

## УПРАВЛЯЕМЫЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

В предыдущем номере журнала [1] был дан обзор компонентов с фиксированным временем задержки от ведущих мировых производителей. Эта статья, продолжая начатую тему, знакомит читателей с рынком управляемых линий задержки. В ней рассматриваются основные технологии управления задержкой, раскрываются их особенности, достоинства и недостатки, а также возможности созданных по этим технологиям компонентов и приборов.

Линии задержки с фиксированным временем задержки (ФЛЗ) [1] используются для подстройки электрических длин многоканальных трактов, коррекции формы диаграммы направленности многоэлементной антенны, синхронизации процессов, для решения других системных или измерительных задач.

Управляемый фазовращатель на средоточенных реактивных элементах (Фвр) при узкополосном СВЧ-сигнале на радиочастотном входе с несущей частотой  $f_0$  с помощью квазистатического (ручного или электромеханического) изменения [2, 3] задержки на время  $t$  позволяет изменить фазовый набег сигнала на выходе компонента на величину  $\varphi = 2\pi f_0 t$  радиан. При этом к полосе пропускаемых частот по входу управления предъявляется только требование передачи по постоянному току. Поэтому такой узел называют также фазовым корректором или фазовым триммером.

Фазовый модулятор предназначен также для использования с сигналом синусоидальной формы на радиочастотном входе. При этом фазовый сдвиг выходного сигнала приобретает угловую модуляцию с полосой пропускаемых частот по входу управления от постоянного тока до верхней граничной частоты модуляции, которая значительно меньше, чем частота несущего входного сигнала. Векторный (или полярный) модулятор обеспечивает в выходном сигнале одновременно амплитудную и фазовую (или квадратурную) модуляцию в полосе частот по входу управления от постоянного тока до верхней граничной частоты, а выходной радиочастотный сигнал имеет почти синусоидальную форму.

В отличие модуляторов идеализированная управляемая линия задержки (УЛЗ) предназначена для входного электрического сигнала произвольной формы  $u(t)$ , которая сохраняется на выходе с задержкой на заданное время  $t$ .

Если входной СВЧ-сигнал занимает ограниченную полосу частот в окрестности несущей частоты, то условием сохранения на выходе формы входного сигнала  $u(t)$  является постоянство в этой полосе частот группового времени запаздывания  $\tau_{ГВЗ} = -(1/2\pi) d\varphi/df$ . Это требование соответствует постоянству значения крутизны его статической фазочастотной характеристики (ФЧХ)  $\varphi(f)$  по радиочастотному входу в указанной полосе частот. Такими свойствами обладают некоторые типы полосно-пропускающих частотных фильтров. Они характеризуются примерно постоянным значением группового времени запаздывания  $\tau_{ГВЗ}$  в определенной полосе частот радиодиапазона, но не допускают управления его значением.

В отличие от фазовращателя и модулятора для управляемой линии задержки надо рассматривать его ФЧХ по радиочастотному входу  $\varphi(f)$  во всей полосе частот от постоянного тока до верхней частоты спектра высших гармоник входного сигнала, а полосу частот по входу управления следует контролировать от постоянного тока до верхней частоты огибающей выходного сигнала. Именно такие УЛЗ, выполненные на основе коаксиальных или волоконно-оптических линий передачи, называют в англоязычной литературе True-Time Delay Lines — (TTD или TTDL) — «настоящими линиями задержки». Они находят широкое применение при управлении диаграммой на-

правленности в фазированных антенных решетках.

Следует иметь в виду, что параметр «фаза» часто не совсем корректно используется взамен более точного значения «фазовый набег между выходом и входом при синусоидальном входном сигнале». Если входной сигнал имеет импульсную форму с известным значением периода повторения  $T_{П}$ , то определенный момент времени, например, характеризующий положение его переднего фронта, принимают за начало отсчета. При этом запаздывание на время  $\Delta$  положения такой же точки выходного сигнала условно принимается за фазовый сдвиг на  $2\pi\Delta/T_{П}$  радиан, что эквивалентно  $(\Delta/T_{П})180^\circ$ , принимая интервал времени  $T_{П}$  за  $360^\circ$ .

Ввиду указанного пересечения областей определения и применения указанных выше управляемых функциональных узлов, ряд производителей позиционируют одинаковые по существу свои изделия либо как фазовращатель с линейной ФЧХ, либо как полосно-пропускающий частотный фильтр с установленным значением полосы прозрачности, либо как линию задержки с определенным значением группового времени запаздывания  $\tau_{ГВЗ}$  для заданной полосы частот.

Принципиальное различие статических ФЧХ по радиочастотному каналу между управляемой линией задержки (УЛЗ) и управляемым фазовращателем (УФв) состоит в том, что для УФв фазовый сдвиг  $\varphi$  примерно постоянен в пределах рабочей полосы частот входного сигнала, а для УЛЗ нормируется постоянство крутизны ФЧХ (группового времени запаздывания) в пределах от посто-

янного тока до высшей из учитываемых гармоник входного сигнала несинусоидальной формы.

По каналу управления для УЛЗ используют дополнительные технические характеристики:

- тип цепи управления (аналоговое электрическим напряжением, аналоговое током или ступенчатое с определенным значением шага по времени задержки);
- диапазон перестройки времени задержки от начального при отсутствии управляющего воздействия до максимально допустимого значения;
- максимальное отклонение от линейной зависимости величины задержки от управляющего воздействия;
- неравномерность коэффициента передачи по радиочастотному каналу (или ослабления радиосигнала) во всем диапазоне допустимых управляющих воздействий;
- инерционность канала управления. Эта величина характеризуется либо задержкой установления сигнала на радиочастотном выходе на один дискрет, либо допустимой верхней граничной частотой управляющего воздействия.

Управляющий сигнал УЛЗ со ступенчатым характером управления может быть представлен двоичным кодом в определенном стандарте логических уровней. В таком случае УЛЗ может называться цифровой ЛЗ и характеризоваться количеством двоичных разрядов управляющего кода.

Управляемые линии задержки (УЛЗ) могут быть с ручным, электромеханическим или электронным управлением. Ручное управление заключается либо в механическом изменении длины воздушной коаксиальной линии передачи, либо в механической коммутации фиксированных ЛЗ с различным временем задержки. В ЛЗ с электромеханическим управлением используются механические принципы изменения времени задержки, но в качестве исполнительных узлов используются шаговые электродвигатели или электромагнитные реле. Такие ЛЗ сохраняют основное достоинство ЛЗ с ручным управлением, заключающееся в большой допустимой мощности СВЧ-сигнала и низком уровне искажений модулирующего сигнала по входу управления. Их недостатком является увеличенная инерционность процесса перестройки, особенно характерная для ЛЗ с перестройкой шаговыми двигателями. ЛЗ с электронным управлением перестраиваются максимально быстро, но допускают существенно более низкий уровень сигнала, поскольку в качестве

переключателей содержат полупроводниковые компоненты.

#### ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ С РУЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

К этому классу относятся ЛЗ, плавно перестраиваемые с помощью механических регулировочных элементов или управляемые дискретно переключением фиксированных ЛЗ. В первом случае обычно используются механически раздвигаемые коаксиальные воздушные линии. Для точной подстройки задержки в малых пределах используются миниатюрные ЛЗ, встраиваемые в коаксиальные соединители. ЛЗ с широким диапазоном перестройки представляют собой достаточно большие по размерам механические конструкции. Дискретно управляемые ЛЗ обычно используют переключаемые коаксиальные или полосковые фиксированные ЛЗ и механические переключатели или тумблеры. Применяются также схемы, использующие принцип перемещения контакта по обмотке ЛЗ с распределенными или сосредоточенными параметрами. ЛЗ с механическим управлением не содержат в сигнальном тракте полупроводниковых компонентов и поэтому обычно допускают большую проходную мощность без искажения сигнала.

Для фиксированной частоты входного сигнала на радиочастотном входе перестраиваемые ЛЗ часто позиционируются и используются как фазовращатели. Для таких фазовращателей указывают в качестве параметра крутизну  $S$  его фазочастотной характеристики по радиочастотному входу с размерностью  $^\circ/\text{ГГц}$ . Зная значение этого параметра, легко определить диапазон изменения времени задержки  $\Delta t$  в пс по формуле  $\Delta t = 2,78 \cdot S$ .

#### ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ УЛЗ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В качестве ЛЗ с распределенными параметрами обычно используются коаксиальные воздушные линии или спиральные линии, представляющие собой рядную обмотку эмалированным проводом на медной трубке. И те и другие допускают достаточно большую мощность сигнала и имеют низкую частотную дисперсию — слабую зависимость времени задержки от частоты, что позволяет сохранять форму задержанного сигнала на радиочастотном выходе.

