имеет затухание 1,12 дБ, а кабель типа 421–250 того же диаметра со стандартным фторопластовым диэлектриком в тех же условиях имеет затухание 1,8 дБ. Конструктивно ЛЗ с малой задержкой могут выполняться в виде бескаркасных или каркасных катушек, а с большим временем задержки — в виде стандартных 19-дюймовых блоков (рис. 3).

Компания Micro-Coax в зависимости от требований заказчика делает ЛЗ как из полужесткого, так и из гибкого кабеля (рис. 4). Серийно производятся кабельные ЛЗ на время до 200 нс для полосы частот 0,9–2 ГГц со сверхмалыми сум-



▲ **Рис. 3.** Конструктивные варианты изготовления ЛЗ фирмы Spectrum Elektrotechnik на основе полужесткого кабеля: а) бескаркасная катушка, б) каркасная катушка, в) стандартный 19-дюймовый блок



▲ **Рис. 4.** Коаксиальные ЛЗ компании Micro-Coax



▲ **Рис. 5.** Коаксиальные ЛЗ производства компании Florida RF Labs

марными потерями от 1,2 до 5,9 дБ. При изготовлении ЛЗ используются гибкие кабели серии LL с малыми потерями, серии ULL со сверхмалыми потерями и полужесткий кабель серии UTiFlex.

Компания Midisco предлагает семь моделей стандартных кабельных ЛЗ на время от 5 до 100 нс с погрешностью $\pm 0,5$ нс с кабелями диаметром 2,2–6,4 мм, снабженными соединителями типа SMA. Например, в модели MDC141DL100 использован кабель диаметром 3,6 мм, реализована задержка $(100 \pm 0,5)$ нс, размеры свернутой бухты с соединителями типа SMA составляют 76×89 мм.

Изготовление ЛЗ на заказ предлагает компания Florida RF Labs (рис. 5). С заказчиком согласовываются все основные параметры ЛЗ: тип кабеля (гибкий или полужесткий), номинал и допуск значения задержки, диапазон частот, геометрические особенности ЛЗ, тип соединителей, значение КСВН, температурный диапазон и условия эксплуатации.

Компания EZ Form выпускает 15 моделей ЛЗ на полужестких кабелях диаметром от 0,086 до 0,25 дюйма с временем задержки от 5 до 100 нс. Погрешность значения времени задержки составляет не более 1 нс. ЛЗ изготавливаются в виде бескаркасных катушек (рис. 6). С заказчиком могут быть согласованы такие параметры ЛЗ, как время задержки, волновое сопротивление линии, а также тип кабеля и соединителей.



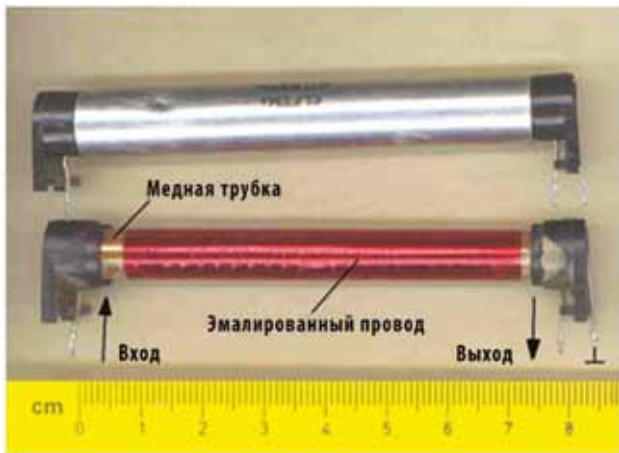
▲ **Рис. 6.** ЛЗ производства компании EZ Form

СПИРАЛЬНЫЕ ЛЗ

В числе недостатков ЛЗ на коаксиальных кабелях можно указать малую задержку при довольно больших габаритах. Для увеличения времени задержки иногда применяются кабели, внутренняя жила которых выполнена в виде спирали. Такая конструкция жилы увеличивает погонную индуктивность кабеля и соответственно уменьшает скорость распространения сигнала в нем. Характерной особенностью этих ЛЗ является низкая частотная дисперсия, позволяющая сохранить форму задержанного сигнала. ЛЗ на основе спирального кабеля применяются, в частности, в осциллографах для задержки исследуемого сигнала с целью компенсации задержки срабатывания схемы синхронизации развертки.

Типичным представителем ЛЗ с распределенными параметрами являются также спиральные ЛЗ, представляющие собой рядную намотку провода на медном цилиндре. Такие ЛЗ применялись, в частности, в цветных телевизорах для задержки яркостного сигнала (рис. 7).

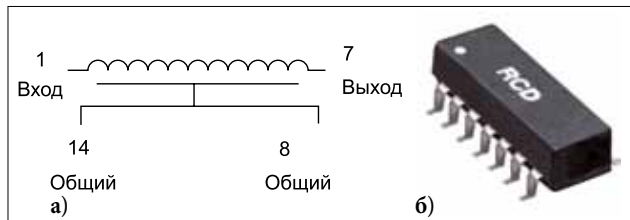
Компания RCD Components выпускает компактные высокочастотные спиральные ЛЗ серий SMP01, P01 и S01 с временем задержки от 0,1 до 1000 нс в корпусах DIP, SIP и для поверхностного монтажа (рис. 8). Волновое сопротивление ЛЗ этих серий может варьироваться: ЛЗ с временами задержки от 0,1 до 1 нс могут иметь волновое сопротивление 50 или 75 Ом, а ЛЗ с вре-



▲ Рис. 7. Спиральная ЛЗ для тракта яркостного сигнала цветного телевизора

менем задержки от 50 до 1000 нс могут иметь волновое сопротивление 50, 100, 200, 300 и 500 Ом. Граничная рабочая частота F (МГц) обратно пропорциональна времени задержки T (нс) и вычисляется по формуле $F=0,35/(1000T)$. Электрическая прочность этих ЛЗ составляет 100 В, сопротивление изоляции 1000 МОм, температурный коэффициент не более 100 ppm/°C.

На постсоветском пространстве компанией ОАО «Кечарк» выпускаются спиральные ЛЗ с распределенными параметрами типа ЛЗРП, предназначенные для работы в аппаратуре специального назначения (рис. 9). Волновое сопротивление этих ЛЗ может составлять 150, 300 или 600 Ом, время задержки 0,11; 0,275 или 0,55 мкс. Схематически ЛЗРП состоит из десяти независимых ЛЗ, которые можно соединять последовательно для достижения необходимой задержки. Конструктивно ЛЗРП выполнены в корпусе для поверхностного монтажа.



