

ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

А. Б. Ястребков, к.ф.-м.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ; yastreb110@yandex.ru

М. А. Серпова, аспирант РГРТУ, KMaria023@yandex.ru

М. С. Тыщенко, аспирант РГРТУ, Mihaluch2007@yandex.ru

И. О. Бычков, студент РГРТУ, Mihaluch2007@yandex.ru

О. А. Абросимов, аспирант РГРТУ, green_sa@mail.ru

Рассмотрен принцип действия и алгоритм работы прецизионного триангуляционного рециркуляционного лазерного дальномера, принцип работы блока управления дальномера. Целью работы является исследование частотных и мощностных характеристик рециркуляционного генератора с оптоволоконной линией задержки на базе полупроводникового лазера и определение факторов, влияющих на точность и диапазон измеряемого расстояния. Исследованы зависимости мощности и частоты рециркуляции от угла ввода лазерного излучения. Исследована зависимость периода рециркуляции от длины оптической линии задержки, а также найдена зависимость частоты рециркуляции от мощности излучения лазерного диода.

Ключевые слова: лазерный дальномер, триангуляция, оптический световод, оптическое волокно, рециркуляционный генератор, фотоприемник.

Введение

Высокая когерентность и направленность лазерного излучения, возможность генерирования когерентных волн большой интенсивности в различных областях оптического спектра и получения высоких плотностей энергии в непрерывном и импульсном режимах стимулировали широкое применение лазеров для решения различных практических задач, в том числе в измерительной технике. Значительное место в этой области принадлежит лазерным измерителям дальности (дальномерам) – устройствам, позволяющим бесконтактным способом измерять с требуемой точностью расстояния до самых различных объектов. Лазерные дальномеры охватывают широкий диапазон измеряемых расстояний и имеют достаточно высокую точность при измерении больших расстояний (свыше 1 м). Однако при измерении малых расстояний (меньших 0,1 м) имеются значительные трудности при достижении точности измерений ~ 1 –10 мкм. При этом получение высокой точности измерения малых расстояний сопровождается значительными техническими трудностями и

усложнением алгоритма обработки полученных результатов. Наиболее простыми с точки зрения реализации схемных решений являются рециркуляционные лазерные дальномеры [1].

Принцип действия и алгоритм работы рециркуляционного дальномера

Рециркуляционный дальномер с некоаксиальным способом ввода лазерного излучения в оптический световод позволяет определять расстояние до объекта триангуляционным методом, но не по измерению угла триангуляции прямым способом, а по измерению частоты рециркуляции лазерного диода, величина которой зависит от угла триангуляции φ , однозначно связанного с углом ввода излучения в оптический световод, или по времени задержки лазерного излучения в световоде, которое также зависит от угла триангуляции φ . Время распространения Δt лазерного излучения по оптическому световоду существенным образом зависит от угла $\alpha_{\text{вх}}$ ввода излучения в оптоволоконно. В свою очередь, угол ввода излучения в оптоволоконно при использовании триангуляционной схемы связан с углом триангуляции φ и позволяет определить рассто-

яние от лазерного диода до объекта.

До момента регистрации фотоприемником отраженного от объекта излучения осуществляют его задержку в оптическом световоде. Причем задержка в световоде осуществляется за счет многократных отражений излучения от границы раздела сердцевины и оболочки световода. Она зависит от длины световода l_{cv} и угла ввода $\alpha_{вх}$ излучения в световод. В свою очередь, угол ввода излучения в световод связан с углом падения $\alpha_{пад}$ на входную апертуру световода соотношением:

$$n_e \cdot \sin \alpha_{пад} = n_c \cdot \sin \alpha_{вх}, \quad (1)$$

где n_c и n_e – показатели преломления света световода и воздуха соответственно. В этом случае можно определить угол триангуляции φ по времени Δt распространения в световоде отраженного от объекта излучения.

Для реализации данного способа измерения расстояния необходимо ориентировать нормаль n к плоскости входной апертуры световода под углом β относительно направления зондирующего излучения (рисунок 1). Угол β выбирается в пределах от 0 до 40 градусов и определяется диапазоном измеряемых расстояний, а также базой триангуляции [2]. Как видно из рисунка 1, между углом триангуляции φ , углом β и углом падения $\alpha_{пад}$ отраженного от объекта излучения на входную апертуру световода имеется следующее соотношение:

$$\varphi = \pm(\beta - \alpha_{пад}). \quad (2)$$

В выражении (2) знак «+» выбирается при отсчете угла β против часовой стрелки, а знак «-» выбирается при отсчете угла β по часовой стрелке относительно направления зондирующего излучения.

