

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**

УДК 621.3.072.6 : 621.375.826

С. В. Бармасов, В. А. Жмудь, А. А. Воевода*(Новосибирск)***ФАЗОВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ БИЕНИЙ
ДВУХ ИДЕНТИЧНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ**

Описана универсальная система для стабилизации разностной частоты двух лазеров или разности двух частот двухчастотного лазера с точностью до фазы. Система сохраняет фазовую привязку при возмущениях до $0,1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$, и при этом ошибка фазы в пике переходного процесса не превышает $0,5\pi$. В условиях акустических помех офиса (матричный принтер) система обеспечивает поддержание разности фаз с ошибкой менее $0,03\pi$ в акустическом диапазоне. Система с He-Ne-лазерами обеспечивает привязку фазы с погрешностью не более $2\pi \cdot 10^{-9}$ за время осреднения 10 с и более.

Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) одного лазера относительно другого применяется для передачи абсолютного значения стабильности и воспроизводимости частоты от опорного лазера к «ведомому». Такая задача возникает в спектроскопии [1, 2], в интерферометрических измерителях скорости и перемещения, при абсолютных частотных измерениях, для создания линейки лазеров, излучающих в различных спектральных областях и привязанных последовательно к единому эталону, который определяет стабильность всех генерируемых длин волн.

Для стабилизации разностной частоты двух лазеров или разности двух частот двухчастотного лазера с точностью до фазы пока не найдено универсального решения с помощью типовой аппаратуры. Так, при стабилизации разностной частоты двухчастотного лазера методом интегрирования разностной частоты на реверсивном счетчике [3] уменьшение фазовой ошибки до сотых или тысячных долей от 2π невозможно, поскольку такой датчик разностной частоты не может реагировать на указанную величину фазовой ошибки [4].

В других системах фазовой автоподстройки применяются два датчика ошибки: частотный и фазовый детекторы [1]. При этом частотный детектор служит для обеспечения режима захвата, но при уменьшении средней разностной частоты до нуля его выходной сигнал является помехой для работы системы фазовой автоподстройки. Подобные системы часто ошибочно при-

нимаются за фазовые, а в действительности происходящие срывы слежения по фазе остаются незамеченными, поскольку переводят систему в режим слежения по частоте с последующим фазовым захватом. При измерениях частоты такая подмена недопустима из-за неучтенной ошибки.

Фазовая стабилизация разностной частоты лазерного излучения с фазовым детектором на основе перемножителя до настоящего времени достигается, как правило, с большим трудом. Так, если ширина спектра релаксационных колебаний намного больше полосы пропускания фильтра низких частот на входе фазового детектора, то не удастся полностью реализовать астатичность системы ФАПЧ по расстройке частот задающего генератора и релаксационных колебаний [5]. Применение импульсных частотно-фазовых детекторов [6] позволяет совместить требование широкого диапазона захвата по частоте с малой ошибкой слежения по фазе, но это не всегда возможно, поскольку необходимо хорошее отношение сигнал/шум на входе детектора.

Основные проблемы при создании систем ФАПЧ связаны с детектированием фазовой ошибки и обеспечением требуемых динамических свойств замкнутой системы с помощью заданного элемента воздействия, изменяющего частоту излучения. Первая проблема относится ко входной части системы ФАПЧ, т. е. к частотно-фазовому детектору, вторая – к выходной части и корректирующему устройству. Основная причина неудач при создании систем ФАПЧ связана с тем, что эти две составляющие должны оптимизироваться согласованно: повышение чувствительности фазового детектора требует повышения отношения сигнал/шум, что вызывает необходимость сужения полосы фильтрации. В данном случае не может быть обеспечено достаточное быстродействие системы, а медленная система не может достаточно сильно подавить частотные девиации в звуковом диапазоне. Это, в свою очередь, вызывает изменение разности фаз на величину, превышающую 2π , при этом на выходе простого фазового детектора сигнал падает до нуля, а частотно-фазовые детекторы всех типов реагируют на фронты сигнала, поэтому особенно критичны к отношению сигнал/шум на входе и требуют еще более узкополосной фильтрации.

