МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.3.093, 621.376.3

Стабилизация параметров лазерного источника излучения в условиях космоса

Кошелев К.И., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научный руководитель: Шелестов Д.А., мл. науч. сотр. НОЦ «Фотоника и ИК-техника» Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана bauman@bmstu.tu

Введение

Современные космические метеорологические системы невозможно представить без высокоточных оптико-электронных приборов, в частности фурье-спектрометров. Инфракрасные фурье-спектрометры используются в космосе для нужд глобальной и региональной оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности, общее содержание и распределение озона, температура подстилающей поверхности. Разрабатываемый НТЦ им. М.В. Келдыша отечественный инфракрасный фурье-спектрометр (далее ИКФС) содержит модуль интерферометра, построенный по схеме Майкельсона с уголковыми отражателями и предназначенный для формирования диаграммы входного излучения. Для увеличения спектрального разрешения и снижения уровня шумов интерферометра в его состав включен так называемый референтный канал, являющийся источником высокостабильного лазерного излучения, который служит ДЛЯ формирования синхроимпульса, по которому производится захват интерферограммы. Движение зеркала в интерферометре осуществляется по линейному закону с помощью прецизионного механизма. Точное положение зеркала, задающее разность хода в интерферометре, определяется оптическим способом с помощью референтного канала.

Исходя из метрологических параметров ИКФС, к референтному каналу предъявляются требования высокой стабильности мощности и частоты излучения. Условие длительной непрерывной эксплуатации блока в космосе определяет выбор источника излучения – полупроводниковый диод.

Описание конструкции

При разработке стабилизированных лазерных источников, работающих в условиях космоса приходится сталкиваться со следующими проблемами:

-изменение термодинамических характеристик диодного модуля и схемы в целом в вакууме

-сложность контроля характеристик излучения во время эксплуатации

-ограниченная номенклатура элементов и материалов, допустимых к использованию в вакууме

-достижение требуемой радиационной стойкости

-высокая механическая нагрузка при выводе на орбиту (вибрация, ударное воздействие)

-жесткие массогабаритные ограничения

-высокие требования к надежности и сроку службы

Для решения данных проблем была предложена следующая конструктивная схема (рис. 1). Референтный канал представляет собой отдельный блок, содержащий в себе источники лазерного излучения, систему вывода излучения, схемы стабилизации и питания. Для увеличения надежности и обеспечения бесперебойной работы спектрометра блок содержит 2 идентичных независимых канала источника.



Рис. 1. Структурная схема блока референтного канала

Соединение элементов устройства оптическим волокном многократно повышает надежность и удобство эксплуатации системы.

Сигналы телеметрии, которые используются для контроля параметров блока во время эксплуатации, формируются схемами термостабилизации и управления лазерным диодом на основе сигналов обратной связи, которая осуществляется при помощи термистора и фотодиода, встроенных в диодный модуль. Следует отметить, что в условиях ограниченных габаритов устройства с целью снижения помех цепи телеметрии должны быть хорошо изолированы или экранированы от наводок, вызванных ВЧ коммутацией мощного компонента – элемента Пельтье.



Рис. 2. Структурная схема канала источника

Наиболее остро стоит проблема термостабилизации лазерного диода в условиях термодинамики блока в составе космического аппарата. ИКФС будет установлен в надире на спутнике «Метеор-МП», который вращается по солнечно-синхронной орбите, благодаря чему колебания температуры поверхности спектрометра за цикл обращения вокруг Земли будут минимальны. Использованием термоизоляции и общего контура стабилизации температуры космического аппарата, ее колебания внутри спектрометра составят ± 2 °C. Как известно, температурный уход центра спектра излучения полупроводникового лазерного диода составляет ~0,1 нм/ °C [1]. Чтобы достичь требуемой относительной стабильности длины волны 5· 10⁻⁶ (абсолютная - ± 3 пм) за цикл обращения аппарата был применен контур стабилизации температуры кристалла лазерного диода термоэлементом Пельтье (далее ТЭ). Исходя из требуемой стабильности длины волны видно, что температура кристалла должна изменяться не более чем на 0,06 °C. Для этого схема управления ТЭ была разработана с использованием специализированной микросхемы МАХ1978. Это интегрированый прецизионный термоконтроллер с внешней обратной связью, позволяющий регистрировать температуру