Угол входа излучения в световод связан с временем Δt распространения излучения в световоде выражением

$$\alpha_{вх} = \arccos[(l_{cv} \cdot n_{ce})/c \Delta t], \quad (3)$$

где l_{cv} – длина световода, n_{ce} – показатель преломления среды, по которой распространяется излучение в световоде, и c – скорость распространения света в вакууме.

Таким образом, измеряя время задержки Δt , можно найти угол входа излучения в световод $\alpha_{вх}$. Далее, используя связь между углами φ , β и $\alpha_{пад}$, определяемую выражением (2), и соотношением (1), связывающее между собой углы $\alpha_{пад}$ и $\alpha_{вх}$, и зная время Δt распространения в световоде отраженного от объекта излучения, можно рассчитать расстояние L по формуле:

$$L = \frac{b}{\operatorname{tg} \left[\pm \left(\beta - \left(\arcsin \frac{n_{ce}}{n_e} \sqrt{1 - \left(\frac{l_{cv} \cdot n_{ce}}{c \cdot \Delta t} \right)^2} \right) \right) \right]}, \quad (4)$$

где Δt – время распространения отраженного от объекта излучения в световоде, l_{cv} – длина световода, n_{ce} – показатель преломления среды, по которой распространяется излучение в световоде, n_e – показатель преломления воздуха, c – скорость распространения света в вакууме.

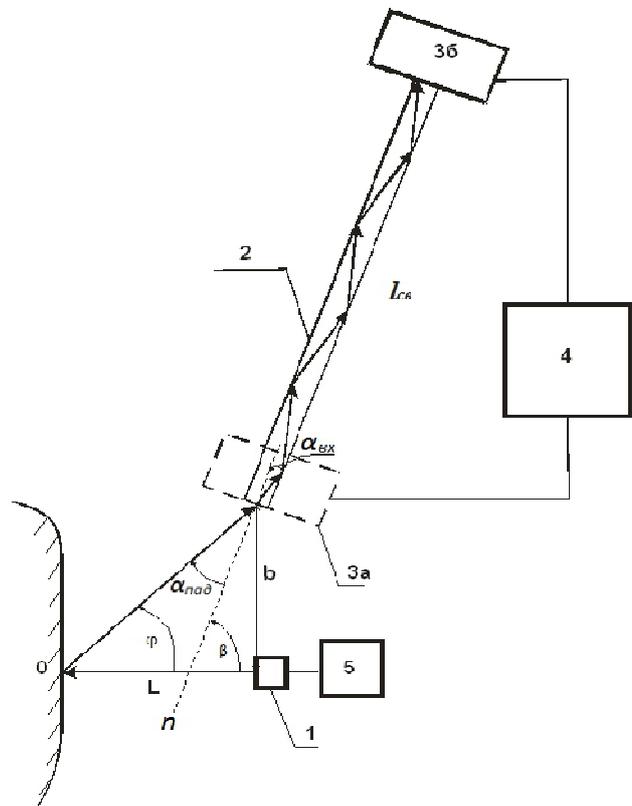


Рисунок 1 – Иллюстрация триангуляционного способа измерения расстояния по времени задержки распространения излучения, отраженного от объекта в оптическом световоде: 0 – объект, 1 – лазер, 2 – световод, 3а – первый фотоприемник, 3б – второй фотоприемник, 4 – блок измерения временных интервалов, 5 – блок управления лазерным диодом

В данном выражении учтено, что угол падения $\alpha_{пад}$ отраженного от объекта излучения определяется с помощью выражения:

$$\alpha_{пад} = \arcsin \left[\left(\frac{n_{ce}}{n_e} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{l_{cv} \cdot n_{ce}}{c \Delta t} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

Время распространения отраженного от объекта излучения в световоде Δt измеряется путем измерения времени t_1 распространения зондирующего излучения до объекта и отраженного от объекта излучения до выходной апертуры световода, а также путем измерения времени t_2 распространения зондирующего излучения до объекта и отраженного излучения до входной апертуры световода. Очевидно, что в этом случае время распространения отраженного от объекта излучения в световоде Δt определяет-

ся разностью t_2 и t_1 [3]. Таким образом, для оптоволокна с диаметром сердцевинки $d_c = 1000$ мкм величина задержки Δt изменяется от 110 нс до 240 нс на длине световода 9 м при изменении числовой апертуры NA от 0,12 до 0,65 и от 300 нс до 500 нс при длине световода 30 м, следовательно, частота рециркуляции должна быть не ниже 1 МГц, а также следует определить влияние мощности на частоту рециркуляции.