Решение данной проблемы состоит в том, что, с одной стороны, быстродействие исполнительной системы повышается, чтобы перекрыть звуковые частоты, а с другой стороны, разностная частота детектируется на относительно высокой частоте несущей (1–5 МГц) в широкой полосе обзора (5–15 кГц). При этом удается обеспечить снижение фазовой ошибки до сотых и тысячных долей периода по действующему значению, а частотная ошибка даже на относительно коротком интервале осреднения пренебрежимо мала. За время осреднения (1000 с и более) нестабильность разностной частоты по отношению к оптической составляет 10^{-14} и менее.

Нами разработана универсальная электронная часть системы фазовой автоподстройки частоты, успешно испытанная на различных типах лазеров. Оптическая часть системы при этом может быть существенно различной; необходимо лишь, чтобы она обеспечивала совмещение части пучков от двух лазеров на общем фотоприемнике.

Электронная часть системы фазовой автоподстройки частоты выполняется как универсальный прибор и предназначена для поддержания разности частот генерации двух лазеров равной определенному значению, задаваемому программно. С этой целью сигнал биений, полученный с фотоприемника, поступает на частотно-фазовый детектор, где его частота сравнивается с частотой опорного сигнала, определяющего требуемую разность частот. Сигнал

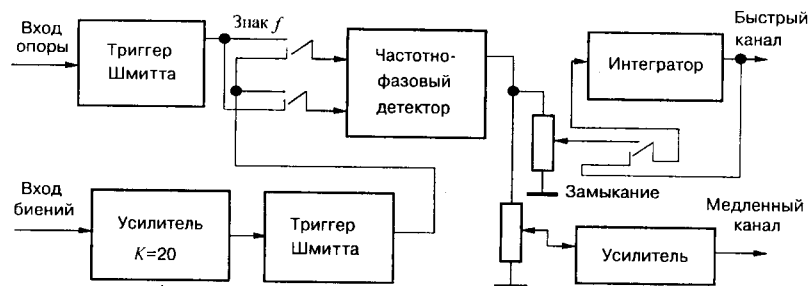


Рис. 1

ошибки, пропорциональный разности фаз с учетом знака, через усилители поступает на пьезокерамический модулятор оптической длины «ведомого» лазера, частота которого в результате подстраивается таким образом, чтобы разностная частота, выделяемая на фотоприемнике, равнялась частоте опорного сигнала.

Систему ФАПЧ можно по функциональному назначению разбить на два модуля: частотно-фазовый детектор и блок усилителей для управления пьезокерамическими модуляторами.

Блок формирования сигнала ошибки предназначен для формирования сигнала ошибки и его интегрирования. Он содержит частотно-фазовый детектор, входные формирователи, интеграторы и вспомогательные элементы (рис. 1).

Частотно-фазовый детектор служит для формирования сигнала, пропорционального частотному рассогласованию между входными сигналами; фазовый детектор формирует сигнал ошибки, пропорциональный фазовому рассогласованию между входными сигналами при равенстве частот этих сигналов. Объединение частотного и фазового детекторов (например, путем суммирования их выходных сигналов с соответствующими коэффициентами) дает частотно-фазовый детектор. Такое решение предпочтительно, когда сигнал разностной частоты плохо выделяется из шумов и при большом диапазоне скоростей свободных флуктуаций частоты одного лазера относительно другого. Поскольку частотный детектор играет вспомогательную роль и необходим только при вхождении в режим захвата, а в рабочем режиме разностная частота двух лазеров строго равна частоте опорного генератора, то частотный детектор может быть заменен компаратором частот с релейной характеристикой. В этом случае возможно применение схемы частотно-фазового детектора (рис. 2), вырабатывающего сигнал, пропорциональный

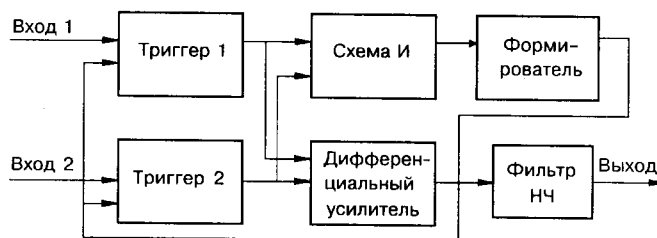


Рис. 2

фазовой ошибке при равенстве входных частот, а в случае различия частот этот сигнал принимает максимальное значение и его знак совпадает со знаком частотной ошибки. Иными словами, по частоте данный детектор имеет характеристику компаратора, а по фазе – линеен в диапазоне от -360 до $+360^\circ$.