▲ Рис. 8. Электрическая схема (а) и внешний вид (б) спиральной ЛЗ серии P01 производства RCD Components



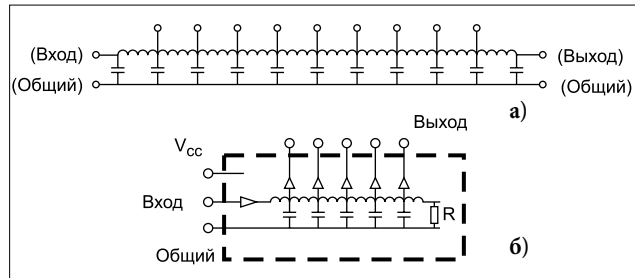
▲ Рис. 9. Спиральная ЛЗ типа ЛЗРП производства ОАО «Кечарк»

ЛЗ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

ЛЗ с сосредоточенными параметрами называют иногда «искусственными длинными линиями», так как их архитектура имитирует эквивалентную схему или частотные характеристики согласованных линий с распределенными параметрами. Обычно они выполняются в виде многозвенного, согласованного на концах LC-фильтра нижних частот. Пассивные ЛЗ с сосредоточенными параметрами имеют полосу рабочих частот от постоянного тока до некоего граничного значения, определяемого значениями катушек индуктивности и конденсаторов, широкий динамический

диапазон входной мощности и низкий уровень нелинейных искажений.

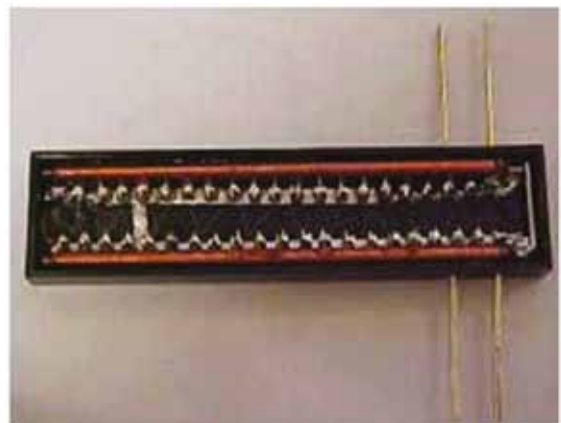
ЛЗ могут соединяться каскадно для увеличения суммарного времени задержки. Они могут иметь отводы, позволяющие подобрать время задержки или сформировать серию сигналов с разными задержками. ЛЗ этого класса подразделяются на пассивные, пассивные многоотводные и активные (рис. 10), содержащие буферные усилители. Буферные усилители предназначены для работы с цифровыми сигналами и выполняются по ТТЛ-, КМОП- или ЭСЛ-технологии.



▲ Рис. 10. ЛЗ с сосредоточенными параметрами: а) пассивная многоотводная; б) активная многоотводная

Компания RCD Components предлагает несколько серий пассивных (с отводами и без них), а также активных многоотводных ЛЗ с сосредоточенными параметрами. Многоотводные пассивные ЛЗ серий SP05 и SP10 могут иметь соответственно пять или десять отводов, их время задержки лежит в диапазоне от 20 до 750 нс. Волновое сопротивление пассивных ЛЗ может быть 50, 100, 200, 300 или 500 Ом. Волновое сопротивление активных ЛЗ серий A08 и A14 производителем не указывается, поскольку согласование выполняется на уровне встроенных буферных усилителей. ЛЗ выпускаются в миниатюрных корпусах как для монтажа в отверстия, так и для поверхностного монтажа.

Линии фиксированной задержки с сосредоточенными параметрами от API Technologies предназначены для использования в цепях тактовой синхронизации, формирования задержанных импульсов, задержки видеосигналов с полосой рабочих частот до 150 МГц. По умолчанию они согласуются с волновым сопротивлением 50 Ом, но по заказу могут быть выполнены с волновым сопротивлением от 10 до 500 Ом. ЛЗ этой фирмы могут иметь задержку в диапазоне от 10 до 5000 нс, длительность фронта не более 15% от номинального значения задержки, сопротивление по постоянному току не более 1 Ом, допустимое напряжение входного сигнала 25 В. Температурная зависимость задержки не более 70 ppm/°C, потери мощности в среднем 5%, интервал рабочих температур -55... +125 °C. ЛЗ выпускаются в многовыводных корпусах размером 36×7×5 мм (рис. 11).

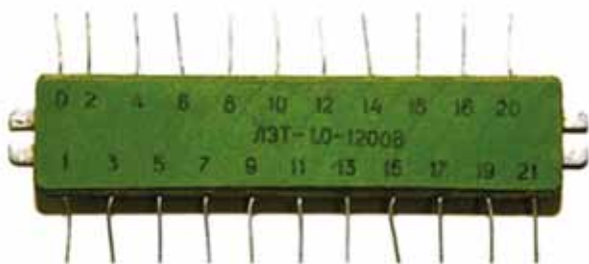


▲ Рис. 11. ЛЗ с сосредоточенными параметрами компании API Technologies

На постсоветском пространстве ОАО «Кечарк» выпускает несколько типов ЛЗ с сосредоточенными параметрами для ответственных применений. ЛЗ типа ЛЗЕ и ЛЗТ выпускаются с приемками «5» и «9».

ЛЗ типа ЛЗЕ могут содержать 5, 10 или 20 LC-звеньев, их волновое сопротивление может быть 300, 600, 1200 или 2400 Ом. ЛЗ с 5 звеньями выпускаются с временем задержки от 0,05 до 1 мкс, с 10 звеньями — с временем задержки от 0,1 до 2 мкс, с 20 звеньями — от 0,2 до 4 мкс.

ЛЗ типа ЛЗТ (рис. 12) являются теплостойкими. Эти ЛЗ выпускаются с волновым сопротивлением 300, 400, 600, 1200 и 2400 Ом. Пятизвенные ЛЗТ могут иметь задержку от 0,05 до 0,5 мкс, 10-звенные — от 0,1 до 1 мкс, 20-звенные — от 0,2 до 2 мкс. Диапазон рабочих температур составляет $-60...+150$ °C.



▲ Рис. 12. Многоотводная теплостойкая ЛЗ типа ЛЗТ производства ОАО «Кечарк»

Этим предприятием также выпускаются малогабаритные ЛЗ типа МЛЗ (рис. 13). Их волновое сопротивление 100 Ом, а время задержки 0,1; 0,15 или 0,25 мкс.