с абсолютной погрешностью ±0,001 °С. На практике такой результат удалось достичь не сразу. Достижение указанной погрешности возможно только при полном соответствии передаточных характеристик схемы управления и ТЭ. Учет индивидуальных особенностей ТЭ осуществляется точной юстировкой номиналов элементов обратной связи. Так же на работу термоконтроллера влияет качество отвода тепла от корпуса лазерного модуля. Из-за особенностей конструкции применен составной радиатор, его части соединяются с использованием специальной термопасты, не теряющей своих свойств в вакууме. Термодинамические характеристики прибора в вакууме отличаются от характеристик в нормальных условиях: из-за прекращения теплообмена посредствам конвекционных потоков воздуха тепло отводится только радиатором. Тепло-вакуумные испытания устройства показали, что стабильность излучения может существенно ухудшиться в таких условиях, следовательно, радиатор должен быть спроектирован и собран с минимальным термосопротивлением и запасом по отводимой мощности.

В итоге была достигнута кратковременная (15мин) относительная нестабильность длины волны $1,5 \cdot 10^{-7}$ и долговременная $1,5 \cdot 10^{-6}$ (абсолютные – 0,2пм и 2пм соответственно, рис. 3).





Созданная конструкция имеет широкий потенциал модернизации. Для увеличения разрешения и повышения надежности ИКФС в целом, рассмотрены следующие пути усовершенствования схемы референтного канала:

-повышение стабильности длины волны излучения

-введение непосредственного контроля стабильности излучения

Существенно повысить стабильность длины волны излучения можно с помощью использования линейно поглощающей газонаполненной кюветы (рис. 4). В качестве дискриминационной характеристики в этих методах используются спектральные линии поглощения среды, экстремумы которых являются частотными реперными точками [2]. Стабилизация происходит по линии поглощения ацетилена 1520,0867 нм глубиной 6,5 дБ, ширина провала по уровню от 0,5 до 0,02 нм [http://www.dbmoptics.com].

При помощи модулятора излучение лазерного диода сканирует по частоте контур поглощения (рис. 5а). Изменение интенсивности прошедшего излучения пропорционально уходу частоты генерации от реперной точки (рис. 5б) и служит сигналом ошибки в системе автоподстройки частоты (АПЧ).

Данный способ позволит достичь долговременной стабильности частоты 1 · 10⁻⁷.



Рис. 4 Схема стабилизации по поглощающей кювете:

КИ – канал источника, ВК – волоконный коммутатор, ВР – волоконный разветвитель,

К – газонаполненная кювета, Кол - коллиматор, АПЧ – система автоподстройки частоты



Рис. 5. а) гармоническая модуляция частоты лазера вблизи вершины резонансной кривой; б) антисимметричная дискриминантная кривая

Варьировать частоту лазерного диодного модуля можно двумя способами, доступными разработчику: изменением температуры кристалла и тока диода. Первый способ обладает маленьким быстродействием, его целесообразно применить для установления и статирования температурной рабочей точки кристалла. Это позволит с необходимой точностью выйти на требуемую линию поглощения газа. Расстояние между линиями поглощения ацетилена ~0,5 нм, погрешность установки температуры 0,001 °C позволяет изменять длину волны с точностью 0,002 нм. Для осуществления частотного сканирования контура поглощения подходит способ изменения частоты излучения током диода. Данный способ обеспечивает высокую точность и быстродействие. Зависимость частоты излучения от тока диода при малых изменениях носит линейный характер и, согласно [1], описывается выражением (1).

$$\Delta \nu / \Delta i \approx 1 \ \Gamma \Gamma \mu / Ma$$
 (1)

К приборам, работающим в космосе, предъявляются высокие требования надежности. В этом плане газонаполненная кювета является уязвимым местом. В условиях вакуума газ выйдет из нее раньше заявленного срока, так же вибрация при выводе космического аппарата на орбиту будут способствовать сокращению срока службы кюветы на неопределенное время.