#### ПОДСТРАИВАЕМЫЕ УЛЗ НА КОАКСИАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ

Плавное изменение времени задержки реализуется обычно с помощью телескопических или тромбонных коаксиальных конструкций, в которых диаметры

проводников стационарной и подвижной воздушных коаксиальных линий очень точно сопрягаются.

Простейшие УЛЗ с небольшим диапазоном регулировки могут встраиваться в коаксиальные соединители и адаптеры. Соединители стандарта SMA серии 3993 производства Coaxicom (рис. 1) предназначены для интервала частот от постоянного тока до 18 ГГц и имеют диапазон изменения времени задержки 28 пс, коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) не хуже 1,3, рабочий диапазон температур составляет  $-65 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$ .



▲ Рис. 1. Подстраиваемые соединители серии 3993 компании Coaxicom

Адаптеры отличаются тем, что не монтируются на кабель, а выполнены в виде отрезка линии передачи с двумя согласованными соединителями, позволяющими подключить их в кабельную линию и даже перейти с одного стандарта соединителей на другой. Фирма Spectrum Elektrotechnik выпускает множество моделей подстраиваемых адаптеров. Ее адаптеры с соединителями SMA (рис. 2) работают в диапазоне частот от постоянного тока до 26 ГГц, с соединителями 2.4mm — до 50 ГГц, а с соединителями 1.85mm — до 63 ГГц. Например, адаптер LS-P165 с диапазоном вносимой задержки до 28 пс обеспечивает в этом интервале частот значения потерь 0,8 дБ и КСВН 1,4.



▲ Рис. 2. Подстраиваемый адаптер производства Spectrum Elektrotechnik

Фирма Waka выпускает подстраиваемые адаптеры (рис. 3) с соединителями SMA (частота до 18 ГГц, КСВН 1,3, по-



▲ Рис. 3. Подстраиваемый адаптер фирмы Waka

тери 0,7 дБ), 2,92mm (частота до 40 ГГц, КСВН 1,4, потери 0,7 дБ) и 1.85mm (частота до 60 ГГц, КСВН 1,5, потери 1,0 дБ). Все эти адаптеры имеют диапазон изменения времени задержки 60 пс.

Телескопическая коаксиальная система используется также в ЛЗ модели 9428Т компании ARRA (рис. 4). Телескопическая линия раздвигается поворотным резьбовым кольцом и фиксируется винтом. Полоса частот ЛЗ составляет 0–18 ГГц, диапазон изменения времени задержки 42 пс, на предельной частоте она имеет КСВН 1,5 и потери 0,75 дБ, допустимая средняя мощность сигнала составляет 100 Вт, пиковая 5 кВт. Схожие по конструкции и параметрам модели предлагают также фирмы RF-Lambda и SHX.



▲ Рис. 4. Телескопическая перестраиваемая ЛЗ модели 9428Т компании ARRA

Тромбонная конструкция УЛЗ нагляднее всего представлена моделью ST-05 фирмы Microlab FXR (рис. 5). Эта ЛЗ работает в интервале частот 0,25–4,00 ГГц, диапазон изменения задержки не менее 2 нс, потери составляют 1,2 дБ на частоте 4 ГГц, КСВН 1,45, допустимая средняя мощность сигнала 100 Вт.



▲ Рис. 5. Тромбонная УЛЗ модели ST-05 фирмы Microlab FXR

Для расширения диапазона перестройки и уменьшения геометрических размеров тромбонные линии могут включаться последовательно. Тромбонная

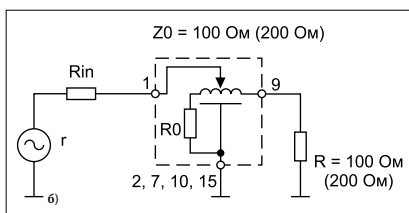


▲ Рис. 6. УЛЗ модели 6804 на основе много-секционного тромбона компании API Technologies

ЛЗ модели 6804 от API Technologies (рис. 6) предназначена для диапазона частот от постоянного тока до 8 ГГц. Конструктивно это тромбон из шести секций, позволяющий при перемещении подвижной системы получить увеличенное в три раза время задержки сигнала. Диапазон изменения задержки этого прибора 265 пс, КСВН 2,0, вносимые потери 1 дБ. УЛЗ снабжена 48-оборотным приводным винтом, позволяющим точно устанавливать время задержки. Прибор рассчитан на 350 Вт проходящей непрерывной мощности, его масса 1,3 кг.

#### ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СПИРАЛЬНЫЕ УЛЗ

Компания ELMEC выпускает высокоскоростные УЛЗ серии VDS с временем задержки до 30 нс. Они представляют собой спиральные ЛЗ с 20-ю отводами, а задержка регулируется перемещением скользящего по отводам контакта, приводимого движком на верхней крышке ЛЗ (рис. 7а). Подвижный контакт может касаться одного отвода или замыкать два соседних, поэтому всего возможны 40 значений времени задержки.



▲ Рис. 7. Регулируемая ЛЗ серии VDS компании ELMEC (а) и схема ее включения (б)

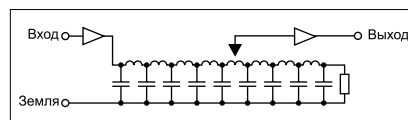
Схема включения ЛЗ этой серии показана на рис. 7б. Входной радиочастотный сигнал от источника с внутренним сопротивлением  $r$  подается на скользящий контакт через согласующий резистор  $R_{in}$ . Один конец ЛЗ согласуется с помощью встроенного резистора  $R_0$ , а другой с помощью внешней нагрузки с активным сопротивлением  $R$ . Для согласования радиочастотной линии должно выполняться условие  $2(r + R_{in}) = Z_0 = R$ , где  $Z_0$  — волновое сопротивление ЛЗ, которое в зависимости от конкретной модели может составлять 100 или 200 Ом.

Наибольшее время задержки 30 нс имеет модель VDS3110. Ее входное сопротивление 50 Ом, волновое сопротивление и сопротивление нагрузки

по 100 Ом, длительность фронта импульса 4 нс, допустимое постоянное входное напряжение 3 В.

ЛЗ этой серии могут работать как с аналоговыми, так и с цифровыми сигналами стандартов ЭСЛ, ТТЛ и КМОП. Диапазон рабочих температур составляет  $-10...+80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Гарантируется сохранение работоспособности УЛЗ после 100 перемещений движка из одного крайнего положения в другое. Компоненты выпускаются в DIP-корпусах размером 22,5×9,8×5,9 мм.

Компоненты серии DDU37F компании Data Delay Devices представляют собой УЛЗ с сосредоточенными параметрами и буферными усилителями на входе и выходе (рис. 8), они предназначены для работы с цифровыми сигналами стандарта ТТЛ. Время задержки регулируется перемещением скользящего контакта по виткам спиральной ЛЗ, для привода контакта используется многооборотная механическая винтовая передача. Для перемещения контакта из одного крайнего положения в другое требуется 40 оборотов винта.



▲ Рис. 8. Схема активной спиральной УЛЗ компании Data Delay Devices

Серия DDU37F представлена 11-ю моделями ЛЗ с диапазоном изменения времени задержки 15–170 нс с погрешностью установки 0,12 нс. Компоненты потребляют мощность 230 мВт от источника питания напряжением 5 В. Волновое сопротивление УЛЗ изготовителем не приводится, поскольку согласование выполнено на уровне буферных каскадов. Коммерческие изделия имеют диапазон рабочих температур  $0...70 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для военного применения  $-55...+125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температурная зависимость времени задержки не более 100 ppm/°C. УЛЗ этой серии выпускаются в корпусах размером 44,5×14,4×7,2 мм.

#### ДИСКРЕТНО ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ УЛЗ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Наиболее простое решение дискретного ручного управления временем задержки предлагает компания API Technologies. Оно представляет собой несколько коаксиальных линий с фиксированной задержкой, коммутируемых с помощью механического переключателя (рис. 9). По согласованию с заказчиком в этих УЛЗ используется полужесткий кабель диаметром 1,04–6,35 мм и соединители SMA, N или TNC. Диапазон рабочих частот составляет от постоянного тока



▲ **Рис. 9.** Переключаемая ЛЗ компании API Technologies

до 6 ГГц, значения задержек задаются в диапазоне 1–250 нс, вносимые потери составляют 0,2–50 дБ. Температурная зависимость времени задержки 0,25 ppm/°C, термостатирование прибора позволяет снизить это значение до 0,001 ppm/°C. Диапазон рабочих температур составляет –20...+100 °C.

