

Радиочастотные и лазерные (радарные и лидарные) системы определения расстояний до удаленных объектов нашли широкое применение в навигации, локации, метеорологии, обеспечении безопасности полетов, автоматизированных системах управления транспортом и т.д. Тенденции рынка лидарных и радарных технологий указывают на востребованность этой техники не только за рубежом, но и в России. Однако выпуск на рынок нового продукта подобного класса сопряжен с обязательными процедурами испытаний, сертификации и, в частности, должны быть предусмотрены методы и средства метрологического обеспечения.

Лидарные и радарные системы в общем случае относятся к измерительному оборудованию. Измерительное оборудование, особенно для ответственных применений, должно проходить периодическую поверку. Методики поверки и контроля эксплуатационных параметров радиочастотных и лазерных дальномеров хорошо известны и общеприняты. Лазерные метеорологические облакомеры и другие метеорологические лидары в этом смысле не являются исключением [1]. Однако в отличие от простых дальномеров, проблемой для таких устройств является тот факт, что создать эталонную оптическую трассу со строго контролируруемыми параметрами невозможно или крайне сложно, поэтому контролирующие организации прибегают к значительным упрощениям и допущениям [2, 3]. Поверить некоторый параметр измерительного оборудования означает проконтролировать результат его измерений в условиях, при которых измеряемый параметр может быть задан с точностью, как минимум в 3 раза превышающей точность поверяемого измерителя. В случае с лазерными облакомерами фактически требуется создать эталонные облака со строго определенными характеристиками, находящиеся на точно заданных высотах. Ввиду невозможности создания таких эталонов приходится прибегать к некоторым упрощениям и допущениям. В частности, рассеивающее облако может быть заменено некоторым удаленным отражающим объектом-мишенью, при этом принцип прямого измерения расстояния до объекта сохраняется.

Совместными усилиями специалистов БГТУ «ВОЕНМЕХ» и ООО «НПП Лазерные Системы» был разработан, апробирован, зарегистрирован и запатентован прототип поверочного стенда для контроля основных эксплуатационных параметров лазерных облакомеров и лидаров [4, 5], обеспечивающий приближенную имитацию атмосферного распространения.

При разработке систем, имеющих достаточно протяженные линии распространения оптического или высокочастотного радиоизлучения, часто приходится учитывать фактор временной задержки при прохождении электромагнитного импульса от источника к приемнику. При этом время задержки зависит не только от протяженности линии, но и от свойств тракта (оптического волновода, коаксиального кабеля) и частоты самого излучения. Особенно актуален этот вопрос для систем, строящихся на различных линиях задержки в оптическом и радиочастотном диапазоне. В нашем случае при разработке вышеупомянутого стенда встала задача верификации параметров оптического волокна и линий временных задержек на его основе. В частности, требовалось осуществить метрологически-легитимное измерение эффективного показателя преломления волокна, а так же контроль длин оптоволоконных линий задержки на катушках в составе стенда.

Электромагнитная волна в среде, как известно, распространяется медленнее, чем в вакууме в n раз, где n – абсолютный показатель преломления. В случае оптического волновода (оптического волокна) вводится понятие эффективного показателя преломления N_{eff} , который в некотором смысле эквивалентен n для изотропной среды: он показывает во сколько раз скорость распространения светового импульса в оптическом волокне (для рассматриваемой моды) меньше скорости света в вакууме, однако по своей величине N_{eff} лежит между абсолютными значениями показателя преломления сердцевины волновода n_{core} и подложки n_{clad} . Объяснение этого явления возможно при рассмотрении распространения электромагнитной волны в ограниченном пространстве направляющей среды, однако для описания времени прохождения светового импульса по оптическому волокну длиной L можно пользоваться простым выражением:

$$t = L * N_{eff} / c$$

Данное выражение справедливо и для коаксиальных радиочастотных волноводов с той разницей, что вместо N_{eff} следует использовать некоторый эквивалентный по смыслу коэффициент. N_{eff} не

является константой и зависит как от свойств самого волновода (геометрические размеры, форма, диэлектрическая проницаемость и т.д.), так и от длины волны электромагнитного излучения. Иными словами, N_{eff} обладает свойством хроматической дисперсии, которая в данном случае будет состоять из волноводной и материальной составляющей. Наличие дисперсии N_{eff} приводит к тому, что:

- при одной и той же длине разные волноводы обладают различным временем задержки;
- в одном волноводе разные частоты распространяются с разными скоростями и, соответственно, за разное время.