Узел частотно-фазового детектора (см. рис. 2) содержит два триггера с отдельным запуском, схему И, дифференциальный усилитель и фильтр НЧ. Входные сигналы поочередно устанавливают триггеры в единичное состояние. После того как сработают оба триггера, схема И возвращает их в исходное нулевое состояние. При этом на выходе одного из триггеров формируются положительные импульсы, длительность которых пропорциональна фазовой ошибке, а на выходе другого – очень короткие импульсы. Дифференциальный усилитель формирует разницу этих сигналов, т. е. импульсы, полярность которых зависит от знака ошибки, а амплитуда определяется ее величиной. Низкочастотная часть этого сигнала выделяется фильтром НЧ. Частотно-фазовый дискриминатор может быть собран на основе специализированной микросхемы AD9901, обеспечивающей формирование фазовой и частотной ошибок по тому же принципу в диапазоне от -180 до $+180^\circ$.

Сигнал ошибки через корректирующий усилитель, обеспечивающий устойчивость всей системы в целом, поступает на выход блока, а далее через блок усилителей для пьезокерамик (УПК) на пьезокерамические модуляторы. Амплитудно-частотная характеристика каждого тракта (быстрого и медленного) формируется отдельно.

Блок усилителей для пьезокерамики усиливает сигнал фазовой ошибки и формирует управляющие напряжения для быстрого и медленного пьезокерамических модуляторов. Управление длиной волны лазерного излучения осуществляется с помощью пьезокерамических модуляторов, на которые подается высокое напряжение.

Для достижения необходимого быстродействия системы ФАПЧ тракт управления разбит на быстрый и медленный каналы. На быстрый модулятор поступает сигнал в полосе до 10 кГц, в диапазоне от -10 до $+10$ В, на медленный модулятор – в полосе до 200 Гц, в диапазоне от -250 до $+250$ В.

В схеме усилителя для быстрого канала увеличение выходного тока достигается подключением к операционному усилителю мощного повторителя напряжения. В канале медленного модулятора для достижения необходимого размаха выходного сигнала применена схема высоковольтного операционного усилителя с двухполупериодным повторителем на выходе [7].

Обеспечение динамических и статических свойств замкнутой системы осуществляется формированием АЧХ электронной части. Желаемый вид АЧХ усилителя обеспечивается введением корректирующих цепей в быстром и медленном каналах. Поскольку линейное преобразование напряжения в частоту дает интегральную зависимость фазы от напряжения, АЧХ замкнутого контура имеет изначальный наклон -20 дБ/дек. Для устойчивого слежения желательно, чтобы АЧХ электронного тракта имела плоский участок, который с добавлением наклона от интегратора преобразуется в участок с наклоном -20 дБ/дек. Этот участок должен находиться на пересечении с осью, т. е. содержать частоту единичного усиления разомкнутого контура.

АЧХ электронной части определяется элементами обратной связи усилителей и интеграторов в тракте быстрого и медленного каналов. Эта характеристика рассчитывается индивидуально, исходя из желаемой характерис-

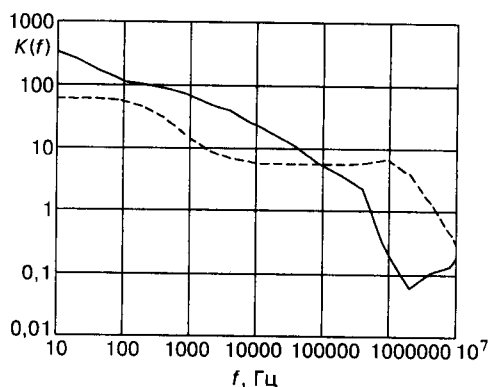


Рис. 3

тики всего тракта: в зависимости от типов применяемых лазеров, характера помех и требуемой точности.