Компания Data Delay Devices выпускает серию 3D9950 коммутируемых переключателями восьмиразрядных коаксиальных УЛЗ для диапазона частот от постоянного тока до 125 МГц с неравномерностью АЧХ не более 0,2 дБ. В серии шесть приборов, они имеют варианты изменения задержки: 63,75 нс (с дискретом 0,25 нс) 127,5 нс (с дискретом 0,5 нс) и 255 нс (с дискретом 1 нс) для волнового сопротивления 50 и 75 Ом. Приборы выпускаются в корпусе размером 216×203×51 мм с соединителями типа BNC (рис. 10).



▲ **Рис. 10.** Коммутируемая переключателями коаксиальная УЛЗ серии 3D9950 от Data Delay Devices

### УЛЗ ДЛЯ ВИДЕОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Для задержки видеоимпульсных сигналов могут использоваться любые ЛЗ, имеющие связь по постоянному току для радиочастотного входа и постоянное ГВЗ в рабочей полосе частот, что необходимо для сохранения формы сигнала. Некоторые производители выделяют ЛЗ видеоимпульсных сигналов в отдельную группу. Например, компания Allen Avionics предлагает ряд моделей видеоимпульсных УЛЗ с различными параметрами и вариантами управления. Как правило, все они имеют волновое сопротивление 75 Ом, допустимое на-

пряжение сигнала 100 В, оснащены соединителями типа BNC.

Наибольший диапазон регулировки времени задержки до 640 нс имеет модель VAR640 этой фирмы (рис. 11). Расположенные на лицевой панели семь тумблеров позволяют менять задержку от 0 до 635 нс с шагом 5 нс, кроме того есть возможность плавного изменения задержки на 5 нс. Полоса пропускания прибора 0–5,5 МГц с неравномерностью не более 0,5 дБ, потери на частоте 100 кГц не более 0,8 дБ, волновое сопротивление 75 Ом, размеры 119×94×52 мм.



▲ **Рис. 11.** Коммутируемая переключателями УЛЗ модели VAR640 от Allen Avionics

Модели AV-397 и 75–2A этой фирмы имеют одинаковые электрические параметры: волновое сопротивление 75 Ом, максимальное время задержки 2,075 мкс с шагом изменения 25 нс, диапазон рабочих частот 0–5 МГц. Время задержки устанавливается с помощью семи тумблеров. Отличие этих ЛЗ в том, что AV-397 двухканальная.

Видеоимпульсная ЛЗ модели VRM1100 от Allen Avionics (рис. 12) обеспечивает максимальную задержку



▲ **Рис. 12.** УЛЗ модели VRM1100 компании Allen Avionics для видеоимпульсного сигнала частотой до 5,5 МГц, управляемая поворотными переключателями

1,1 мкс с шагом 10 нс, которая устанавливается с помощью двух поворотных переключателей. Рабочая полоса частот этой ЛЗ составляет 0–5,5 МГц.

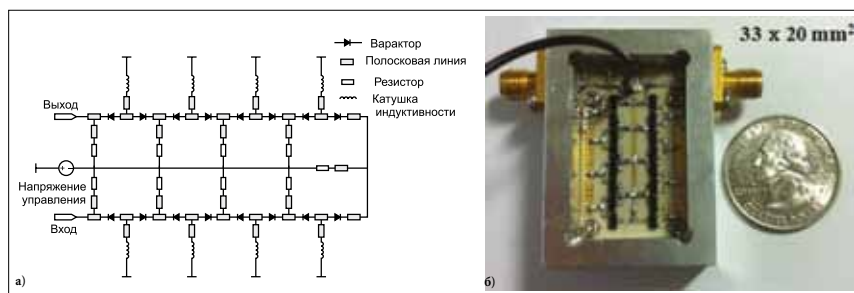
### ЛЗ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рынок УЛЗ, управляемых аналоговым напряжением, очень ограничен. Промышленных образцов таких изделий не обнаружено.

Технологии УЛЗ с цифровым управлением времени задержки хорошо отработаны и на рынке предлагается много таких изделий и в компонентном, и в приборном исполнении. ЛЗ с цифровым управлением чаще всего используют принцип коммутации фиксированных ЛЗ электронными переключателями, управляемыми цифровым кодом. В качестве фиксированных ЛЗ для аналоговых сигналов используются полосковые линии или линии с сосредоточенными параметрами, а для цифровых — цепочки последовательно соединенных элементарных логических ячеек с определенным временем переключения. В качестве электронных переключателей аналогового сигнала используются PIN-диоды и полевые транзисторы на основе GaAs, а цифровые сигналы коммутируются логическими элементами. Из-за наличия полупроводниковых переключателей в радиочастотном тракте эти компоненты имеют пониженный уровень допустимой проходной мощности сигнала по сравнению с моделями, имеющими механическое или электромеханическое управление.

### ЛЗ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА С АНАЛОГОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В [4] опубликованы (рис. 13) результаты исследования экспериментального образца УЛЗ для радиочастотного сигнала с частотой 250 МГц, в которой при помощи аналогового управляющего напряжения групповое время задержки варьируется на 8 нс. УЛЗ состоит из восьми одинаковых ячеек, каждая из которых содержит как сосредоточенные, так и полосковые элементы. Перестраивается ЛЗ постоянным напряжением, подаваемым на варакторы. В диапазоне управляющего напряжения в пределах 0–10 В вносимые потери составляли



▲ **Рис. 13.** Схема (а) и конструкция (б) УЛЗ для радиоимпульсного сигнала с аналоговым управлением

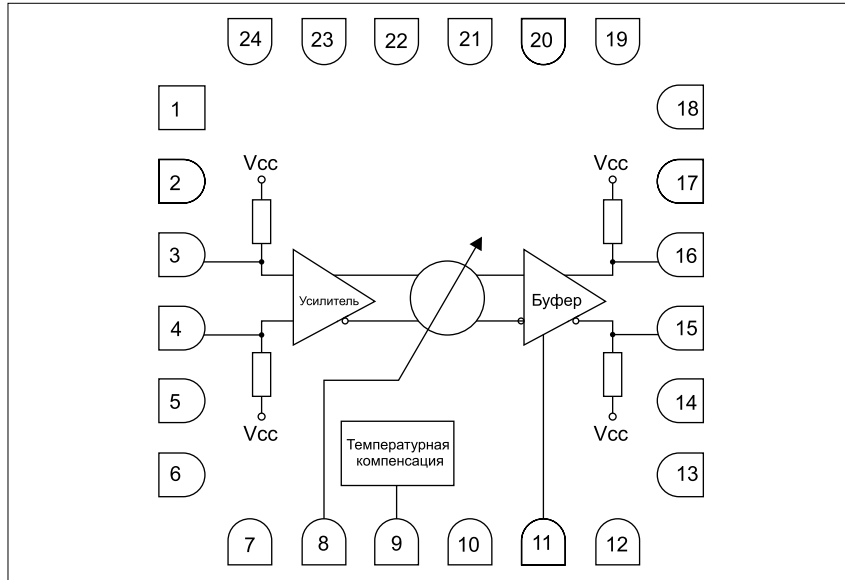
4,5 дБ. Конструктивно разработанная УЛЗ размещена на печатной плате размером 33×20 мм.

