

## ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

Обсуждаются пути понижения кратковременной нестабильности частоты лазерного стандарта, приводятся схема и результаты моделирования шумов частоты.

Фундаментальные исследования, направленные на повышение стабильности стандартов частоты, чрезвычайно актуальны. В стандарте частоты, разработанном в Институте лазерной физики (ИЛФ) СО РАН [1; 2] и непрерывно совершенствуемом до настоящего времени, используются три He–Ne-лазера, последовательно связанных с помощью систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (рис. 1). Разность частот генерации первого и второго лазеров задается генератором  $\Gamma_1$ , а генератор  $\Gamma_2$  задает частотное смещение третьего лазера относительно второго для исследования сверхтонкой структуры (СТС).

Высокая стабильность оптической частоты достигается многоступенчатой стабилизацией. Первая ступень привязывает частоту первого лазера  $\nu_1$  к экстремуму поглощения метана без разрешения СТС, частоты второго и третьего лазеров с помощью ФАПЧ последовательно привязываются с заданной разностью частот к частоте первого лазера, а управление этими разностями частот позволяет произвольно менять частоты излучения второго и третьего лазера  $\nu_2$  и  $\nu_3$ . Эти изменения осуществляются системой АПЧ<sub>2</sub> по СТС, которая использует третий лазер для определения величины отстройки его частоты от экстремума резонанса пробным сканированием. Это позволяет определить отклонение частоты  $\nu_3$  от экстремума СТС и свести ее в среднем к нулю управлением частотой генератора  $\Gamma_1$ . В результате окончательно стабилизируется частота второго лазера по СТС, поскольку его частота  $\nu_2$  и управляема (с помощью изменений частоты

генератора  $\Gamma_1$ ), и наблюдаема (так как отстоит от частоты  $\nu_3$  на известную величину частоты генератора  $\Gamma_2$ ). В первый и третий лазеры встроены метановые ячейки, что позволяет стабилизировать частоту по резонансу насыщенного поглощения в них [2].

Поскольку система АПЧ настраивается на экстремум с помощью пробного сигнала частотой 15 кГц, частотный спектр первого лазера уширяется. Хотя долговременная стабильность частоты первого лазера повышается, кратковременная стабильность в результате ухудшается. Полоса отработки системы ФАПЧ<sub>1</sub> меньше частоты пробного сигнала

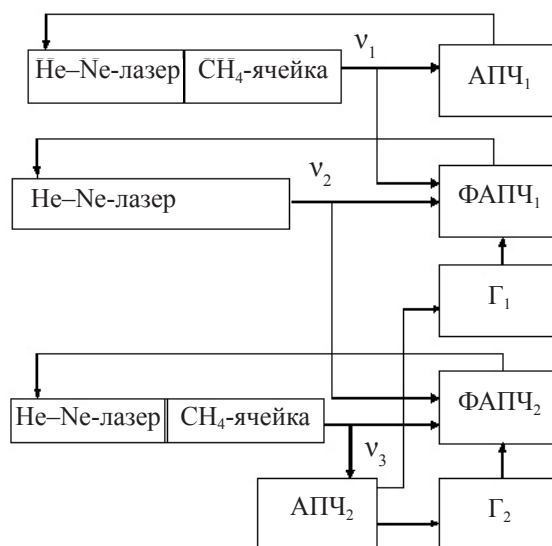


Рис. 1. Функциональная схема лазерного стандарта частоты, стабилизированного по СТС [2]: АПЧ – автоматическая подстройка частоты, ФАПЧ – фазовая АПЧ;  $\Gamma$  – генераторы

(около 2 кГц), поэтому частота второго лазера  $\nu_2$  привязана со смещением на частоту генератора  $\Gamma_1$  к частоте первого лазера  $\nu_1$ . Долговременная стабильность второго лазера совпадает со стабильностью первого, а кратковременная определяется остатком спектра его свободных девиаций. Третий лазер используется для исследования СТС и привязке к его экстремуму «в среднем», т. е. медленной системой АПЧ<sub>2</sub> (в полосе менее 0,2 Гц) второго лазера, а вместе с ним и третьего (поскольку их частоты связаны системой ФАПЧ<sub>2</sub>). Для этого изменяется в нужную сторону частота первого генератора.