Экспериментальная установка

Макет, имитирующий триангуляционный вариант работы ЛРД, был выполнен на оптической скамье. На входной поворотной стойке 4 закреплялся входной конец многомодового световода 7, внутрь которого с помощью фокусирующей линзы 6 заводилось излучение от лазерного диода 5. Полупроводниковый лазерный диод мощностью 3 мВт был использован в качестве источника излучения. Использование лазерного диода видимого диапазона было обусловлено возможностью наиболее простой настройки оптической схемы рециркуляционного дальномера. Юстировка соосности нормали к входной апертуре световода и лазерного излучения выполнялась с помощью микрометрических винтов, которые позволяли перемещать входную апертуру световода в трех взаимно перпендикулярных направлениях. На выходной стойке закреплялся выходной конец световода 7. Лазерное излучение, выходящее из выходной апертуры световода, направлялось на фотодиод (рисунок 2).

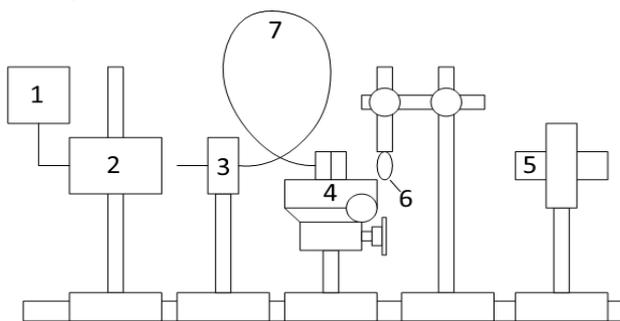


Рисунок 2 – Экспериментальный макет по исследованию характеристик рециркуляционного генератора с оптической линией задержки: 1 – частотомер или ваттметр, 2 – фотодиод, 3 – выходная стойка, 4 – входная стойка с микрометрическим винтом, 5 – лазерный диод, 6 – фокусирующая линза, 7 – световод

В качестве фотодиода использовался pin-фотодиод AVAGO HFBR-2528Z, включенный в электрическую схему ЛРД, при этом измерялась его частота частотомером АСН-3000. При измерении мощности выходного излучения использовался простой фотодиод, напрямую подклю-

ченный к ваттметру. Линза 6 располагалась таким образом, чтобы её фокус приходился на выходную апертуру световода. Это необходимо для того, чтобы излучение полностью попадало в световод.

Блок управления рециркуляционного генератора является реализацией триггера Шмитта с оптической линией обратной связи. В момент, когда лазерное излучение попадает на фотодетектор, компаратор формирует сигнал логического «0», далее данный сигнал инвертируется первым высокочастотным транзистором и подается на базу второго транзистора, вследствие чего питание лазерного диода отключается. В момент отключения лазерного диода фотодетектор перестает регистрировать лазерное излучение и компаратор формирует сигнал логической «1», что приводит в дальнейшем к включению лазерного диода и переходу в режим рециркуляции.

Результаты эксперимента

Рассмотрим зависимость периода рециркуляции от длины оптического волокна. В таблице 1 отражены результаты измерений частоты рециркуляции лазерного дальномера при различной длине оптоволоконной линии оптической задержки. Данная зависимость полностью линейна, и её график описывается уравнением $y=14,006x+364,18$.

Таблица 1 – Зависимость периода рециркуляции от длины линии оптической задержки

$l, \text{ м}$	1,5	24	50
$T, \text{ нс}$	380	710	1060

Период рециркуляции описывается соотношением:

$$T = \frac{2n}{v} \cdot l + T_0, \quad (6)$$

где $v=c/n$ – скорость излучения в оптоволокне (c – скорость света, n – показатель преломления среды), T_0 – период рециркуляции генератора без задержки, или быстродействие блока управления.

Сравнивая соотношение (6) с экспериментально определённой зависимостью периода рециркуляции от длины линии оптической задержки, получаем, что $2n/v = 14,006$ нс/м, следовательно, $n=2,1$, а $T_0=364,18$ нс. Прямое измерение периода рециркуляции без оптоволокна дает значение $T_0 \approx 350$ нс, что хорошо согласуется с приведенным далее расчетом и известным временем развития и спада генерации в лазерном диоде (~100 нс).

Время задержки T излучения световодом длиной l в зависимости от угла падения θ_1 определяется выражением:

$$T = T_0 + l \cdot n_2 / c \cdot \cos(\arcsin(n_1 \cdot \sin \theta_1 / n_2)), \quad (7)$$

где n_1 – показатель преломления воздуха, n_2 – показатель преломления оптоволоконка.