### ЛЗ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА С АНАЛОГОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

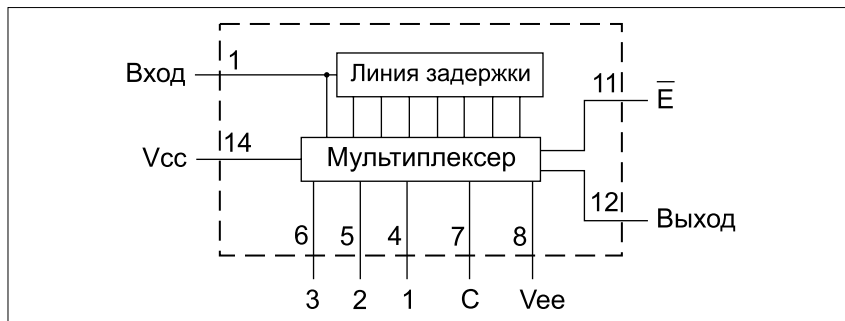
Компания Analog Devices производит несколько микросхем для плавно регулируемой задержки низкоуровневого цифрового сигнала, в частности, моде-

ли НМС910 и НМС911. Интегральная схема НМС910 (рис. 14) является широкополосной УЛЗ с плавно изменяемым до 70 пс временем задержки. Полоса пропускания по радиочастотному входу от постоянного тока до 24 ГГц. Входной сигнал может быть однополярным или дифференциальным, но его уровень должен превосходить порог чувствительности входного каскада. Вход управления

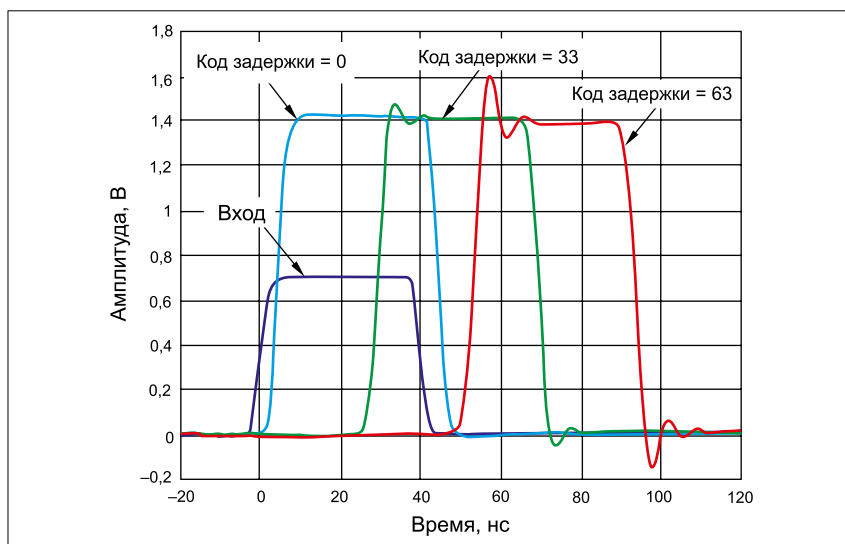
может использоваться для фазовой модуляции выходного сигнала с полосой частот модуляции до 10 МГц. Выходной сигнал микросхемы дифференциальный, его уровень может регулироваться в пределах 170–760 мВ аналоговым напряжением на специальном выводе микросхемы; предусмотрен также вывод разрешения передачи выходного сигнала. Входы и выходы микросхемы согласованы на сопротивление 50 Ом, она питается напряжением 3,3 В и потребляет ток около 500 мА, диапазон рабочих температур –40...+70 °С, выпускается в керамическом SMT-корпусе размером 4×4 мм. Микросхема НМС911 отличается дифференциальным входом управления с полосой пропускания 1,6 ГГц.



▲ Рис. 14. Структурная схема УЛЗ модели НМС910 от Analog Devices



▲ Рис. 15. Структурная схема управляемой ЛЗ серии PADL-1-XX от EC2



▲ Рис. 16. Форма импульса на выходе микросхемы модели AD8120 от Analog Devices при разных значениях кода задержки

### ЛЗ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Компания Engineered Components Company (EC2) предлагает серию PADL-1 программируемых ЛЗ аналогового сигнала. Серия насчитывает десять моделей с вариацией времени задержки от 3,5 (шаг 0,5 нс, полоса частот до 45 МГц) до 35 нс (шаг 5,0 нс, полоса частот до 10 МГц). ЛЗ управляется трехразрядным ТТЛ-кодом, поэтому всего возможны восемь эквидистантных значений времени задержки. Для управления ЛЗ также используются синхросигнал, записывающий в регистр сигналы управления временем задержки, и инверсный сигнал разрешения выхода (рис. 15). Классифицирующим параметром является временная дискрет, его значение в наносекундах указывается в наименовании конкретной модели. В конструкции используется многоотводная ЛЗ, выходные сигналы которой коммутируются мультиплексором в соответствии с управляющим кодом. Входное сопротивление ЛЗ составляет 100 Ом, выходное 170 Ом. Неконтролируемая минимальная задержка составляет 1 нс для всех моделей этой серии. Температурный коэффициент времени задержки не более 100 ppm/°С. Для питания ЛЗ необходимы два источника с напряжениями +5 и –5 В. Диапазон рабочих температур составляет –40...+85 °С, ЛЗ выпускаются в DIP-корпусе размером 20,3×10,2×6,1 мм.

Микросхема AD8120 от Analog Devices представляет собой трехканальную аналоговую ЛЗ, предназначенную для выравнивания по времени телевизионных RGB-видеосигналов, управляемую по интерфейсам SPI, I<sup>2</sup>C или аналоговым напряжением. В последнем случае управляющее напряжение преобразуется в цифровой код с помощью встроенного АЦП. Микросхема допускает независимую регулировку задержки отдельно по каналам в пределах 50 нс с 64 дискре-

тами по 0,8 нс. Входное сопротивление каналов 500 кОм, коэффициент передачи равен 2, что удобно для работы с согласованными линиями, максимальный размах входного сигнала составляет  $\pm 3,25$  В. Принципы регулировки задержки сигнала производителем не раскрываются. При увеличении кода времени задержки с 0 до 63 полоса пропускания канала уменьшается с 200 до 150 МГц, а на фронте и спаде задержанных прямоугольных сигналов появляются выбросы (рис. 16). Микросхема питается напряжениями +5 и -5 В, диапазон рабочих температур  $-40...+85$  °С, она выпускается в 32-выводном корпусе LFCSP размером 5×5 мм.

Аналогичные по назначению микросхемы моделей ISL59920, ISL59921, ISL59922 и ISL59923 выпускает компания Intersil. Они обеспечивают задержку соответственно 30, 31, 46,5, и 62 нс с 32 дискретами. Микросхемы выпускаются в 20-выводном корпусе QFN.

Китайская компания Chengdu Ganide Technology предлагает для создания управляемой цифровым кодом задержки СВЧ-сигналов бескорпусные микросхемы моделей GMM0192 и GMM0983. Микросхема GMM0192 управляется 6-разрядным ТТЛ-кодом; диапазон изменения задержки 315 пс с шагом 5 пс; диапазон рабочих частот составляет от 2 до 18 ГГц; вносимые потери не более 23 дБ; КСВН не более 1,6. Микросхема GMM0983 управляется 5-разрядным ТТЛ-кодом; диапазон изменения задержки составляет 310 пс с дискретом 10 пс; диапазон рабочих частот от 6 до 18 ГГц; КСВН не более 1,4; вносимые потери

4 дБ. Обе микросхемы допускают довольно большую мощность входного СВЧ-сигнала, составляющую 25 дБм.

Компания ENGIN-IC предлагает интегральную схему, ориентированную на применение в фазированных антенных решетках диапазона VHF (50–330 МГц). Эта микросхема содержит управляемую 8-разрядным кодом УЛЗ и управляемый 5-разрядным кодом аттенуатор. Время задержки может меняться до 1 нс с шагом 4 пс.