Рассматриваемый метод позволяет определить N_{eff} оптического волновода для различных длин волн (частот) оптического излучения, однако применим и для радиочастотных коаксиальных кабелей. Подобный метод применяется в фазовых дальномерах для определения расстояния до объекта. Суть метода в нашем случае заключается в том, чтобы в отрезке исследуемого оптического волокна точно измеренной длины организовать распространение оптического излучения с известной длиной волны, при этом само излучение должно быть модулировано по амплитуде периодическим низкочастотным сигналом, в простейшем случае – гармоническим колебанием. При некоторой частоте модуляции возникнет ситуация, при которой фаза модулированного оптического сигнала на входе в волновод будет равна фазе на выходе из него. Это будет означать, что в волноводе известной длины вмещается целое число волн модулированного сигнала. Зная частоту модуляции и длину волновода, не составляет труда вычислить N_{eff} .

Схема установки приведена на рис. 1.

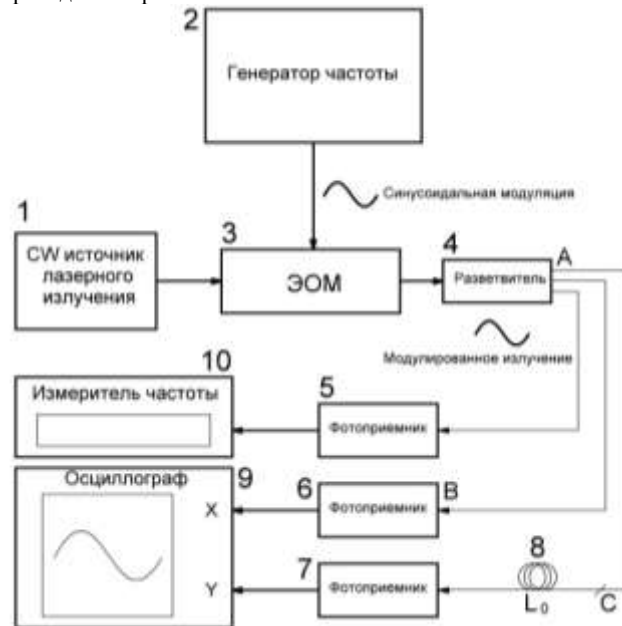


Рисунок 1. Схема установка для измерения N_{eff} оптического волокна

Излучение лазера 1 вводится в оптическое волокно и модулируется по амплитуде гармоническим сигналом частотой f_N с генератора частоты 2 посредством электрооптического модулятора 3, после чего поступает на разветвитель 4. Модулированное излучение лазера поступает на фотоприемники 5, 6 и 7, при этом длины выводов А-В и А-С должны быть одинаковы. Между фотоприемником 7 и выходом С разветвителя включается отрезок исследуемого волокна точно известной длины L_0 . Сигналы фотоприемников 6 и 7 поступают на осциллограф 9, где включаются во взаимно ортогональной развертке, а сигнал фотоприемника 5 заводится на поверенный измеритель частоты 10.

Обозначим частоту генератора при синфазном сигнале на осциллографе как f_N . Отсутствие сдвига фазы между сигналами на осциллографе означает, что в участке L_0 укладывается целое количество периодов модуляции (длина модуляции) $\lambda_{мод}$,

$$L_0 = N\lambda_{мод}$$

где N – целое число. Тогда справедливо равенство:

$$L_0 = N\lambda_{mod} = \frac{c}{f_N * N_{eff}}$$

В простейшем случае $N=1$, т.е. в L_0 укладывается один целый период модуляции (одна длина волны модуляции). Поскольку величина L_0 известна с высокой точностью, f_N задается и контролируется так же с высокой точностью, можно определить величину N_{eff}

$$N_{eff} = \frac{c}{N\lambda_{mod} * f_N} = \frac{c}{L_0 * f_N}$$

при $N=1$.

Частота f_N выбирается таким образом, чтобы разность фаз сигналов с фотоприемников 6 и 7 была равна πN , где N – целое число больше нуля. При этом в ортогональной развертке каналов осциллографа будет наблюдаться диагональная прямая линия в I и III четвертях при сдвиге фаз $2\pi N$ и во II и IV четвертях при $\pi(2N-1)$ (Рис. 2).