В таблице 2 приведены результаты измерения зависимости частоты следования импульсов от угла ввода излучения в волокно длиной 50 м с линзой.

Таблица 2 – Зависимость частоты рециркуляции от угла ввода излучения в оптоволоконно длиной 50 м

α , град	ν , МГц				Среднее
	Теор.	Экспериментальная			
-30	1,088	0,756	0,759	0,762	0,759
-25	1,092	0,854	0,852	0,858	0,855
-20	1,095	0,914	0,914	0,914	0,914
-15	1,098	0,933	0,936	0,936	0,935
-10	1,100	0,950	0,950	0,949	0,950
-5	1,101	0,956	0,955	0,955	0,955
0	1,102	0,959	0,958	0,957	0,958
5	1,101	0,958	0,957	0,956	0,957
10	1,100	0,952	0,952	0,950	0,951
15	1,098	0,937	0,936	0,935	0,936
20	1,095	0,897	0,909	0,897	0,901
25	1,092	0,850	0,857	0,847	0,851

Теперь оценим величину затухания сигнала в многомодовом оптоволоконке. Примеси, остающиеся в волокне, будут поглощать световую энергию. В световодах с низким качеством существенны потери из-за поглощения, вызываемого ионами металлов. Также содержится большое количество примесей гидроксильных ионов (ОН-), которые имеют полосы поглощения на определенных длинах волн. Наибольшее затухание сигнала из-за гидроксильных ионов имеет место в диапазоне волн 850 нм.

Ослабление электромагнитной волны в оптоволоконке происходит по закону Бугера, следовательно, мощность в оптоволоконке уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

где P_0 – мощность излучающего лазерного диода, α – коэффициент затухания, а x – расстояние, пройденное излучением.

По данным, представленным производителем к оптоволоконному кабелю, затухание составляет 210 дБ/км, следовательно, коэффициент $\alpha = 48 \text{ км}^{-1}$.

В таблице 3 результаты зависимости мощности лазерного излучения на выходе оптоволоконной линии задержки от его угла ввода в волновод с линзой.

Таблица 3 – Зависимость мощности выходного излучения от угла ввода излучения в оптоволоконно длиной 50 м

α , град	P , мВт				Среднее
	Теор.	Экспериментальная			
-30	0,838	0,756	0,759	0,762	0,759
-25	0,848	0,854	0,852	0,858	0,855
-20	0,858	0,914	0,914	0,914	0,914
-15	0,865	0,933	0,936	0,936	0,935
-10	0,871	0,950	0,950	0,949	0,950
-5	0,875	0,956	0,955	0,955	0,955
0	0,876	0,959	0,958	0,957	0,958
5	0,875	0,958	0,957	0,956	0,957
10	0,871	0,952	0,952	0,950	0,951
15	0,865	0,937	0,936	0,935	0,936
20	0,858	0,897	0,909	0,897	0,901
25	0,848	0,850	0,857	0,847	0,851

Аналогичные зависимости были сняты для двух других световодов 1,5 м и 24 м длиной. Вид этих зависимостей подобен выше приведенным и не несет дополнительной информации.

Также был произведен анализ частоты рециркуляции от мощности излучения, для этого линия оптической задержки была заменена поворотными поляризаторами. В таблице 4 приведены результаты измерения мощности и частоты рециркуляции в зависимости от угла поляризации. На основании этих данных был построен график зависимости частоты рециркуляции от мощности лазерного излучения (рисунок 3).

Таблица 4 – Зависимость частоты рециркуляции и мощности лазерного излучения от угла поляризации излучения

α , град	ν , МГц	P , мВт
100	3,188	1,85
105	3,183	1,85
110	3,173	1,9
115	3,155	1,85
120	3,138	1,82
125	3,11	1,79
130	3,074	1,68
135	3,042	1,6
140	2,975	1,45
145	2,904	1,3
150	2,773	1,15
155	2,619	1
160	2,456	0,75
165	1,76	0,52
170	1,37	0,35