Для системы фазовой привязки частоты двух He-Ne-лазеров в спектрометре сверхтонкой структуры поглощения линий метана [8] соответствующие АЧХ приведены на рис. 3. Сплошной линией показан медленный канал, штриховой – быстрый, суммарная АЧХ соответствует огибающей этих графиков. Здесь учтена разница коэффициентов передачи быстрого и медленно пьезокерамических модуляторов. Добавление интегратора и коэффициента усиления, описывающих объект управления (неэлектронную часть установки), преобразует эти АЧХ в приведенные на рис. 4.

Система испытывалась также для привязки одного CO_2 -лазера к другому (для получения постоянного частотного смещения, необходимого в оптических измерителях расстояний), для фазовой привязки твердотельного лазера с оптической накачкой полупроводниковым лазером [2].

По результатам испытаний можно сделать вывод о соответствии полученных параметров требованиям эксперимента. Так, прототип системы с CO_2 -лазерами при ударных возмущениях $0,01 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ на основание лазера терял фазовую привязку, тогда как новая система ее сохраняет при возмущениях до $0,1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$, и при этом ошибка фазы в пике переходного процесса не

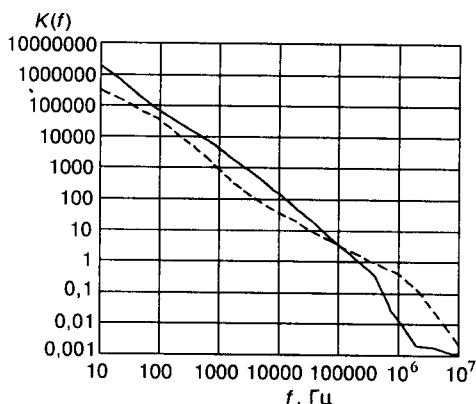


Рис. 4

превышает $0,5\pi$. В условиях акустических помех на уровне шума от работы матричного принтера система обеспечивает поддержание разности фаз с ошибкой менее $0,03\pi$ в акустическом диапазоне. Подавление частотных возмущений определено видом АЧХ разомкнутой системы (см. рис. 4). Система с He-Ne-лазерами обеспечивает привязку фазы с погрешностью не более $2\pi \cdot 10^{-9}$ за время осреднения 10 с и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багаев С. Н. и др. Высокостабильный He-Ne/CH₄-лазер и комплекс аппаратуры для измерения характеристик стабильности его частоты // Тр. метрол. ин-тов СССР. Исследования в области измерений времени и частоты. Л., 1979. С. 46.
2. Bagaev S. N., Belkin A. M., Dychkov A. S. et al. Ultra-stable compact diode-pumped Nd : YAG-laser for precision measurements // QELS. 1995. P. 172.
3. Бессмельцев В. П., Воробьев В. В., Ханов В. А. Стабилизация разностной частоты двухчастотного лазера // Автометрия. 1975. № 5. С. 94.
4. Бессмельцев В. П., Бурнашов В. Н., Воробьев В. В. Вычитатели частот на интегральных логических элементах // Там же. С. 90.
5. Бойко Д. Л., Голяев Ю. Д., Дмитриев В. Г., Кравцов Н. В. Стабилизация автомодуляционных колебаний кольцевого чип-лазера с помощью фазовой автоподстройки частоты // Квантовая электрон. 1988. 25. С. 366.
6. Скворцов Э. К., Цапенко М. П. Фазочастотные преобразования двоичных импульсных последовательностей // Автометрия. 1992. № 6. С. 45.
7. Жмудь В. А., Кирдянов И. Н. Высоковольтный операционный усилитель для пьезо-керамического модулятора длины газовых и твердотельных лазеров // ПТЭ. 1997. № 6. С. 1.
8. Bagaev S. N. Ultra-stable lasers and precision physical experiments // MPLP'97. The Second Internat. Symp. on Modern Problem of Laser Physics. Novosibirsk, Russia, July 28 – August 2, 1997. P. Q1.

Поступила в редакцию 20 августа 1998 г.