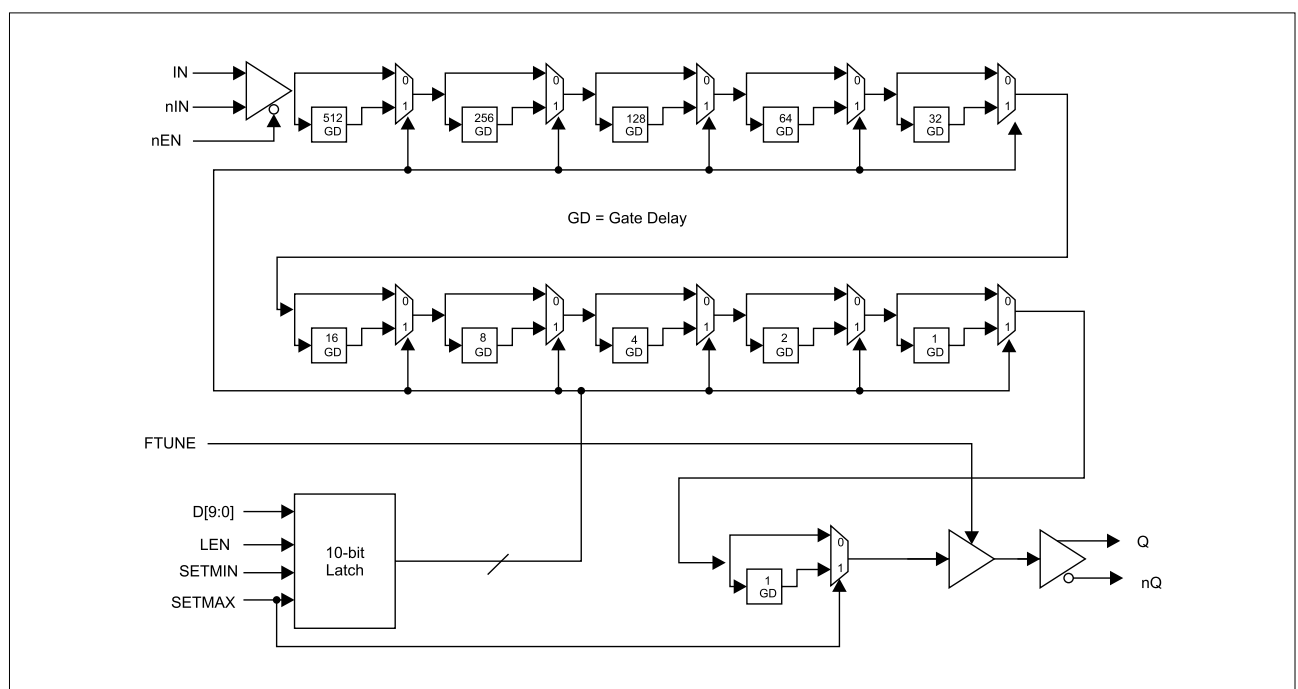
#### УЛЗ ДЛЯ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Принцип цифрового управления временем задержки наглядно виден на примере структурной схемы микросхемы модели 854S296I-33 компании Integrated Device Technology (IDT) (рис. 17). Эта микросхема управляется десятиразрядным кодом и позволяет менять время задержки от 2,2 до 12,5 нс с шагом 10 пс для входного сигнала с максимальной частотой до 1,2 ГГц. Входной сигнал последовательно проходит десять управляемых ячеек, каждая из которых содержит фиксированную ЛЗ с определенной задержкой и мультиплексор, на который подаются задержанный и входной сигналы. Сигнал «лог. 0» на управляющем входе мультиплексора передает на выход ячейки ее входной сигнал без задержки, а «лог. 1» передает задержанный сигнал. Задержки ячеек пропорциональны  $2^n$ , где номер ячейки  $n$  принимает в данном случае значения от 0 до 9. Фиксированные ЛЗ создаются последовательным включением элементарных логических элементов с заданным временем задержки

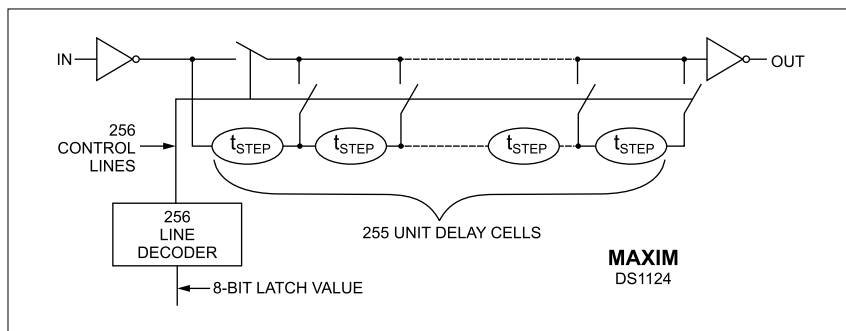
срабатывания, в данном случае 10 пс. Мультиплексорами управляет параллельный десятиразрядный выходной код регистра-защелки, формируемый из последовательного входного кода. Микросхема работает с двухуровневыми низковольтными дифференциальными сигналами стандарта LVDS (Low-Voltage Differential Signaling), но может воспринимать сигналы стандартов ТТЛ или КМОП. Напряжение питания микросхемы 3,3 В, диапазон рабочих температур  $-40...+85$  °С, она выпускается в 32-выводном корпусе VFQFN размером 5×5 мм.

Аналогичные микросхемы цифровых ЛЗ выпускает компания ON Semiconductor. Микросхемы MC10E195 и MC100E195 этой фирмы предназначены для работы с сигналами только стандарта ЭСЛ. Они управляются семиразрядным кодом и имеют диапазон изменения задержки 2,24 мкс с шагом 17,5 нс, диапазон рабочих частот до 1 ГГц. Диапазон программируемой задержки меняется от 2,175 нс при температуре  $-40$  °С до 2,58 нс при 85 °С. Напряжение питания микросхем 5 В при токе потребления 50 мА, температурный диапазон  $-40...+85$  °С, корпус PLCC-28 размером 12×12 мм.

Микросхемы моделей MC10EP195 и MC100EP195 от ON Semiconductor представляют собой управляемые десятиразрядным кодом УЛЗ с диапазоном изменения времени задержки 10,2 нс и шагом 10 пс. Микросхемы могут работать как с дифференциальными, так и с однополярными входными сигналами стандартов ЭСЛ, НВ ТТЛ и НВ КМОП с частотой до 1,2 ГГц. Они требуют напря-



▲ Рис. 17. Структурная схема цифровой УЛЗ 854S296I-33 компании Integrated Device Technology



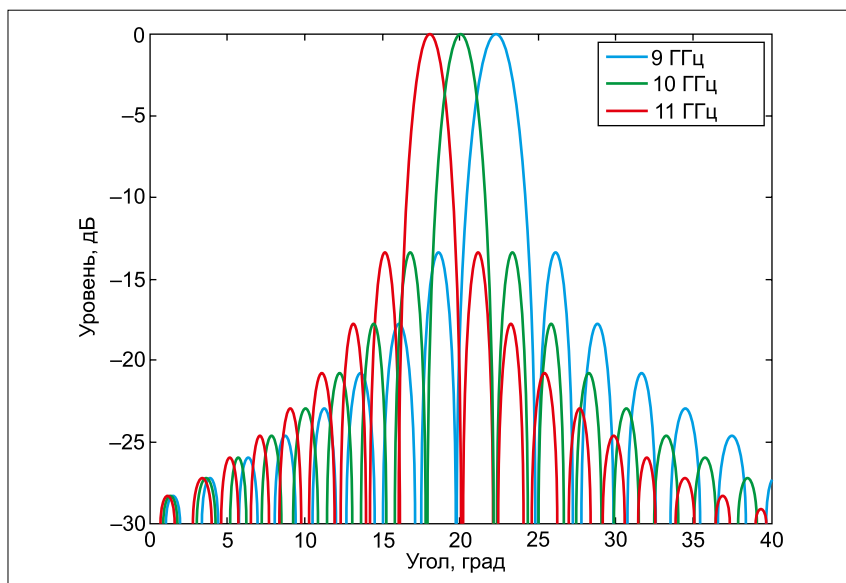
▲ Рис. 18. Структурная схема управляемой цифровой ЛЗ DS1124 компании Maxim

жения питания 3,3 В при токе потребления 150 мА, размещены в корпусах LQFP размером 7×7 мм или QFN размером 5×5 мм, диапазон рабочих температур составляет -40...+85 °С. Диапазон программируемой задержки меняется от 9,45 нс при -40 °С до 10,95 нс при 85 °С. Дальнейшим развитием этой серии стала микросхема модели MC100EP196. Она не только имеет аналогичные возможности цифрового управления задержкой, но дополнительно позволяет плавно менять ее в пределах 60 пс изменением аналогового напряжения на специальном входе.

В микросхеме DS1124 компании Maxim используется многоотводная цифровая линия задержки (рис. 18), состоящая из 255 ячеек с задержкой 0,25 нс, соответственно весь диапазон регулировки составляет 63,75 нс. Задержка управляется восьмизрядным кодом по интерфейсу SPI, на выходной буфер микросхемы подается сигнал с вывода многоотводной линии, определяемого управляющим кодом. Максимальная частота входного КМОП- или ТТЛ-сигнала 10 МГц, напряжение питания 5 В, температурный диапазон -40...+85 °С, корпус 10-выводный μSOP.

Одну из наиболее быстродействующих УЛЗ для цифровых сигналов производит компания Analog Devices. Микросхема HMC856 способна задерживать дифференциальные входные сигналы стандарта CML со скоростью до 28 Гбит/с на время до 93 пс с шагом 3 пс. Сигнальные входы и выходы имеют сопротивление 50 Ом, входы управления 600 Ом. Микросхема управляется параллельным пятиразрядным кодом, потребляет 610 мВт от источника питания напряжением -3,3 В, размещена в 32-выводном корпусе LCC размером 5×5 мм.

Компания Data Delay Devices предлагает серию 3D3424 четырехканальных цифровых ЛЗ КМОП-сигналов с четырехразрядным управлением. Она включает 13 моделей микросхем, обеспечивающих диапазон изменения задержки от 15 нс (шаг 1 нс, частота входного сигнала до 166 МГц) до 4500 нс (шаг 300 нс, частота входного сигнала до 1,1 МГц). Каналы управляются независимо друг от друга и могут включаться последовательно для увеличения суммарной задержки. Микросхемы используют напряжение питания 3,3 В, диапазон рабочих температур -40...+85 °С, выпускаются в корпусах SOIC-14.