▲ Рис. 13. Многоотводная ЛЗ типа МЛЗ

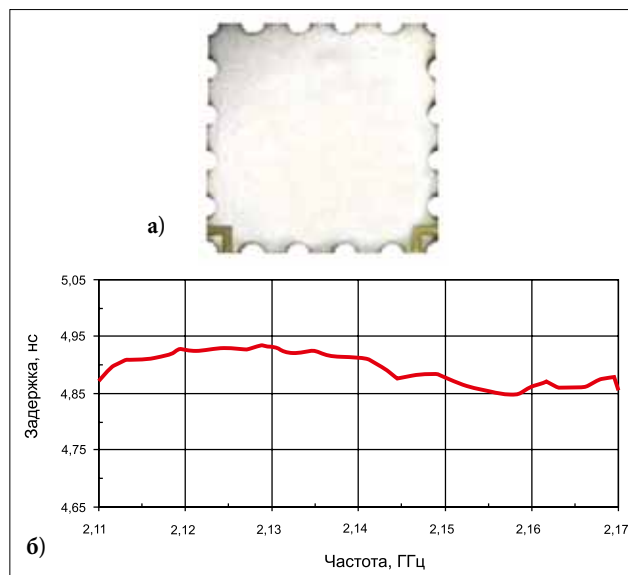
ЛЗ НА ОСНОВЕ ТОЛСТОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

По толсто пленочной технологии будущие элементы схемы наносятся через металлический сетчатый трафарет на керамическую подложку, после чего она обжигается в печи при температуре до 1200 °C. Материалы проводников, резисторов и диэлектриков готовятся в виде смесей металлических, стекло-эмалевых и диэлектрических порошков с органической связкой. Поскольку керамика до обжига допускает формирование монтажных отверстий, есть возможность формировать многослойные структуры с межслойными проводящими переходами. Технология обеспечивает высокую надежность изделий без применения дорогостоящего оборудования.

ЛЗ, выполненные на основе по толсто пленочной технологии, отличаются повышенной граничной рабочей частотой, интегральным исполнением, малыми размерами и возможностью поверхностного монтажа.

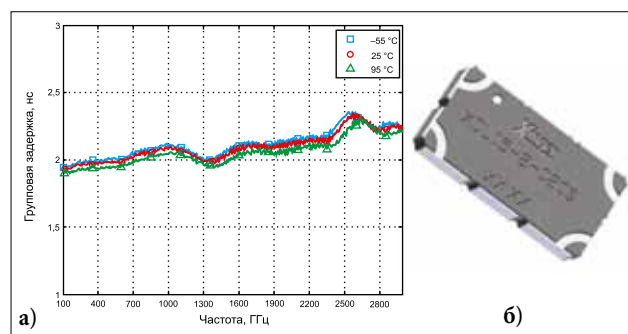
Линия с фиксированной задержкой DLL-048R-2.14G от Merrimac Industries (теперь в составе Crane Aerospace & Electronics) выполнена по многослойной технологии Multi-Mix Zapper. Она обеспечивает в полосе частот 2110–2170 МГц за-

держку 4,85 нс, отклонение фазового сдвига от линейного закона не более $\pm 1^\circ$ в рабочей полосе частот, допустимую входную мощность до 45 Вт, ослабление 3 дБ. ЛЗ выполнена в корпусе для поверхностного монтажа размером 25,4×25,4×1,14 мм (рис. 14). ЛЗ семейства Multi-Mix Zapper предназначены для устройств предсказывающей цифровой коррекции интермодуляционных искажений в усилителях мощности сигналов сотовой связи стандартов UMTS, GSM и PCS. Они отличаются высоким постоянством группового времени запаздывания в пределах рабочей полосы частот (порядка 0,1% от номинального значения).



▲ Рис. 14. Внешний вид (а) и частотная характеристика времени задержки (б) ЛЗ DLL-048R-2.14G компании Merrimac Industries

Компания Anagen серийно производит микроразомкнутые ЛЗ для частот от 0,135 до 2,7 ГГц с запаздыванием от 8 до 22 нс, предназначенные для применения в цепях линейризации усилителей мощности станций и терминалов мобильной связи. Допустимая мощность проходящего сигнала в них достигает 1 Вт, потери составляют от 0,32 до 1,5 дБ/нс, собственная резонансная частота около 2 ГГц. ЛЗ типа XDL15-2-020S (рис. 15), выполненная на основе многослойной керамики Xinger, обеспечивает групповую задержку сигнала на 2,2 нс в полосе частот 112–2700 МГц, интервал рабочих температур $-55...+85$ °C. Она может включаться каскадно благодаря внутреннему согласованию с импедансом 50 Ом по входу и выходу. Например, при включении четырех таких компонентов задержка увеличивается до 9 нс.



▲ Рис. 15. Частотная характеристика группового запаздывания сигнала (а) и внешний вид (б) ЛЗ модели XDL15-2-020S от Anagen

ЛЗ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Тонкопленочная технология основана на напылении в вакууме резистивных и проводниковых материалов толщиной 0,01–1 мкм методом термического испарения или магнетронно-



▲ **Рис. 16.** ЛЗ компании Thin Film Technology на основе тонкопленочной технологии: а) серия DS; б) серия GL; в) серия HE

го распыления. В качестве носителя используются поликор, силлал, полиимид и другие материалы. Эта технология позволяет создавать малогабаритные интегральные ЛЗ с рабочими частотами от постоянного тока до 2,5 ГГц на время от 10 пс до 15 нс.

Тонкопленочные линии фиксированной задержки от корпорации Thin Film Technology серий DS, DL, GL, HE и CL (рис. 16) предназначены для интервала рабочих частот 0...2,5 ГГц. Эти ЛЗ могут выпускаться также под торговой маркой SUSUMU.

ЛЗ серии DS выполнены на алюминиевой или циркониевой подложке и размещены в трехвыводном корпусе размером не более 12,0×9,2 мм. Волновое сопротивление ЛЗ составляет 50 Ом, время задержки может выбираться в диапазоне от 0,1 до 10 нс с шагом 0,1 нс. Сопротивление ЛЗ менее 1 Ом для постоянного тока не более 100 мА, температурный коэффициент задержки не более 150 ppm/°C, интервал рабочих температур -40...+85 °C.

Серия DL выпускается в шестивыводных корпусах размером не более 26,4×16,5 мм. Время задержки этих линий выбирается в диапазоне от 0,1 до 5,1 нс с шагом 0,1 нс, волновое сопротивление составляет 50 Ом.