Наиболее стабильным получается второй лазер, частота которого не модулируется пробными сигналами АПЧ. Долговременная стабильность этого лазера определяется точностью системы АПЧ<sub>2</sub> по СТС. По высокочастотным девиациям частоты этот лазер не охвачен обратной связью, поэтому кратковременная стабильность его частоты определяется качеством конструкции (звукоизоляцией и т. п.), шумами источника тока и других неконтролируемых факторов. С позиции электронных узлов наибольшее влияние на долговременную стабильность стандарта частоты оказывает синхронный детектор в составе АПЧ<sub>2</sub>, пути снижения погрешностей ко-

торого подробно рассмотрены в [3]. Резервы снижения нестабильности частоты  $\nu_2$  на малых интервалах за счет применения дополнительных систем стабилизации в рассмотренной системе, возможно, не исчерпаны. При любых конечных интервалах осреднения даже кратковременные девиации частоты вносят весомый вклад в результат. Например, на интервале 1 000 с даже если долговременный уход частоты менее 10–14, для демонстрации этой величины фазовая девиация обрабатываемого сигнала не должна превышать 10–11 с на начале и конце интервала. Для частоты генератора  $\Gamma_1 = 1$  МГц получаем верхнюю оценку допустимой девиации  $\sigma = 4,5 \cdot 10^{-5}$  рад, из чего ясно, сколь важно снижение даже кратковременной нестабильности частоты для задачи повышения долговременной стабильности.

Если охватить второй лазер отрицательной обратной связью по частоте, приращенная которой измерены каким-либо способом в широкой полосе частот (например, в области звуковых частот 20 Гц–20 кГц), то кратковременную нестабильность этого лазера можно резко понизить. Современные методы управления [4] позволяют повышать кратковременную стабильность, не ухудшая долговременной за счет разделения управления разнотемповыми переходными процессами, что называется в ли-

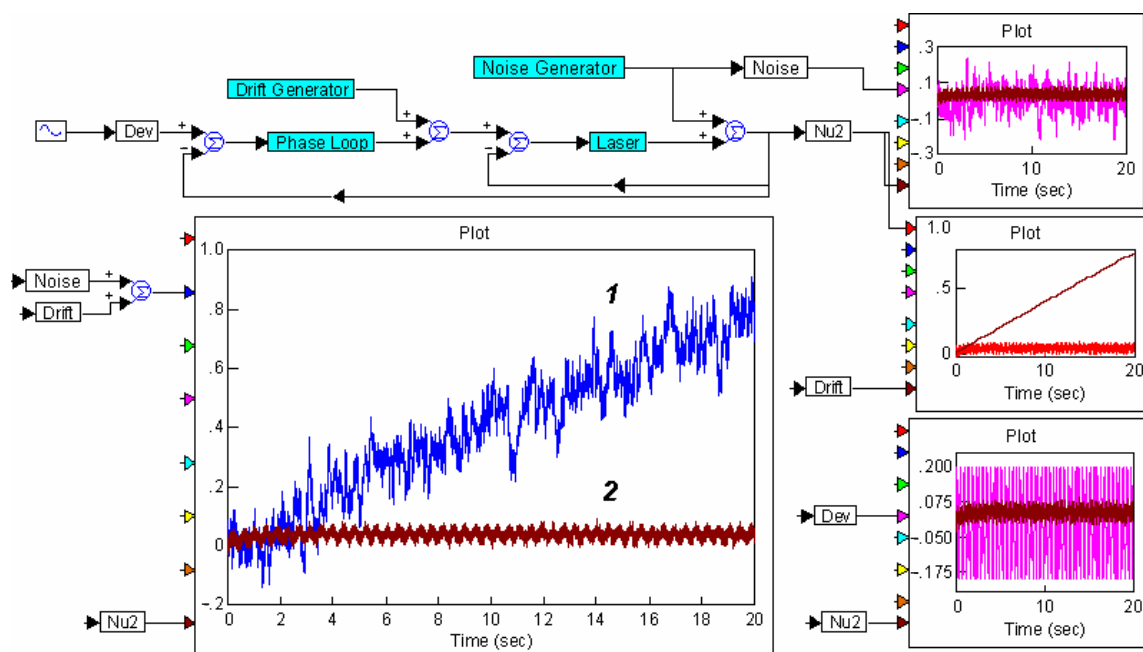


Рис. 2. Модель шумов первых двух лазеров в установке, показанной на рис. 1 (масштаб времени 1000 : 1, «1 sec» → 1 мс): Drift – свободный дрейф частоты нестабилизированного лазера; Dev – пробная девиация 15 кГц; Noise – гауссов шум нестабилизированного лазера; Nu2 – частота второго лазера; 1 – сумма дрейфа и шума; 2 – результирующие девиации частоты в замкнутой системе

тературе «разделением движений в динамической системе» [5]. Детектором высокочастотных девиаций может служить, например, сигнал на склоне характеристики пика пропускания интерферометра (со звукоизоляцией).

Рассмотрим перспективы такого решения на модели частотных шумов этой системы.

