

УДК 001.891.32

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-1-38-41

Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ С ЕЕ АНАЛОГАМИ НА ПАВ

Г.А. Шарапов, А.И. Крюков

АО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. АКАДЕМИКА А.И. БЕРГА»

В статье приведен сравнительный анализ современных линий задержки на основе волоконной оптики. Приведена оценка характеристик волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ), а также отмечены их преимущества и недостатки относительно аналогов на поверхности – акустических волнах (ПАВ).

Ключевые слова: линия задержки, волоконно-оптическая линия задержки, линия задержки на ПАВ

Линия задержки (ЛЗ) – устройство, предназначенное для задержки электрических или электромагнитных сигналов на заданный промежуток времени. Линии задержки 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. Линии задержки широко применяются в радиолокации и радионавигации, технике связи и в измерительной технике.

Для задержки на заданное время $t_{\text{зад}}$ произвольной последовательности импульсов без существенного изменения их формы применяют линии задержки. Линии задержки, сохраняющие свои параметры даже в сложных условиях эксплуатации, необходимы для применения:

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DELAY LINE BASED ON FIBER OPTICS WITH ITS SURFACTANT'S ANALOGUES

G.A. SHARAPOV, A.I. KRYUKOV

JSC «CENTRAL RESEARCH INSTITUTE
OF RADIO ENGINEERING NAMED AFTER
ACADEMICIAN A.I. BERG»

This article provides a comparative analysis of modern delay lines based on fiber optics. An assessment of fiber-optic delay lines' characteristics was carried out, also their advantages and disadvantages regarding surfactant's analogues was observed.

KEY WORDS: delay line, fiber-optic delay line, delay line on the surfactant

- в контрольно-измерительной аппаратуре для уменьшения «мертвой» зоны области измерения;
- в аппаратуре связи для временного уплотнения передаваемой информации;
- в аппаратуре радиоэлектронной борьбы для формирования сигналов ложной цели.

В общем случае устройство задержки представляет собой четырехполюсник, выходной сигнал которого по форме близок к входному сигналу, но задержан на время $t_{\text{зад}}$ относительно входного. Требования к линиям задержки базируются на общем условии неискажающей задержки сигнала. Четырехполюсник, удовлетворяющий таким требованиям, должен иметь постоянную амплитудно-частотную характеристику $K(\omega)$ и линейную фазо-частотную характеристику $\varphi(\omega)$. Это можно записать как:

$$\begin{cases} K(\omega) = \text{const}, \\ \varphi(\omega) = \omega \times t \end{cases} \quad (1)$$

При выполнении равенств (1) переходная характеристика четырехполюсника выражается запаздывающей ступенчатой функцией:

$$h(t) = K(\omega) \times 1(t - t_{\text{зад}}) \quad (2)$$

При подаче на вход четырехполюсника сигнала $U_{\text{вх}}(t)$ произвольной формы, выходной сигнал $U_{\text{вых}}(t)$ запишется как:

$$h(t) = K(\omega) \times U_{\text{вх}}(t - t_{\text{зад}}) \times 1(t - t_{\text{зад}}). \quad (3)$$

Но реальные четырехполюсники не соответствуют (1) во всем диапазоне частот ($0 \leq \omega \leq \infty$), поэтому ограничиваются выполнением (1) только в полосе частот, охватывающей активную ширину спектра сигнала $U_{\text{вх}}(t)$. Можно определить время задержки четырехполюсника по данным его $\varphi(\omega)$ при какой-нибудь частоте $\omega = \omega_1$. Тогда задержка четырехполюсника будет равна:

$$t_{\text{зад}} = \frac{\varphi(\omega_1)}{\omega_1}, \quad (4)$$

где $\varphi(\omega_1)$ – угол сдвига фаз между гармоническими колебаниями на входе и выходе четырехполюсника. Для задержки электрических импульсов применяют линии задержек следующих типов [5]:

- распределенные (коаксиальные или полосковые);
- с сосредоточенными параметрами (построенные на LC цепочках);
- ультразвуковые (волноводные проволочные, волноводные ленточные, на объемных акустических волнах, на ПАВ);
- электронные цифровые (кремниевые или гибридные);
- волоконно-оптические.

Полосковые линии задержки с погонной индуктивностью L_1 и погонной емкостью C_1 отличаются высокой стабильностью и широкополосностью. Волновое сопротивление такой линии W не зависит от частоты, является чисто активным и определяется только реактивными параметрами линии по формуле [3]:

$$W = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (5)$$

где $L_0 = l \times L_1$ – суммарная индуктивность; $C_0 = l \times C_1$ – суммарная емкость; l – длина линии.

Задержка сигнала $t_{\text{зад}}$ будет определяться по формуле:

$$t_{\text{зад}} = \sqrt{L_0 C_0}. \quad (6)$$

Непрерывным условием работы такой линии задержки является согласование ее сопротивлений на входе и выходе. При импульсных сигналах на входе линии задержки проблема согласования становится непростой из-за наличия на входном и выходном концах линии паразитных емкостей. Рассогласование линии ведет к паразитным переотражениям сигнала от концов линии и искажению передаваемого сигнала.