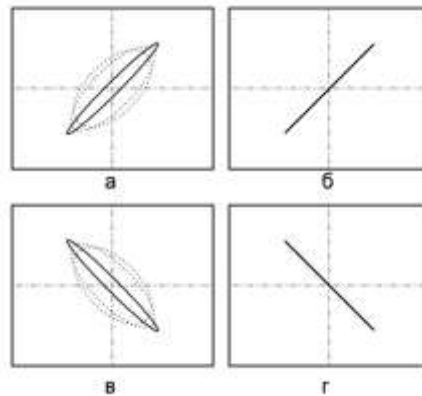


Рисунок 2 Ортогональная развертка каналов осциллографа: а) сигналы приближаются к синфазности; б) сигналы синфазны; в) сигналы близки к противофазности; г) сигналы противофазны

При синфазности и противофазности сигналов N_{eff} легко определяется из простого соотношения:

$$N_{eff} = \frac{Nc}{L_0 * f_N}$$

Как следует из формулы, точность определения N_{eff} зависит от точностей измерения длины эталонного образца волокна, частоты генератора, обнаружения фазы на осциллографе. Все эти параметры могут быть измерены с учетом накопления и статистической обработки достаточно точно. Реальные эксперименты подтвердили работоспособность метода, погрешность определения N_{eff} составила менее 1%.

Эксперименты показали, что существенное влияние на результаты оказывают незначительные различия каналов осциллографа, электрических сигнальных цепей и схемотехники фотоприемных модулей. Начиная с выхода оптического разветвителя, любая временная задержка, привнесённая в опорное или измерительное плечо, неизбежно сказывается на фазе опорного или измеряемого сигнала. При этом на фазу сигнала, кроме исследуемого образца L_0 , влияют такие параметры как электрические емкости цепей фотоприемных модулей, различные длины и волноводные свойства сигнальных коаксиальных кабелей, различие емкостей входов осциллографа и т.д. Так, например, 10-и сантиметровое различие длин кабелей, которыми подключались фотоприемные модули к осциллографу, вносили дополнительную погрешность порядка 3-5% на используемых частотах модуляции, а с повышением частоты погрешность еще более возрастала. Для устранения этого явления эксперименты проводились дважды: между сериями замеров производилось взаимное переключение опорного и сигнального каналов с последующим усреднением полученных результатов. В этом случае фазовые набег, обусловленные неидеальностью сигнальных цепей, взаимно компенсировались и не приводили к существенному увеличению погрешности.

В отсутствие оптического рефлектометра такая методика позволяет измерить и длину оптического волокна на катушке. Измеряемая катушка включается вместо эталонного отрезка L_0 . Зная N_{eff} волокна на катушке, не составляет труда определить его длину:

$$L_{coil} = \frac{Nc}{f_{coil} * N_{eff}}$$

Для этого достаточно подобрать такую частоту модуляции f_{coil} , при которой на осциллографе наблюдается синфазность или противофазность сигналов в ортогональной развертке. Для катушки волокна километровой длины частота модуляции составит порядка 200кГц для $N=1$ и $N_{eff}=1.485$.

Поскольку $N_{eff} = f(\lambda)$, данная методика позволяет так же определять оптико-временные параметры волоконных линий задержек для различных длин волн излучения. Перестраивая лазерный излучатель в широком диапазоне длин волн или используя различные излучатели, можно получать дисперсионные зависимости эффективного показателя преломления от длины волны излучения для различных типов оптических волокон.

В результате проведенной работы была предложена и апробирована методика измерения эффективного показателя преломления оптического волновода и длины оптоволоконной катушки методом детектирования фазы модулирующего сигнала. Полученные результаты были использованы при разработке прототипа поверочного стенда для контроля основных эксплуатационных параметров лазерных облакомеров и лидаров.

Библиографический список

1. РД 52.04.716—2009 Руководящий Документ. Правила эксплуатации метеорологического оборудования аэродромов гражданской авиации. Санкт-Петербург 2009
2. МИ 2713—2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Системы автоматизированные метеорологические измерительные. Методика поверки.
3. МИ 2783—2003 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерители высоты нижней границы облаков. Методика поверки.
4. A. A. Kim, D. V. Klochkov, M. A. Konyaev, A. S. Mihaylenko, "Control of operating parameters of laser ceilometers with the application of fiber optic delay line imitation," Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104662T (30 November 2017).
5. Ким А.А., Клочков Д.В. Патент на изобретение №2636797 «Способ контроля и поверки метрологического лидарного оборудования типа облакомер и устройство для его осуществления» от 19 января 2017.