ЛЗ серии GL размещены в корпусе для поверхностного монтажа размером 13,55×6,05 мм. Эта серия подразделяется на два семейства: GL1L с одной стандартной ЛЗ с волновым сопротивлением 50 Ом и GL2L с двумя связанными ЛЗ с волновым сопротивлением 100 Ом для работы с дифференциальным сигналом. Время задержки для семейства GL1L лежит в диапазоне от 0,1 до 5 нс, а GL2L от 0,1 до 4,5 нс.

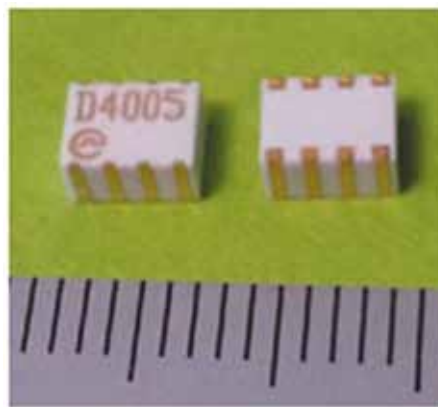
ЛЗ серии HE выпускаются в корпусах BGA размером не более 10,2×6,4 мм. Эта серия также подразделяется на семейства HE1L стандартных ЛЗ с волновым сопротивлением 50 Ом и задержкой в диапазоне от 0,1 до 3,5 нс и HE2L дифференциальных ЛЗ с волновым сопротивлением 100 Ом и задержкой от 0,1 до 1,6 нс.

Серия CL включает в себя ЛЗ в корпусах BGA размером 3,2×2,5 мм и также делится на два семейства по приведенному выше принципу. Максимальная задержка этой серии до 220 нс с шагом 20 пс.

ЛЗ ПО ТЕХНОЛОГИИ LTCC

Технология LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic — низкотемпературная совместно обжигаемая керамика) позволяет создавать многослойные печатные платы на керамической основе. Несколько слоев керамики с уже нанесенными на них проводниками и такими пассивными элементами, как резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, совмещаются в стек и обжигаются одновременно, что и дало название технологии. Благодаря низкой температуре обжига, находящейся в диапазоне 850...1000 °C, для формирования проводников можно использовать такие относительно легкоплавкие металлы с низким удельным сопротивлением, как золото и серебро, и тем самым снизить потери сигнала. Возможность размещения проводников в нескольких слоях позволяет создавать малогабаритные ЛЗ с высокими электрическими параметрами.

Компания ELMEC выпускает по технологии LTCC как стандартные одноканальные, так и двухканальные дифференциальные ЛЗ (рис. 17).



▲ **Рис. 17.** ЛЗ компании ELMEC, изготовленные по технологии LTCC

Серия CDM включает в себя стандартные ЛЗ с волновым сопротивлением 50 Ом и задержкой от 100 пс до 3 нс в корпусах размером 5,0×2,5 мм. ЛЗ модели CDM0105 с задержкой 100 пс имеет полосу пропускания 0...15 ГГц и омическое сопротивление не более 1 Ом. Наибольшую задержку 3 нс имеет ЛЗ модели CDM3005, она работает в полосе частот 0...1,1 ГГц и имеет на постоянном токе сопротивление 5 Ом.

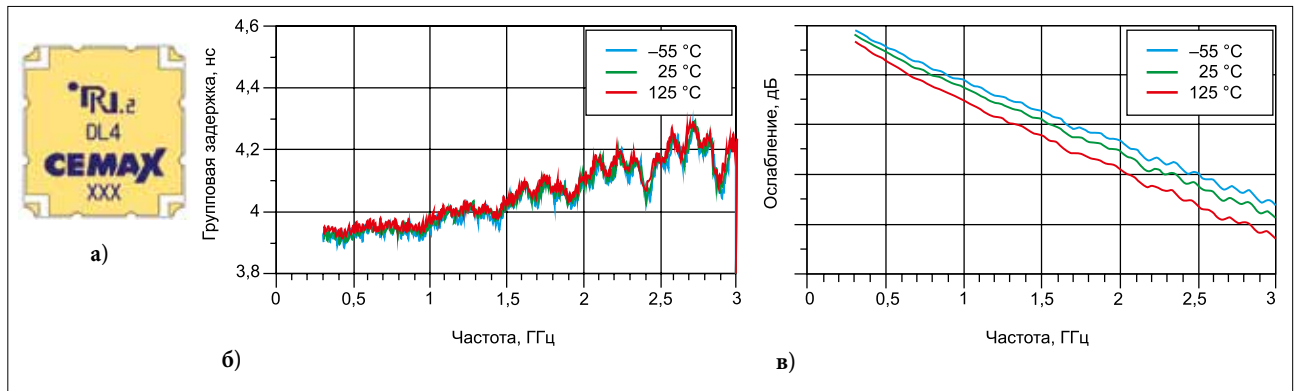
В серию CDKD входят двухканальные дифференциальные ЛЗ с волновым сопротивлением 100 Ом в корпусах размером 5,0×3,8 мм. Максимальную задержку 5 нс имеет модель CDKD5005; ее полоса пропускания 0...600 МГц, активное сопротивление 7,5 Ом. Дифференциальные линии можно включить последовательно, при этом получится ЛЗ с волновым сопротивлением 50 Ом и удвоенным временем задержки.

Интервал рабочих температур ЛЗ этих серий составляет -40...+85 °C, температурный коэффициент задержки не более 0,15 1/°C, максимально допустимое напряжение 50 В, сопротивление изоляции не менее 10 МОм.

Применение технологии LTCC и микрополосковых цепей позволило корейской компании RN2 создать широкополосные ЛЗ серии SEMAX с допустимой входной мощностью до 100 Вт при рабочей полосе частот до 3 ГГц. Модель DL4 (рис. 18) имеет групповую задержку 4,20...4,95 нс с погрешностью не более 0,1 нс в полосе частот 300...2800 МГц, расширенный температурный интервал -55...+125 °C и размещена в керамическом корпусе размерами 10×11,8×2 мм.

ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

ЛЗ синхронизирующих или информационных импульсных сигналов составляют отдельное направление в технике ЛЗ. Цифровые сигналы имеют фиксированные уровни, поэтому значение имеет задержка во времени фронтов входного импульса. Импульсные ЛЗ востребованы во многих цифровых



▲ Рис. 18. Внешний вид (а), частотные характеристики ослабления (б) и группового запаздывания (в) ЛЗ DL4 компании RN2

электронных устройствах. Некоторые производители импульсных узлов задержки называют их цифровыми фазовращателями (Clock/Data Phase Shifters) или импульсными регуляторами фазы (Clock/Data Phase Adjusters, Clock/Data Phase Trimmers). Иногда используется наименование «настоящие линии задержки» (True Time Delay, TTD), поскольку двухуровневая форма входного сигнала остается неизменной на выходе, а в некоторых моделях за счет буферизации и нормализации размаха даже происходит удаление технических погрешностей входного сигнала.

В качестве дополнительных параметров ЛЗ применительно к потоку произвольной двоичной импульсной последовательности используют наименьшую длительность входных импульсов и наибольшую частоту их повторения или скорость передачи информации. В таких узлах предусматривается передача по постоянному току, так как в битовом потоке могут быть длительные серии одноуровневых символов. Применительно к синхронизирующему потоку равноотстоящих импульсов в качестве параметра используют наибольшую частоту их следования или номинальную скорость передачи данных. Узлы фиксированной задержки импульсов характеризуются также:

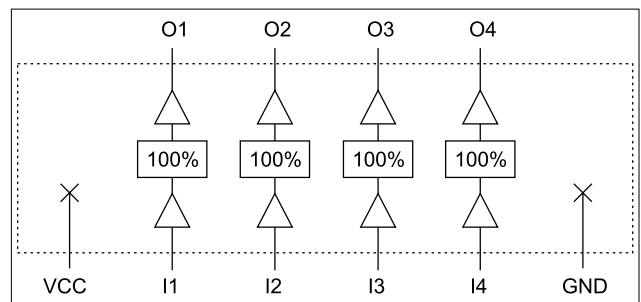
- выбранной системой логических уровней;
- возможностью использования дифференциальных пар сигналов с противоположными уровнями;
- количеством шин многоуровневых цифровых сигналов, имеющих одинаковое значение задержки.

Компания ELMES производит серии FDC и FDD трехвыводных ЛЗ на время 0...27 нс, в том числе с согласованным на 50 Ом входным и выходным сопротивлением, которые могут использоваться с логическими микросхемами технологий ТТЛ, ЭСЛ, ПЭСЛ, НВПЭСЛ и КМОП. Они имеют полосу пропускания 0,074...5 ГГц в зависимости от номинальной задержки. Для задержки импульсных сигналов с частотой следования 300...1000 МГц на время от 0,5 до 2 нс предназначены интегральные чип-компоненты семейства CDM. Они выполнены по технологии LTCC с использованием сосредоточенных индуктивных элементов в полосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом.

Серия CDLF этой компании включает в себя двухканальные дифференциальные ЛЗ. Модель CDLF-30С обеспечивает задержку фронта дифференциального импульса на 300 пс, обеспечивая длительность фронта выходного сигнала 30 пс. Полоса пропускания этой модели ЛЗ составляет 0...10 МГц, сопротивление по постоянному току 0,5...3,5 Ом в зависимости от номинала задержки, допустимый ток 50 мА, допустимое напряжение 50 В. Компоненты размещены в чип-корпусе типоразмера 0805 (2×1,25 мм).

Элементы фиксированной задержки серии MDU14 от компании Data Delay Devices обеспечивают буферизацию и задержку четырех каналов логических сигналов стандарта ЭСЛ на одинаковое время в диапазоне от 2 до 25 нс в зависимости от модели

(рис. 19). Напряжение питания элементов –5 В, температурный коэффициент задержки 1000 ppm/°C в интервале рабочих температур 0...+85 °C. Они размещены в 24-выводном корпусе DIP для поверхностного монтажа, по условиям применения отвечают требованиям военного стандарта.

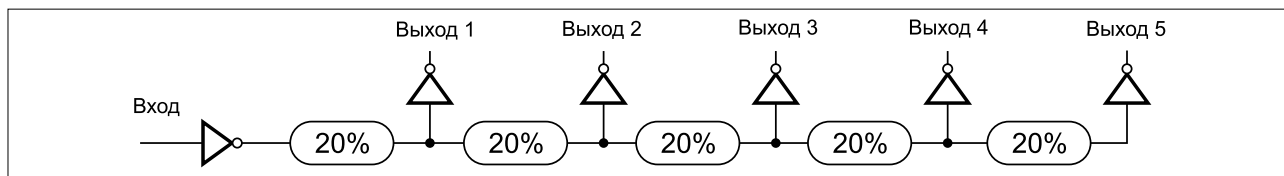


▲ Рис. 19. Функциональная схема четырехканальных узлов задержки серии MDU14 компании Data Delay Devices

Компания EC2 предлагает несколько семейств активных ЛЗ для работы с цифровыми сигналами: безотводные, с отводами, многоканальные и программируемые (рис. 20). Основу этих ЛЗ составляют LC-фильтры нижних частот на сосредоточенных элементах, согласованные по входу и выходу с цифровыми буферными каскадами. Каждое семейство ЛЗ содержит несколько серий, различающихся типом корпуса, способом монтажа (DIP, SIP, Mini DIP, для монтажа в отверстия и поверхностного), уровнем логических сигналов (ТТЛ, ЭСЛ или КМОП), а также областью применения (коммерческая или военная). Семейство безотводных ЛЗ насчитывает десять серий, а с отводами — 18 серий. Время задержки может меняться в зависимости от модели от 2 до 1000 нс, количество отводов составляет от четырех до десяти. Многоканальные ЛЗ безотводные, число каналов от двух до четырех. Диапазон рабочих температур ЛЗ для коммерческих применений составляет 0...70 °C, а для военных –50...+125 °C.



▲ Рис. 20. Активная ЛЗ компании EC2 для TTL-сигналов



▲ Рис. 21. Структура микросхем серии DS1100 компании Dallas

Компания Dallas предлагает серию DS1100, содержащую 27 моделей цифровых многоотводных ЛЗ для работы с сигналами стандартов ТТЛ или КМОП. Микросхемы этой серии позволяют сформировать пять эквидистантных по задержке импульсных последовательностей (рис. 21), полная задержка сигнала может составлять в зависимости от конкретной модели ЛЗ от 20 до 500 нс. Микросхемы питаются от источника напряжением 5 В, имеют диапазон рабочих температур $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, выпускаются в корпусах DIP или SO.

ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ СИГНАЛА

Задержка СВЧ-сигналов на сотни наносекунд и более представляет определенную проблему из-за их высокого затухания в длинных линиях передачи. Одним из решений этой проблемы является преобразование электрических сигналов в сигналы другого вида, их задержка в соответствующей среде распространения и последующее обратное преобразование. Чаще всего используется преобразование электрического сигнала в оптический или акустический. Для задержки оптического сигнала используется длинное оптоволокно с низкими потерями, для акустического — кварцевый, стеклянный или металлический звуковод, в котором скорость распространения звуковой волны на много порядков ниже скорости распространения электрического сигнала в линии передачи.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛЗ

Волоконно-оптическая ЛЗ (ВОЛЗ) состоит из преобразователя электрического сигнала в оптический (оптического передатчика), отрезка оптоволоконной линии необходимой длины и преобразователя оптического сигнала в электрический (оптического приемника).

Задачей оптического передатчика является модуляция оптического излучения лазерного диода входным радиочастотным сигналом, причем проблема заключается в нелинейности модуляционной характеристики лазерного диода и его низкой температурной стабильности. Для снижения нелинейных искажений применяются различные методы: введение в модулирующий сигнал обратных предискажений, отрицательная обратная связь, фазовая компенсация и другие. Широко применяется отрицательная обратная связь по оптическому каналу. Для ее организации часть излучаемой лазерным диодом мощности подается на встроенный в передающий модуль фотоприемник, а его выходной сигнал используется в петле обратной связи. Такая схема позволяет не только снизить нелинейные искажения до требуемого уровня, но и стабилизировать среднюю мощность излучения лазерного диода, сильно зависящую от его температуры. Иногда используется схема со стабилизацией мощности излучения лазерного диода и последующей модуляцией его луча с помощью специального оптического модулятора. Такой метод модуляции считается наиболее широкополосным.

Для задержки сигнала используется оптическое волокно необходимой длины, намотанное на катушку. Благодаря малому диаметру оптического волокна катушка получается компактной, но внутренний диаметр катушки обычно составляет не менее 50 мм во избежание роста потерь сигнала при уменьшении радиуса изгиба оптоволоконной линии.

В качестве преобразователей оптического сигнала в электрический наибольшее применение получили PIN-фотодиоды (ФД) и лавинные фотодиоды (ЛФД). ЛФД имеют преимущество перед PIN-ФД по чувствительности, но обладают также и рядом недостатков: у них более высокое рабочее напряжение питания, довольно сильная температурная зависимость, меньшая надежность и более высокая стоимость по сравнению с PIN-ФД. По совокупности параметров в приемных модулях более широко используются PIN-ФД. Чувствительность современных PIN-ФД составляет от 10 нВт до 100 пВт ($-50...-70\text{ дБм}$).

Потери в одномодовых оптических волокнах составляют не более 0,5 дБ/км, что позволяет использовать довольно длинные их отрезки и получать большие времена задержки. Недостатком ВОЛЗ является высокий коэффициент шума, составляющий у некоторых моделей более 40 дБ.

Компания EMCORE предлагает несколько моделей ВОЛЗ с фиксированным временем задержки от 250 нс до 65 мкс. Модель 5021D-A11 обеспечивает фиксированную задержку 250 нс в рабочем диапазоне частот сигналов 0,05...3 ГГц с неравномерностью не более 4 дБ. Вносимые потери составляют -37 дБ , компрессия 1 дБ начинается при уровне входного сигнала 20 дБм, величина IP_3 30 дБм, коэффициент шума 44 дБ. ЛЗ выполнена в металлическом корпусе размером $127\times 127\times 25\text{ мм}$, рабочий диапазон температур $-40...+65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогичная модель 5021D-D11 имеет полосу рабочих частот 0,05...18 ГГц при прочих равных параметрах.

Модель 5021D-D15 обеспечивает задержку 65 мкс для сигналов с полосой частот 0,05...18 ГГц с неравномерностью 6 дБ. Вносимые этой ВОЛЗ потери составляют -46 дБ , остальные параметры аналогичны параметрам ранее рассмотренных моделей. Задержка распространения света в кварцевом стекле составляет примерно 5 нс/м, поэтому для достижения задержки 65 мкс необходимо около 13 км оптоволоконной линии. Заключенная в стальной кожух катушка с таким длинным отрезком оптоволоконной линии имеет характерный внешний вид (рис. 22).

Компания RF Optic предлагает ВОЛЗ с диапазоном частот 0,1...18 ГГц при неравномерности $\pm 3\text{ дБ}$ и фиксированным временем задержки до 15 мкс. Компрессия 1 дБ начинается при входной мощности 15 дБм, минимальная мощность сигнала -80 дБм ,



▲ Рис. 22. Оптическая ЛЗ на 65 мкс модели 5021D-D15 компании EMCORE

максимальная допустимая мощность 23 дБм, коэффициент шума 40 дБ. ВОЛЗ выпускаются в металлическом корпусе размером 226×160×72 мм, диапазон рабочих температур 0...60 °С.

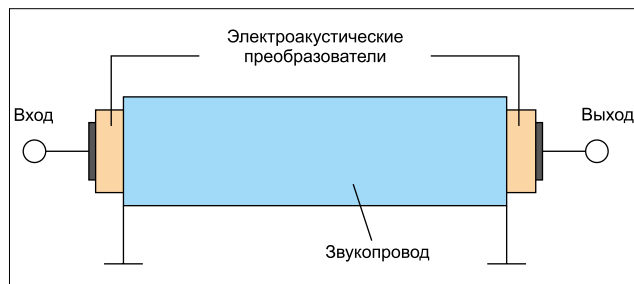
Несколько моделей ВОЛЗ выпускает компания Microwave Photonic Systems. Модель MP-5000-TRX-DL/9G выпускается в металлическом корпусе размером 171×152×60 мм. Она обеспечивает задержку 10 нс в полосе частот 9,1...9,6 ГГц с неравномерностью АЧХ ±0,75 дБ, вносит потери –30 дБ, допускает входную мощность сигнала 20 дБм, коэффициент шума составляет 48 дБ. Модель OPDL-5000-DL-4G выпускается в стандартном 19-дюймовом корпусе высотой до 3U. Диапазон частот составляет 0,1...4 ГГц с неравномерностью ±2 дБ, время задержки сигнала согласуется с заказчиком, но не превосходит 500 нс.

Компания Eastern OptX предлагает ВОЛЗ серии 1000 в стандартных 19-дюймовых корпусах. Время задержки согласовывается с заказчиком и может достигать 500 мкс, диапазон частот до 40 ГГц. Коэффициент передачи составляет 6 дБ при задержке 50 мкс и уменьшается с коэффициентом 0,1 дБ/мкс. Компрессия 1 дБ начинается при уровне входного сигнала –15 дБм, коэффициент шума 12 дБ.