Другим недостатком такой линии задержки является трудность расчета ее параметров, так как геометрические размеры линии зависят от передаваемой длины волны электрического сигнала [2]. В случае же с импульсными сигналами имеем дело не с одной длиной волны излучения, а целым спектром длин волн.

Коаксиальные линии задержки применяют для задержки электрических сигналов, но при использовании коаксиальной линии задержки, также встает

вопрос о согласовании волнового сопротивления коаксиального кабеля в широкой полосе передаваемых частот. Реактивные параметры кабеля практически не зависят от частоты гармонических колебаний, а активные зависят. Из-за этого затухание сигнала в коаксиальном кабеле, и, следовательно, модуль его коэффициента передачи зависят от частоты сигнала. Затухание сигнала для частоты равной 100 МГц (соответствует длительности фронта импульсов порядка 10 нс) около 0,1 дБ/м [3]. Происходит уменьшение величины выходного импульса и искажение его формы. Исходя из вышесказанного, такие линии задержки целесообразно применять в аппаратуре наносекундного диапазона.

Линии задержки с сосредоточенными параметрами (на LC или RC цепочках) обладают следующими недостатками:

- LC цепочки искажают форму импульсных сигналов;
- RC цепочки приводят к быстрому затуханию сигнала и также искажают форму импульсных сигналов (затягивают фронт).

Ультразвуковые линии задержки также применяются для задержки электрических сигналов. Частотный диапазон таких линий задержки определяется частотными свойствами преобразователей электрических колебаний в акустические, звукопровода и преобразователей акустических колебаний в электрические. Ширина полосы пропускания такой линии задержки существенно зависит от степени согласования акустических волновых сопротивлений звукопровода и преобразователей. Ультразвуковые линии задержки обеспечивают полосу пропускания не более 10 МГц [1] и обеспечивают высокую стабильность времени задержки. Допустимая нестабильность времени задержки $t_{\text{зад}}$ не превышает долей процента, но для этого необходимо применять термостатирование конструкции линии задержки или применять термостабильные сплавы.

Ультразвуковые линии задержки (УЛЗ) на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) и объемных акустических волн (ОАВ) благодаря низкой скорости распространения акустической волны в твердом веществе позволяют при небольших размерах задержать сигнал на единицы и даже десятки микросекунд. В состав ультразвуковой линии задержки 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 как показано на рисунке 1. 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 ультразвуковой линии задержки может использоваться многократное отражение акустических волн от граней звукопровода. В качестве материалов для преобразователей используются такие пьезоэлектрики, как кварц, танталит лития и ниобат лития. УЛЗ имеют ограниченную полосу пропускания и проектируются как полосовые фильтры с постоянным ГВЗ в рабочей полосе частот.

Электронные цифровые линии задержки могут быть выполнены на дискретных элементах (ждущих мультивибраторах), интегральных элементах (гибридных и кремниевых). Наиболее стабильными параметрами из перечисленных обладают кремниевые интегральные линии задержки. Наибольших успехов в их производстве добилась фирма Dallas Semiconductor. Фирма выпускает интегральные кремниевые линии задержки типа DS1000 – DS1045 с временем задержки от 4 нс до 500 нс. Коэффициент нестабильности времени задержки во всем температурном диапазоне и диапазоне питающих напряжений составляет 1% [4].

Волоконно-оптическая линия задержки состоит из преобразователя электрического сигнала в оптический (оптического передатчика), отрезка оптоволо-

на необходимой длины и преобразователя оптического сигнала в электрический (оптического приемника), как показано на рисунке 2.

Задачей оптического передатчика является модуляция оптического излучения лазерного диода (Λ) входным радиочастотным сигналом S , причем проблема заключается в нелинейности модуляционной характеристики лазерного диода и его низкой температурной стабильности. Для организации отрицательной обратной связи по оптическому каналу 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 формирования времени задержки (T) сигнала S используется оптическое волокно необходимой длины, намотанное на катушку. Благодаря малому диаметру оптического волокна намотка получается компактной, но внутренний диаметр катушки обычно составляет не менее 50 мм во избежание роста потерь сигнала при уменьшении радиуса изгиба оптоволокну. В качестве преобразователей оптического сигнала в электрический, наибольшее применение получили PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды. Лавинные фотодиоды имеют преимущество перед PIN-фотодиодами по чувствительности, но обладают также и рядом недостатков: у них более высокое рабочее напряжение питания, довольно сильная темпера-