Частоту первого лазера, стабилизированного с помощью АПЧ<sub>1</sub>, можно представить как сумму медленно меняющегося дрейфа и помехи на частоте 15 кГц, моделирующей пробную девиацию. Полоса привязки ФАПЧ<sub>1</sub> и ФАПЧ<sub>2</sub>, как правило, известна и составляет 1–2 кГц. Амплитудно-частотная характеристика этой системы также известна и может быть смоделирована. Модель этой части и результаты моделирования в среде VisSim показаны на рис. 2. Здесь для удобства моделирования 1 сек соответствует 1 мс реальной лазерной системы из первых двух лазеров установки рис. 1.

Частоту третьего лазера, стабилизированного с помощью АПЧ<sub>2</sub> по СТС, можно рассматривать как репер с помехой на частоте 1 кГц, а также с гауссовыми шумами известной амплитуды, влияние которых снижается фильтрацией в полосе 0,1–0,2 Гц. Шумы второго лазера могут быть представлены генератором гауссова шума. При моделировании удобно ввести масштаб времени 1 : 1000, т. е. частоты брать в единицах килогерц, а длительность переходных процессов считать в миллисекундах.

Моделированием выявлено, что стабилизация частоты в широкой полосе во внутреннем контуре позволяет заметно снизить высокочастотные шумы второго лазера. При этом сравнивались стандартные отклонения Аллена [6] для частоты  $\nu_2$  с обратной связью и без нее (рис. 3). В этом случае фазовая привязка в ограниченной полосе к первому лазеру подавляет собственный дрейф, а пробная девиация частоты первого лазера практически не передается на второй лазер. Шумы второго лазера приблизительно в шесть раз меньше, чем шумы первого с девиацией и в два раза ниже, чем они были бы в отсутствие внутреннего контура стабилизации.

На основании результатов моделирования можно предложить как метод дальнейшего повышения стабильности частоты следующие модификации в схеме рис. 1: второй лазер охватить дополнительной широкополосной обратной связью по частоте (дрейф датчика нестабильности частоты значения не имеет).

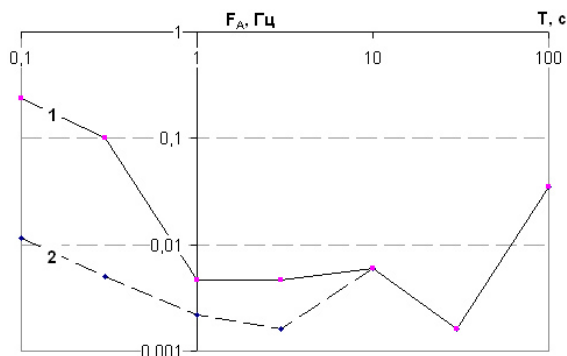


Рис. 3. Модельная зависимость ФА от  $\tau$  для лазера, нестабилизированного по ВЧ-шумам (1), и для лазера с такой стабилизацией (2)

В третьем лазере, как и в первом, используется встроенная  $\text{CH}_4$ -ячейка, но, возможно, для этого лазера внешняя ячейка предпочтительна, поскольку если пробная модуляция вызывает изменения мощности излучения, не связанные с поглощением ячейки, это порождает дополнительный сдвиг, который никакими электронными средствами компенсировать невозможно. При использовании внешней ячейки сигнал, пропорциональный мощности излучения на входе в ячейку, целесообразно использовать для обратной связи в контуре стабилизации мощности.

В силу дискуссионного характера статьи методы реализации физической части установки не обсуждаются.

### Список литературы

1. Багаев С. Н. и др. Высокостабильный He–Ne/ $\text{CH}_4$ -лазер и комплекс аппаратуры для измерения характеристик стабильности его частоты / С. Н. Багаев, А. К. Дмитриев, В. П. Чеботаев и др. // Исследования в области измерений времени и частоты: Тр. метрол. ин-тов СССР. Л., 1979. С. 46–51.
2. Дмитриев А. К. Разработка и создание транспортируемого репера частоты с точностью воспроизведения 10–14. Госуд. науч.-техн. программа «Фундаментальная метрология»: Сб. отчетов за 1995 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 1995. С. 128–130.
3. Жмудь В. А. Прецизионные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. Новосибирск, 2005. 152 с.
4. Востриков А. С., Воевода А. А., Жмудь В. А. Сохранение и повышение по-

рядка асимптотического уравнения системы при управлении по методу разделения движений // Науч. вестн. НГТУ. 2006. № 1 (23). С. 3–9.

5. *Геращенко Е. И. Геращенко С. М.* Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. М.: Наука, 1975.

6. *Рютман Ж.* Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭИР. 1978. Т. 66, № 9. С. 70–102.

*Материал поступил в редколлегию 22.03.2007*