Задержку до 2000 мкс обеспечивает прибор DLS этой же компании. Его диапазон рабочих частот составляет 0,05...40 ГГц, с неравномерностью АЧХ менее 2 дБ, погрешность времени задержки менее 2%, компрессия 1 дБ начинается для входного сигнала 20 дБм, вносимые потери –30 дБ. Расплатой за рекордное значение времени задержки стал коэффициент шума, он составляет около 70 дБ.

ЛЗ НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Ультразвуковые ЛЗ (УЛЗ) на основе поверхностных акустических волн (ПАВ, SAW) и объемных акустических волн (ОАВ, BAW) благодаря низкой скорости распространения акустической волны в твердом веществе позволяют при небольших размерах задержать сигнал на единицы и даже десятки микросекунд. В состав УЛЗ входят три основных элемента: входной и выходной электроакустические преобразователи, преобразующие электрический сигнал в акустический и обратно, и звукопровод, служащий средой распространения акустического колебания и определяющий время задержки сигнала (рис. 23). В зависимости от конструкции электроакустические преобразователи возбуждают поверхностную или объемную волну, причем скорость поверхностной волны в твердом теле существенно ниже скорости объемной волны. Для уменьшения размеров УЛЗ может использоваться много-



▲ Рис. 23. Упрощенная схема ЛЗ на объемных акустических волнах

кратное отражение акустических волн от граней звукопровода. В качестве материалов для преобразователей используются такие пьезоэлектрики, как кварц, танталит лития и ниобат лития. Для звукопровода используется плавленный или монокристаллический кварц, стекло, соли металлов, а также магниевые сплавы. УЛЗ имеют ограниченную полосу пропускания и проектируются как полосовые фильтры с постоянным ГВЗ в рабочей полосе частот.

НЕДИСПЕРСИОННЫЕ УЛЗ

Компания Teledyne Microwave Solutions выпускает несколько десятков моделей УЛЗ по технологии BAW с центральными ча-

стотами от 0,338 до 17 ГГц (рис. 24). В частности, УЛЗ MBJ-1003 имеет центральную частоту 17 ГГц, полосу пропускания 2 ГГц, задержку 155 нс и вносимые потери 47,8 дБ.

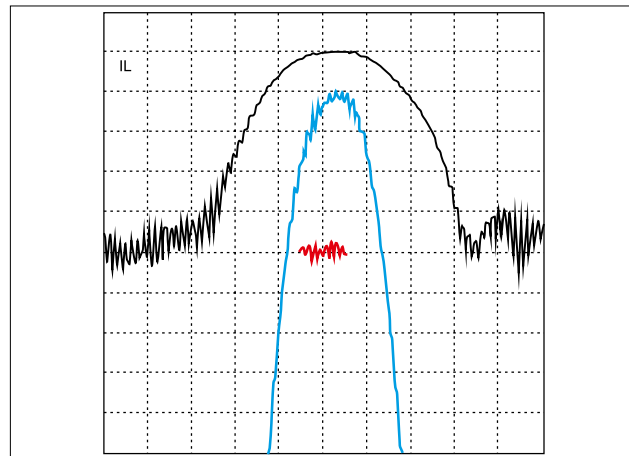


▲ Рис. 24. УЛЗ по технологии BAW компании Teledyne Microwave Solutions

Компания Phonon выпускает 25 моделей УЛЗ на ПАВ (рис. 25) с центральными частотами от 60 МГц (задержка до 133 мкс) до 1,575 ГГц (задержка до 0,32 мкс). Относительная полоса пропускания УЛЗ может составлять 0,1–10% для преобразователей из кварца и 5–150% для преобразователей из ниобата лития. Вносимые УЛЗ потери обычно составляют около 25...35 дБ. На рис. 26 приведены АЧХ и ФЧХ УЛЗ модели 101136 с центральной частотой 1,575 ГГц и временем задержки 0,32 мкс. Полоса пропускания этой УЛЗ 30 МГц, вносимые потери 24,7 дБ, уровень паразитных сигналов –39 дБ.



▲ Рис. 25. УЛЗ по технологии SAW компании Phonon



▲ Рис. 26. АЧХ (черный цвет — цена деления 10 дБ, синий цвет — цена деления 1 дБ) и ФЧХ (красный цвет, цена деления 10°) УЛЗ 101136 компании Phonon (цена деления по оси частот 25 МГц)

Компания API Technologies предлагает как стандартные, так и заказные ЛЗ по технологии ПАВ для диапазона частот от 20 МГц до 2 ГГц с временами задержки от 0,1 до 10 мкс и относительными полосами пропускания от 5 до 55%. ЛЗ выпускаются в герметичных керамических BGA-корпусах.

Российская компания АЕС DESIGN производит серию ПАВ-ЛЗ с центральными частотами от 60 МГц до 2,6 ГГц, относительными полосами от 1 до 120% и временами задержки от 50 нс до 25 мкс. ЛЗ выпускаются в металлокерамических SMD- и DIP-корпусах, а также в металлических корпусах с соединителями SMA.

ДИСПЕРСИОННЫЕ УЛЗ

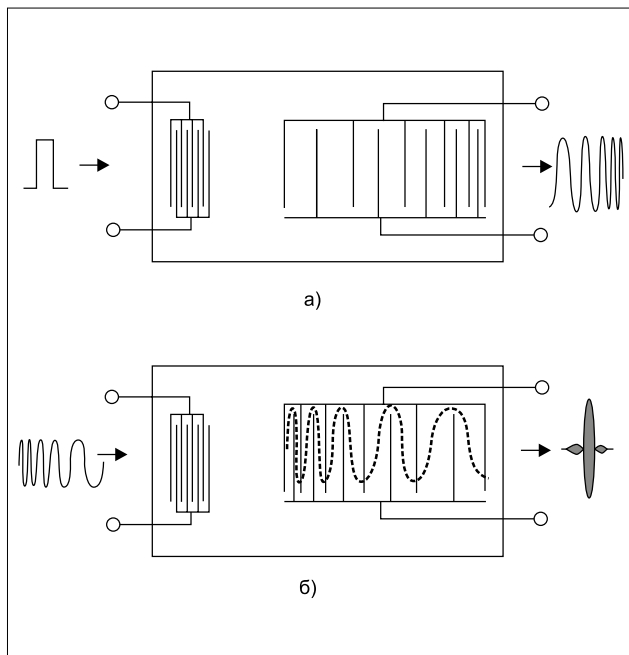
Дисперсионные УЛЗ на ПАВ используются в радиолокационной технике для синтеза (в тракте передачи) или согласованной фильтрации (в тракте приема) сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Для синтеза или согласованной фильтрации ЛЧМ-сигналов используются дисперсионные ЛЗ, время задержки которых линейно зависит от частоты. При изготовлении дисперсионных УЛЗ на поверхность пьезоэлектрического звукопровода 1 (рис. 27) напыляются с постоянным шагом электроды входного преобразователя 2 и с переменным