▲ Рис. 19. Смещение диаграммы направленности ФАР, выполненной на основе УФв, при изменении рабочей частоты

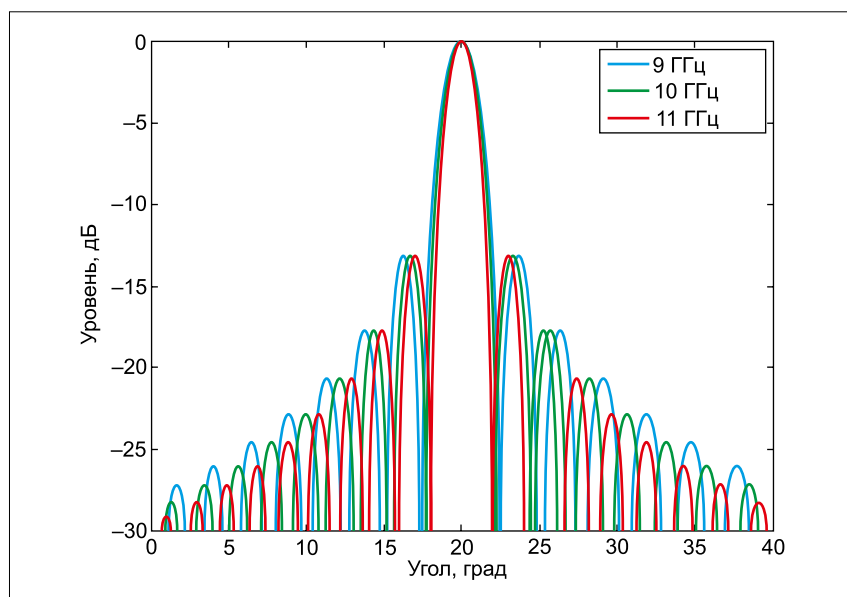
Некоторые фирмы предпочитают использовать для задержки цифровых сигналов многоотводные ЛЗ с распределенными параметрами. Как правило, у таких УЛЗ число отводов составляет 8 или 16, соответственно для управления задержкой используются 3- или 4-разрядные коды. В качестве примера можно привести серию 90А активных программируемых ЛЗ компании Allen Avionics. Серия содержит 20 микросхем, управляемых 4-разрядным кодом и имеющих диапазон изменения задержки от 15 нс (шаг 1 нс) до 1500 нс (шаг 100 нс) с точностью ±5%. Микросхемы предназначены для работы с ТТЛ-сигналами, напряжение их питания 5 В, выпускаются в корпусах размером 44,5×10,6 мм.

Компания EC2 выпускает аналогичную серию PFLDL-TTL 4-разрядных программируемых ЛЗ, насчитывающую 24 микросхемы с временем задержки от 7,5 нс (шаг 0,5 нс) до 1500 нс (шаг 100 нс). Микросхемы этой серии предназначены для работы с сигналами стандарта ТТЛ, питаются от источника напряжением 5 В, выпускаются в корпусах размером 32,3×10,2 мм.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЗ В ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

Не вдаваясь в тонкости построения фазированных антенных решеток (ФАР), отметим лишь, что их диаграмма направленности формируется за счет управления амплитудой и фазой излучаемых ячейками ФАР сигналов. Для управления фазой радиочастотного сигнала можно использовать как УЛЗ, так и фазовращатели (УФв), способные поддерживать заданный фазовый сдвиг в рабочей полосе частот. При изменении рабочей частоты для ФАР, выполненной на основе УФв, ее диаграмма направленности (ДН) смещается (рис. 19). Если же ФАР выполнена на основе УЛЗ (рис. 20), то основной лепесток остается на прежнем месте, а изменяется лишь расположение симметричных боковых лепестков.

Изменение положения главного лепестка диаграммы направленности ФАР, выполненной на основе УФв, при вариации рабочей частоты хорошо известно и используется для частотного сканирования. Обычно диаграмма направленности ФАР рассчитывается для монохроматического сигнала, в то время как реальный радиолокационный сигнал имеет достаточно широкий спектр. Для монохроматического сигнала, действительно, не имеет значения, какое использовано устройство управления — на основе УФв или УЛЗ. В случае широкополосного сигнала различие фазовых характеристик этих приборов приводит к искажению диаграммы.



▲ **Рис. 20.** Масштабирование диаграммы направленности ФАР, выполненной на основе УЛЗ, при изменении рабочей частоты

Для реального локационного сигнала применение ФВ приводит к расширению основного лепестка и увеличению уровня боковых лепестков ДН ФАР, а в случае использования ЛЗ такая проблема не возникает. Основным требованием к УЛЗ, применяемым в составе ФАР, следует слабую зависимость группового времени задержки от частоты. В зарубежной литературе подобные УЛЗ обозначаются термином TTD (True Time Delay) — «настоящие линии задержки» [6].

#### ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

К программируемым относятся ЛЗ в инструментальном исполнении, которые могут управляться компьютером или другим вычислительным устройством по определенному интерфейсу. Среди программируемых УЛЗ типа TTD есть класс приборов с преобразованием электрического сигнала в оптический и обратно. Благодаря низкому затуханию оптических сигналов в оптоволокне программируемые оптические ЛЗ позволяют получить на длинных отрезках оптоволокна большие времена задержки, недостижимые другими методами.

#### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УЛЗ С ПЛАВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ

В этом классе программируемых УЛЗ с плавной перестройкой используется изменение физической длины коаксиальной воздушной линии передачи с помощью прецизионного механического привода и шагового двигателя с электронной системой управления. Эти двигатели позволяют менять длину линии передачи и соответственно время задержки с очень малым шагом, т. е. практически непрерывно. К недостаткам таких систем сле-

дует отнести инерционность управления: длительность процесса переключения достигает единиц и даже десятков секунд.

Компания SHF выпускает tromбонную УЛЗ модели 2000 DEL с моторизованным управлением. Диапазон изменения времени задержки составляет 160 пс с шагом 1 пс и погрешностью установки не более 0,4 пс. Волновое сопротивление составляет 50 Ом, максимальный уровень сигнала 10 дБм, вносимые потери не более 2,2 дБ на частоте 20 ГГц. Управление прибором производится кнопками на лицевой панели прибора, или компьютером по интерфейсу GPIB. Положение tromбона контролируется прецизионным линейным потенциометром. Использование его выходного напряжения в цепи отрицательной обратной связи системы управления позволяет устранить возможный механический люфт привода. Прибор имеет размеры 472×110×365 мм, его вес 9,5 кг.

Компания Waka выпускает две модели широкополосных ЛЗ с прецизионной механической регулировкой длины линии с помощью шагового двигателя. Модель 01X0556-00 (рис. 21) с соединителями 2.92mm имеет рабочую полосу частот 0–40 ГГц, КСВН 1,3 и потери 1,3 дБ. Для



▲ **Рис. 21.** Моторизованная ЛЗ модели 01X0557-00 компании Waka

модели 01X0556-00 с соединителями 1.85mm полоса частот достигает 60 ГГц, КСВН 1,4 и потери 3 дБ. Диапазон изменения времени задержки составляет

140 пс с шагом 0,00666 пс. Управляются ЛЗ с помощью специального приложения для Windows.

Фирма Colby Instruments выпускает моторизованные tromбонные линии задержки PDL-100A и PDL-200A. В этих моделях используются сдвоенные tromбонные механизмы (рис. 22), каждый из которых обеспечивает изменение времени задержки до 312,5 пс при по-



▲ **Рис. 22.** Механизм сдвоенной tromбонной ЛЗ модели PDL-200A компании Colby Instruments

лосе пропускания до 18 ГГц. Они последовательно соединяются на лицевой панели прибора полужестким кабелем. В приборе достижима суммарная задержка 625 пс с погрешностью установки не более 0,5 пс. Механическая система управляется шаговым двигателем, время настройки не более 1,5 с. Межсервисный интервал составляет 500 тыс. циклов перемещения. Модель PDL-100A содержит один сдвоенный tromбон с задержкой до 625 пс. Модель PDL-200A содержит два сдвоенных tromбона в одном корпусе, в случае их последовательного соединения задержка возрастает до 1,25 нс. ЛЗ управляются с помощью интерфейсов IEEE-488.2, Ethernet TCP/IP, RS-232 или специализированным микротерминалом MT-100A.

#### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЛЗ С ДИСКРЕТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ

Принцип коммутации отдельных линий с кратными значениями задержки по своей сути цифровой. Он позволяет получить большой диапазон изменения времени задержки, но не с непрерывными, а с дискретными значениями. Поскольку ЛЗ используются для ВЧ- и СВЧ-сигналов, в них применяются высокочастотные реле, в том числе и коаксиальные. Эти ЛЗ менее инерционны по сравнению с моторизованными, время их переключения может составлять от единиц до десятков миллисекунд.

В качестве примера коммутруемой с помощью реле ЛЗ можно привести модель CPDL-100A фирмы Colby Instruments (рис. 23). Производитель может изготовить коммутруемую линию задержки с необходимыми заказчику параметрами при условии, что шаг по времени задержки должен быть не менее 10 пс и суммарная задержка не более 200 нс. Верхнее значение рабочей частоты составляет 18 ГГц, точность установки времени задержки 0,5 пс, средняя мощность сигнала 10 Вт,



▲ **Рис. 23.** ЛЗ с релейной коммутацией модели CPDL-100A производства Colby Instruments

пиковая 50 Вт. Механический ресурс составляет 500 тыс. переключений, время срабатывания 50 мс. Управляется прибор по интерфейсам IEEE 488.2, Ethernet TCP/IP, RS-232 или микротерминалом MT-100A.

Аналогичную по параметрам УЛЗ модели 8001 предлагает компания Dow-Key Microwave.

#### ПРОГРАММИРУЕМЫЕ УЛЗ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В этом классе приборов задержка формируется с шагом, определяемым разрядностью кода управления. Но у некоторых ЛЗ разрядность управляющего кода достигает 10, и в этом случае шаг перестройки составляет менее 0,001 от полного диапазона изменения времени задержки. Программируемые УЛЗ с электронным управлением используют те же принципы работы, что и описанные выше управляемые ЛЗ. Исключением являются ЛЗ с преобразованием электрического сигнала в оптический и обратно. Предлагаемые рынком программируемые оптические ЛЗ позволяют получать до 8 их значений.

#### ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛЗ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА

Фирма GigaBaudics выпускает несколько моделей измерительных программируемых ЛЗ аналогового сигнала. Конструктивно они представляют собой несколько последовательно включенных фиксированных ЛЗ с кратными временами задержки, коммутируемых GaAs-переключателями в соответствии с управляющим кодом. Модель PADL6 (рис. 24) имеет диапазон рабочих частот 0–6 ГГц с неравномерностью не более  $\pm 1,4$  дБ, КСВН не более 1,5, диапазон изменения задержки 635 пс с шагом 5 пс, уровень входного сигнала при компрессии 1 дБ составляет 24 дБм, волновое сопротивление 50 Ом. На корпусе размером 69,1×44,5×15,2 мм установлены соединители SMA для входного и выход-



▲ **Рис. 24.** Программируемая УЛЗ модели PADL-6 для аналогового сигнала с частотой до 6 ГГц от GigaBaudics

ного сигналов и многотырьковый соединитель типа D для подачи напряжения питания 5 В и 7-разрядного TTL-сигнала управления.

Для модели PADL6 от GigaBaudics диапазон частот не превышает 3 ГГц, но она управляется 10-разрядным кодом. Шаг изменения времени задержки может составлять 5, 10 или 20 пс, диапазон изменения задержки может достигать 20,46 нс. У этой модели КСВН не более 1,5, вносимые потери не более 7,5 дБ.

Компания GigaBaudics выпускает также четырехканальные измерительные УЛЗ: 7-разрядную QPADL6 (рис. 25) с диапазоном частот до 6 ГГц и шагом 5 пс (диапазон изменения задержки до 635 нс) и 10-разрядную QPADL3 с диапазоном частот до 3 ГГц и шагом 5 или 10 пс по согласованию с заказчиком (диапазон изменения задержки до 10,23 нс). Каналы этих ЛЗ управляются TTL-кодом независимо друг от друга и могут соединяться последовательно для увеличения суммарной задержки.

Компания MTS Systemtechnik предлагает две модели управляемых ЛЗ:



▲ **Рис. 25.** Четырехканальная УЛЗ модели QPADL6 от GigaBaudics

модели DL1-544, имеющую диапазон рабочих частот 0,5–6 ГГц и диапазон перестройки 640 пс и модели DL1-544-1600PS с диапазоном частот 0,5–5 ГГц и диапазоном перестройки 1600 пс (рис. 26). У обеих УЛЗ шаг перестройки составляет 5 пс, волновое сопротивление 50 Ом, входная мощность не менее 33 дБм, диапазон температур –40...+85 °С. Линии управляются параллельным TTL-кодом, для коммутации используются GaAs-переключатели.



▲ **Рис. 26.** Программируемая ЛЗ DL1-544-1600PS компании MTS Systemtechnik

Четырехканальную программируемую ЛЗ модели QDLL предлагает компания Becker Nachrichtentechnik (рис. 27). Диапазон изменения задержки в независимых каналах составляет 1700 пс с шагом 5 пс, диапазон рабочих частот 0,25–4 ГГц, волновое сопротивление 50 Ом. Межканальная изоляция не хуже 90 дБ, максимальная мощность сигнала 32 дБм. Прибор управляется по интерфейсам USB, LAN или IEEE488.



▲ **Рис. 27.** Четырехканальная программируемая ЛЗ QDLL компании Becker Nachrichtentechnik

В качестве примера прецизионной программируемой измерительной УЛЗ с широким диапазоном изменения параметров можно привести модель PDM-100A от компании Colby Instruments. Прибор позволяет менять время задержки в пределах 5,12 нс с шагом 1 пс для сигналов в полосе частот 0,1–3 ГГц. Конструктивно он состоит из трех модулей (P1, P2 и P3 на рис. 28), каждый из которых содержит коммутируемые PIN-диодами полосковые ЛЗ. Модуль P1 управляется четырехразрядным кодом и обеспечивает задержку до 15 пс с шагом 1 пс, модуль P2 управляется восьмиразрядным кодом и формирует задержку до 1275 пс с шагом 5 пс,



▲ **Рис. 28.** Устройство (а) и внешний вид (б) программируемой УЛЗ модели PDM-100A от компании Colby Instruments

модуль P3 управляется двухрядным кодом и формирует задержку до 3,84 нс с шагом 1,28 нс. Входные и выходные SMA-соединители каждого модуля выведены на лицевую панель прибора, что позволяет использовать модули как раздельно, так и совместно. Управляется прибор с помощью микротерминала MT-100 А.

### ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛЗ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

Одним из лидеров производства измерительных программируемых ЛЗ для цифровых сигналов является компания GigaBaudics, которая выпускает четыре модели программируемых ЛЗ для сигналов стандарта ЭСЛ. Наиболее высокое быстродействие, до 10 Гбит/с, имеют однока-



▲ **Рис. 29.** Одноканальная программируемая ЛЗ цифровых сигналов модели PDDL10 производства GigaBaudics

нальная ЛЗ PDDL10 (рис. 29) и четырехканальная QPDDL10. Эти ЛЗ управляются семиразрядным TTL-кодом, позволяют установить 128 значений задержки с шагом 5 пс, вносимый джиттер не более 10 пс, входное и выходное сопротивление 50 Ом.

Одноканальная УЛЗ модели PDDL5 и четырехканальная модели QPDDL5 (рис. 30) имеют быстродействие по входу управления до 5 Гбит/с, они управляются десятиразрядным кодом и позволяют установить 1024 значений задержки. По согласованию с заказчиком шаг задержки в модели PDDL5 может быть 5, 10 или 20 пс, в модели QPDDL5 он может быть установлен 5 или 10 пс. Среднее квадратическое значение вносимого дрожания переднего фронта выходного импульса (джиттера) не более 10 пс, типовое 5 пс.



▲ **Рис. 30.** Четырехканальная программируемая УЛЗ модели QPDDL5 компании GigaBaudics

### ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УЛЗ

Управляемые ЛЗ с преобразованием электрического сигнала в оптический позволяют реализовать времена задержки, недостижимые для других технологий. Примером может служить УЛЗ серии 3000 компании Eastern OptX, использующая задержку светового сигнала в оптическом волокне. Приборы этой серии позволяют переключать до восьми значений времени задержки, полоса рабочих частот составляет 0,1–18 ГГц, максимальное значение задержки до 500 мкс, погрешность значения задержки до 1%, КСВН не более 2, уровень входного сигнала с компрессией 1 дБ не менее –15 дБм, коэффициент шума 25 дБ, волновое сопротивление 50 Ом, управление возможно по интерфейсам Ethernet, TTL, USB и GPIB. Приборы выпускаются в стандартном 19-дюймовом корпусе, один из приборов этой серии показан на рис. 31. Производитель отмечает, что



▲ **Рис. 31.** Программируемая оптическая УЛЗ серии 3000 от компании Eastern OptX

этот прибор может использоваться для симуляции отраженного радиолокационного сигнала цели.