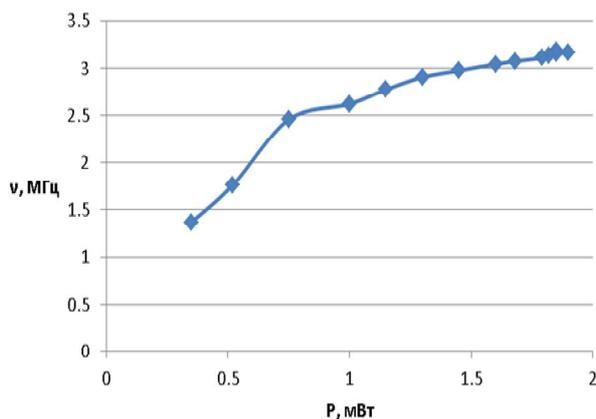


Рисунок 3 – Зависимость частоты рециркуляции от мощности лазерного излучения

Из графика, представленного на рисунке 3, ясно видно, что чем выше мощность, падающая на pin-фотодиод, тем меньше время задержки электронной схемы РГ. Это обусловлено энергетическими характеристиками использованного фотодиода, что приводит к увеличению времени нарастания фронта генерации лазерного импульса и времени спада до 140 нс.

Заключение

Таким образом, была экспериментально проверена линейная зависимость времени прохождения линии оптической задержки от протяженности оптоволокну. Экспериментальные результаты подтверждают достаточность линии оптической задержки при длине оптического волокна более 20 м и подтверждают линейную зависимость времени задержки лазерного излучения от длины оптического волокна. Экспериментально найденная зависимость частоты рециркуляции от угла ввода лазерного излучения в оптоволокну согласуется с теоретически рассчитанной. Анализ зависимости частоты и мощно-

сти лазерного излучения от угла падения показал, что при измерении частоты при угле падения $\alpha_{пад} > 15$ возникает дополнительная задержка срабатывания электронной схемы управления, что накладывает ограничения по диапазону измеряемого расстояния. Для проведения более высокоточных измерений и уменьшения погрешности измерений необходимо увеличение чувствительности фотодиода, увеличение мощности лазерного диода, а также использование входного объектива.

Рециркуляционный лазерный дальномер, прежде всего, позволяет измерять расстояние от источника лазерного излучения до объекта, но может быть использован как сверхточный датчик колебаний, что позволяет применять данный тип измерительного оборудования при использовании его различных конфигураций для решения широкого спектра задач [4].

Библиографический список

1. Ястребков А. Б., Венедиктов А. З., Маткова Н. А., Кириллов С. Н. Патент РФ № 2339909. Лазерный дальномер.
2. Горечий А. В., Маткова Н. А., Суворов Д. В., Тыщенко М. С., Ястребков А. Б. Рециркуляционный лазерный дальномер // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 131–136.
3. Ястребков А. Б., Венедиктов А. З., Маткова Н. А. Патент РФ № 2408842. Способ измерения расстояния и устройство для его осуществления (варианты).
4. Маткова Н. А. Лазерный рециркуляционный дальномер с широким диапазоном измеряемых расстояний // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 22. С. 46–49.

UDC 621.382

INVESTIGATION OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF RECIRCULATION LASER DISTANCE METER

A. B. Yastrebkov, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; yastreb110@yandex.ru

M. A. Serpova, post-graduate student, RSREU, Ryazan, KMaria023@yandex.ru

M. S. Tishchenko, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Mihaluch2007@yandex.ru

I. O. Bichkov, student, RSREU, Ryazan, Mihaluch2007@yandex.ru

O. A. Abrosimov, post-graduate student, RSREU, Ryazan, green_sa@mail.ru

The principle of action and precise triangulation algorithm of recycle laser distance meter, the distance meter principle of operation of the control unit are considered. The aim is to study the frequency and power characteristics of a recycle generator with fiber optic delay line on the basis of semiconductor laser and identification of factors affecting the accuracy and the range of measured distance. The dependence of power and recirculation frequency from laser light angle input. The dependency of recirculation period from optical delay line length is studied and the dependency of recirculation rate from laser diode power is found.

Key words: laser distance meter, triangulation, optical waveguide, optical fiber, recycle generator photodetector.

References

1. **Yastrebkov A. B., Venediktov A. Z., Matkova N. A., Kirillov S. N.** Patent of Russian Federation № 2339909. Laserniy dalnomer (in Russian).

2. **Gorechiy A. V., Matkova N. A., Suvorov D. V., Tishchenko M. S., Yastrebkov A. B.** Recirculacionnyi dalnomer. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 51, pp. 131–136 (in Russian).

3. **Yastrebkov A. B., Venediktov A. Z., Matkova N. A.** Patent of Russian Federation № 2408842. Sposob izmerenja rasstojanja i ustroistvo dlja ego osushetvlenja (varianti) (in Russian).

4. **Matkova N. A.** Recirculacionnyi laserniy dalnomer s shirokim diapozonom izmeramih rasstojanij. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 22, pp. 46–49 (in Russian).