шагом электроды выходного преобразователя 3. При синтезе ЛЧМ-сигнала на входной преобразователь подается короткий радиоимпульс с широким спектром (рис. 27а). Вызванная им акустическая волна распространяется по звукопроводу и достигает сначала электродов с большим шагом, выделяющих из спектра сигнала низкочастотные составляющие, а затем электродов с малым шагом, выделяющих высокочастотные составляющие. В результате на выходе фильтра появляется сигнал с линейно меняющейся частотой. При согласованной фильтрации ЛЧМ-сигнал подается на вход фильтра, и в случае

Таблица. Параметры линий фиксированной задержки

Фирма	Модель, серия	Задержка, нс	Частота, ГГц	Уровень входного сигнала	Волновое сопротивление, Ом	ТК, 10 ⁻⁶ /°С	Особенность
AEC DESIGN	A359-2595M1	1200	2595	–	–	–	УЗ
Allen Avionics	80/81P	20...2000	0,5	5,5 В	50; 100; 200	100	20 отводов
Anaren	XDL15-3-030S	2,85	0,11...2,7	1 Вт	50	0,1	ПМ
API Technologies	–	1...250	6	0,3 Вт	50	0,15	К
	–	10...5000	0,15	–	50	70	СП
CEMAX	DL4	3,9...4,95	2,8	100 Вт	50	–	LTCC
Dallas	DS1100	20...500	–	ТЛ, КМОП	–	–	5 отводов
Data Delay Devices	MDU14	2...25	–	ЭСЛ	–	1000	4 канала
Eastern OptX	1000	500000	40	–15 дБм	–	–	ВО
	DLS	2 000 000	0,05...40	20 дБм	–	–	ВО
ELMEC	CDM	0,1...3,0	15	100 мВт	50	0,15	LTCC
	CDKD	5	0,6	–	100	–	LTCC
	FDC, FDD	27	5	–	–	–	LTCC
	CDM	2	1	–	50	–	LTCC
EMCORE	5021D-A11	250	0,05...3	20 дБм	–	–	ВО
	5021D-D15	65000	0,05...18	–	–	–	ВО
K&L Microwave	TMD-2140-80TD10.0	10	1,9...2,2	1 Вт	50	0,1	СП+РП
Micro-Coax	LL	200	2	–	50	–	К
Microwave Photonic Systems	MP-5000-TRX-DL/9G	10000	9,1...9,6	20 дБм	–	–	ВО
	OPDL-5000-DL-4G	500000	0,1...4	–	–	–	ВО
Midisco	MDC141DL100	100	–	–	50	–	К
Merrimac Industries	DLL-048-2.14G	4,85	2,2	45 Вт	50	0,02	ТлП
Phonon	101136	320	1,575	–	–	–	УЗ
RCD Components	P01S, SMP01S	0,1...1	–	–	50, 75	100	РП
	S01	0,5...10	–	–	50, 93, 100	100	РП
	P01, P01A, P01G	10...1000	–	–	50, 100, 200, 300, 500	100	РП
	SP05	5...100	–	–	50, 100	100	СП, 5 отводов
	SP10	10...750	–	–	50, 100, 200, 300, 500	–	СП, 10 отводов
RF Optic	–	15000	0,1...18	23 дБм	–	–	ВО
Teledyne	MBJ-1003	155	17	–	–	–	УЗ
Thin Film Technology	DS	0,1...10	12	100 мА	50	–	ТлП
	DL	0,1...5,1	–	–	50	–	ТлП
	GL	0,1...5	–	–	50	–	ТлП
	HE	0,1...3,5	–	–	50	–	ТлП
Waka Manufacturing	SX-12	0,3	110	–	50	–	К
Кечарк, ОАО	ЛЗРП	110...550	–	–	150, 300, 600	–	РП
	ЛЗЕ	50...4000	–	–	300, 600, 1200, 2400	–	СП, 5, 10, 20 отводов
	ЛЗТ	50...2000	–	–	300, 400, 600, 1200, 2400	–	СП, 5, 10, 20 отводов
	МЛЗ	100...250	–	–	100	–	СП

Примечание: ВО — волоконно-оптическая; К — коаксиальная; ТлП — тонкопленочная; ТлП — толстопленочная; МП — микрополосковая; РП — распределенные параметры; СП — сосредоточенные параметры; УЗ — ультразвуковая



▲ **Рис. 27.** Использование дисперсионной УЛЗ для синтеза ЛЧМ-сигнала (а) и его сжатия (б)

совпадения их частотных параметров на выходе последнего появляется сжатый во времени импульс большой амплитуды (рис. 27б).

В качестве основных технических параметров дисперсионных УЛЗ выступают:

- центральная частота полосы пропускания;
- ширина полосы пропускания;
- величина дисперсии;
- время задержки на центральной частоте;
- крутизна время-частотной характеристики;
- длительность сжатого импульса;
- уровень боковых лепестков сжатого импульса.

Компания Phonon предлагает более 40 моделей дисперсионных ЛЗ для согласованной фильтрации сигнала с центральными частотами от 28 МГц до 1,3 ГГц. Наиболее высокочастотная дисперсионная УЛЗ модели ID1300-500-.5U имеет центральную частоту 1,3 ГГц, полосу пропускания 500 МГц, дисперсию 0,5 мкс, задержку 0,848 мкс, крутизну время-частотной характеристики $-0,0012$ мкс/МГц, длительность сжатого импульса 1,9 нс, уровень боковых лепестков $-14,4$ дБ, вносимые потери 36 дБ.

ИТОГИ

Рынок предлагает широкий ассортимент всевозможных ЛЗ для различных применений, изготовленных по самым разным технологиям. В одной статье невозможно рассказать обо всех выпускаемых моделях, наша задача скромнее — сориентировать читателя и указать примерные направления поиска необходимой ему ЛЗ. Для дополнительной помощи в табл. обобщены параметры различных ЛЗ с фиксированной задержкой. —