Аналогичный прибор модели EOX 6000 от компании Eastern OptX предназначен для тестирования радиовысотометров. Он работает в диапазоне частот 4,2–4,4 ГГц и обеспечивает максимальную задержку сигнала, соответствующую высоте 15240 м.

Волоконно-оптические УЛЗ выпускает также компания Microwave Photonic Systems. Прибор модели OPDL-6000-DL-18G (рис. 32) имеет поло-



▲ **Рис. 32.** Программируемая оптическая ЛЗ модели OPDL-6000-DL-18G компании Microwave Photonic Systems

су рабочих частот радиочастотного входа 0,1–10 ГГц, время задержки может достигать 500 мкс. Коммутируемые УЛЗ могут иметь различные значения времени задержки. Если установлено минимальное значение шага по задержке, а остальные его значения кратны ему, то прибор может использоваться как управляемая многоразрядным кодом УЛЗ с большим

временем задержки и малым дискретом его изменения.

Компания RF Optic выпускает несколько моделей программируемых оптических ЛЗ (рис. 33), различающихся полосой рабочих частот. Все модели серии ODL могут переключать до восьми ВОЛС с общим временем задержки до 300 мкс, у наиболее высокочастотной модели полоса рабочих частот составляет 0,1–20 ГГц. ЛЗ вносит затухание 30 дБ, коэффициент шума 40 дБ, точка 1-дБ компрессии составляет 15 дБм.



▲ **Рис. 33.** Программируемая оптическая ЛЗ серии ODL от компании RF Optic

### ИТОГИ

Познакомить читателей со всеми представленными на рынке моделями ЛЗ [3–5] задача невыполнимая. Авторы ставили перед собой более скромную задачу: познакомить читателя с основными технологиями, используемыми для задержки сигналов, их возможностями, достоинствами и недостатками, а также с некоторыми наиболее интересными реализациями этих технологий в конкретных изделиях ведущих игроков рынка ЛЗ. Для дополнительной помощи в табл. обобщены параметры управляемых ЛЗ, упоминаемых в этом обзоре. ■

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Кочемасов, Л. Белов, А. Майстренко. Фиксированные линии задержки//СВЧ Электроника. 2017. № 2, стр. 68–77.
2. В. Кочемасов, Л. Белов, А. Майстренко. Фазовращатели с ручным и электромеханическим управлением//Компоненты и технологии. 2016. № 6, стр. 70–81.
3. В. Кочемасов, А. Майстренко. Фазовращатели на основе МЭМС//Компоненты и технологии. 2016. № 2, стр. 28–32.
4. Park Y.-M., Kim D.-W. Tunable Composite Right/Left-Handed Delay Line with Large Group Delay for an FMCW Radar Transmitter. JOURNAL OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. VOL. 12, № 2, JUN. 2012
5. Longbrake M. True Time-Delay Beamsteering for Radar. Aerospace and Electronics Conference (NAECON). 2012 IEEE National.
6. Leggieri A., Passi D., and Franco P. A true-time-delay networks design technique. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Cambridge University Press and the European Microwave Association. 2014.

Таблица. Параметры управляемых линий задержки

Фирма	Модель, серия	Управление	Диапазон изменения задержки, нс	Рабочая частота, ГГц	Уровень входного сигнала	Особенность
Adsantec	ASNT6170-KMC	A	0,012	0–20	CML	–
Allen Avionics	VAR640	PK	640	0–0,005	–	К
Allen Avionics	90A	4 разр.	1500	–	ТТЛ	К
Allen Avionics	AV-397	PK	2075	0,005	100 В	2 канала
Allen Avionics	75-2A	PK	2075	0,005	100 В	К
Allen Avionics	VRM1100	PK	1100	0,005	100 В	К
Analog Devices	HMC910	A	0,07	0–24	760 мВ	–
Analog Devices	AD8120	A, SPI, I2C	50	0–0,2	1,6 В	3 канала
Analog Devices	HMC856	5 разр.	0,093	28	CML	–
API Technologies	6804	ПУ	0,265	0–8	350 Вт	Т
API Technologies	–	PK	250	0–6	–	К
ARRA	9428T	ПП	0,042	0–18	5 кВт	КВ
Becker Nachrichtentechnik	QDLL	USB, LAN, IEEE488	1,7	0,25–4	32 дБм	4 канала
Chengdu Ganide	GMM0192	5 разр.	0,315	2–18	25 дБм	–
Coaxicom	3993	ПУ	0,028	0–18	–	КВ
Colby Instruments	PDL-100	IEEE-488.2, Ethernet TCP/IP, RS-232	0,625	0–18	–	Т
Colby Instruments	PDL-200A	IEEE-488.2, Ethernet TCP/IP, RS-232	1,25	0–18	–	Т
Colby Instruments	CPDL-100A	IEEE 488.2, Ethernet TCP/IP, RS-232	200	0–18	10 Вт	К
Colby Instruments	PDM-100A	MT-100A	5,12	0,1–3	–	–
Data Delay Devices	DDU37F	ПУ	170	–	ТТЛ	СП
Data Delay Devices	3D9950	PK	255	0–0,125	–	К
Data Delay Devices	3D3424	4 разр.	4500	0,166	КМОП	4 канала
Dow-Key	8001-200A	Ethernet, GPIB, RS-232	200	0–18	10 Вт	–
Eastern OptX	3000	Ethernet, TTL, USB, GPIB	250000	0,1–18	-15 дБм	ВО
EC2	PADL-1	3 разр.	35	0–0,045	–	–
EC2	PFLDL-TTL	4 разр.	1500	–	ТТЛ	–
Elmec Technology	VDS3110	ПУ	30	–	3 В	РП
Elmec Technology	VDA-CS30	PK	30	0,06	КМОП	РП
GigaBaudics	PADL6	7 разр.	0,635	0–6	20 дБм	–
GigaBaudics	PADL3	10 разр.	20,46	0–3	20 дБм	–
GigaBaudics	QPADL6	7 разр.	0,635	0–6	20 дБм	4 канала
GigaBaudics	QPADL3	10 разр.	10,23	0–3	20 дБм	4 канала
GigaBaudics	PDDL10	7 разр.	0,64	10	ЭСЛ	–
GigaBaudics	QPDDL10	7 разр.	0,64	10	ЭСЛ	4 канала
GigaBaudics	PDDL5	10 разр.	20,48	5	ЭСЛ	–
GigaBaudics	QPDDL5	10 разр.	10,24	5	ЭСЛ	4 канала
IDT	854S2961-33	10 разр.	12,5	1,2	LVDS, ТТЛ, КМОП	–
Intersil	ISL59923	5 разр.	62	0,15	1,15 В	3 канала
Maxim	DS1020-200	8 разр.	10–520	0,01	ТТЛ, КМОП	–
Maxim	DS1124	8 разр.	63,75	0,01	ТТЛ, КМОП	–
Microlab FXR	ST-05	ПУ	2	0,25–4,00	100 Вт	Т
Microwave Photonic Systems	OPDL-6000-DL-18G	RS-232	500 000	0,1–10	–	ВО
MTS Systemtechnik	DL1-544	RS-232, LAN, IEEE488, USB	0,64	0,5–6	33 дБм	–
MTS Systemtechnik	DL1-544-1600PS	RS-232, LAN, IEEE488, USB	1,6	0,5–5	33 дБм	–
ON Semiconductor	MC10E195	7 разр.	2,24	1	ЭСЛ	–
ON Semiconductor	MC10EP195	10 разр.	10,2	1,2	ЭСЛ, НВТТЛ, НВКМОП	–
RF Optic	ODL	RS-232, Ethernet	300 000	0,1–20	15 дБм	ВО
RLC Electronics	PSM40	ПУ	0,056	0–40	5 Вт	ВО
SHF	2000 DEL	GPIB	0,16	0–20	–	Т
Spectrum Elektrotechnik	–	ПУ	0,028	0–63	–	КВ
Waka Manufacturing	01X0556-00	Windows	140	0–40	–	Т
Waka Manufacturing	PS32B	A	0,07	16	LVDS	–

Примечание: А — аналоговый сигнал, ВО — волоконно-оптическая; К — коаксиальная; КВ — коаксиальная воздушная; П — программируемая; РП — распределенные параметры; ПУ — ручное управление, РК — ручная коммутация, СП — сосредоточенные параметры; Т — трембон