В случае выхода кюветы из строя, было предложено использовать запасную ветвь стабилизации по волоконной дифракционной решетке Брегга. Спектр на выходе решетки также имеет провал, так что принцип АПЧ останется тот же. К сожалению решетки Брегга имеют существенный недостаток: центр провала сильно зависит от температуры, даже специальные атермальные решетки, сделанные из материалов с разными коэффициентами термического расширения, имеют зависимость порядка 1 пм/°С [3]. Т.е. для стабилизации излучения до порядка $1 \cdot 10^{-7}$ потребуется удержание температуры решетки в пределах 0,1 °C.

Система должна переключиться с ветви кюветы на ветвь Брегговской решетки по сигналу блока контроля исправности кюветы. При снижении давления газа в кювете до уровня, не позволяющего надежно различить контур линии поглощения, блок контроля подает сигнал переключения ветви. Т.к. давление в кювете падает медленно, при прохождении критической точки сигнал контроля будет восприниматься неоднозначно, что приведет к беспорядочным переключениям системы. Чтобы этого избежать в электронном тракте блока контроля должен быть введен некоторый гистерезис. Рассмотрим варианты схемы контроля:

1) Схема с непосредственным использованием системы АПЧ (рис. 4). В данной схеме переключение происходит тогда, когда контраст сигнала с фотодиода на выходе кюветы уменьшается до определенного предела. Недостаток этого решения заключается в том, что невозможно достоверно определить каким блоком устройства вызвано уменьшение контраста сигнала, следовательно, система может выдать ложный сигнал переключения.

Схема с отдельным устройством, сканирующим линию поглощения газа.
Содержит в себе отдельный блок управления, источник и приемник излучения.

Конструктивно может выполняться:

а) интегрировано с линией основного канала (рис. 6а)

Недостаток – периодические прерывания работы основного канала для осуществления контроля кюветы. Для обеспечения надежной работы устройства, переключение ветви основного канала на ветвь контроля необходимо производить 1 раз в сутки. Исходя из результатов, полученных ранее для предыдущей версии референтного канала, выход излучения лазерного диода на уровень нестабильности 0,002 нм происходит за ~10 мин, следовательно, на такое время 1 раз в сутки будет прерываться целевая работа прибора.



Рис. ба. Интегрированная схема контроля кюветы:

КИ – канал источника, ВК – волоконный коммутатор, ВР – волоконный разветвитель, К – газонаполненная кювета, Кол - коллиматор, АПЧ – система автоподстройки частоты, ВП – волоконный переключатель, РБ – решетка Брегга, БК – блок контроля состояния кюветы

б) параллельно с линией основного канала (рис. 6б)

Недостаток – сложная система ввода излучения в кювету, требующая юстировки четырех независимых коллиматоров. Этот узел конструкции подвержен вибрационному воздействию.



Рис. 6б. Параллельная схема контроля состояния кюветы

В данной работе были рассмотрены схемы стабилизации частоты излучения лазерных источников в космическом приложении. Созданный образец прибора с пассивной стабилизацией, без использования эталонов, показал долговременную нестабильность частоты излучения $1 \cdot 10^{-6}$. Предложенные пути модернизации способны улучшить этот параметр как минимум на порядок. Достоинства системы заключаются в том, что она не требует никаких модификаций имеющихся в продаже лазерных диодных модулей и не содержит механически активных узлов. Эти методы стабилизации оптического излучения могут найти большое количество применений в космических оптико-электронных приборах.

Список литературы

- Pujol L., Lizet J., Sosnicki O. Reference laser source for IASI interferometer // SPIE Digital Library. 2001. Vol. 4169. P. 153-158
- 2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения: пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 512 с.[F. Riehle. Frequency Standards. Basics and Applications, WILEY VCH, 2006.].
- 3. Yu-Lung Lo, Chih-Ping Kuo. Packaging a Fiber Bragg Grating With Metal Coating // Journal of Lightwave Technology. 2003. Vol. 21. № 5. P. 1377.