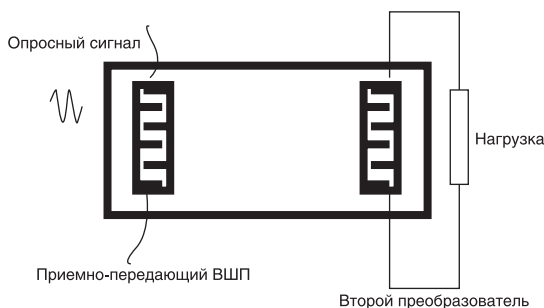


РИС. 1.
Линия задержки на ПАВ

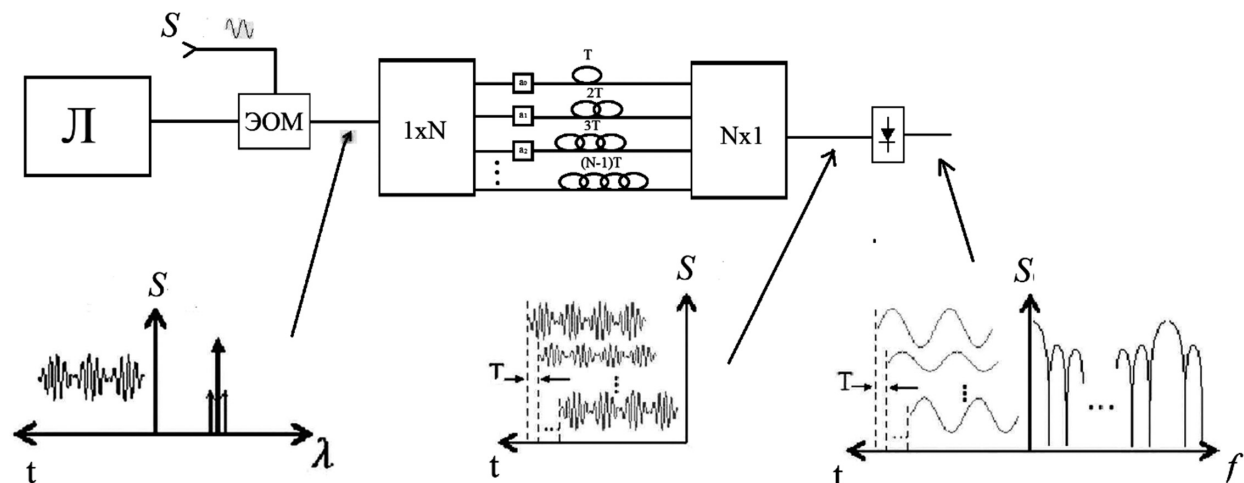


РИС. 2.
Волоконно-оптическая линия задержки

турная зависимость, меньшая надежность и более высокая стоимость по сравнению с PIN-фотодиодами. По совокупности параметров в приемных модулях более широко используются PIN-фотодиоды. Чувствительность современных PIN-фотодиодов составляет от 10 нВт до 100 пВт (-50...-70 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 20 дБ.

ВЫВОД

Представленные материалы демонстрируют преимущества и недостатки различных линий задержек. Особое преимущество отмечено в линиях задержек на основе волоконной оптики. Стоит отметить высокое быстродействие и широкополосность таких ВОЛЗ, при сравнительно небольших потерях, по сравнению с аналогами на ПАВ, а также массогабаритные характеристики ВОЛЗ значительно меньше, чем у обычных коаксиальных ЛЗ. Для снижения нелинейных искажений в ВОЛЗ применяются различные методы: введение в модулирующий сигнал обратных предискажений, отрицательная обратная связь, фазовая компенсация и другие. Широко применяется отрицательная обратная связь по оптическому каналу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боритко С.В. Разработка низкочастотных широкополосных линий задержки на поверхностных акустических волнах // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. Т. 8. № 5.
2. Изюмова Т.И., Свиридов В.Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии // М.: Энергия. 1975.
3. Ицхоки Я.С., Овчинников Н.И. Импульсные цифровые устройства. //М.: Советское радио. 1973.
4. Материалы сайта <http://www.itis.spb.ru/DALLAS/delay.htm>.
5. Электроника: Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Колесников // М.: Советская энциклопедия. 1991. 668 с.

REFERENCES

1. BORITKO S.V. Development of low-frequency broadband delay lines of surface acoustic waves. Electromagnetic waves and electronic systems. 2004;8;(5). (In Russian).
2. IZYUMOVA T.I., SVIRIDOV V.T. Waveguides, coaxial and strip lines. Moscow: Energia. 1975. (In Russian).
3. ITSHOKI Y.S., OVCHINNIKOV N.I. Pulse digital devices. Moscow: Sovetskoe radio. 1973. (In Russian).
4. Site's materials <http://www.itis.spb.ru/DALLAS/delay.htm>. (In Russian).
5. Electrinocs. Encyclopedic dictionary. Kolesnikov V.G. editor. Moscow: Soviet encyclopedia. 1991:668. (In Russian).

Шарапов Григорий Андреевич, инженер 1 категории АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

Крюков Артём Игоревич, инженер 3 категории АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9,
107078, Moscow, st. New Basmannaya, b. 20, p. 9,
тел.: +7 (499) 263-95-34, e-mail: sarius1990@ya.ru