

2. ГОСТ 632–80. Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия.

3. Миронченко В. И. Автоматизация контроля геометрических параметров изделий. М.: ФГУП «ГосНИП «Расчёт», 2011.

4. Иванов А. А., Миронченко В. И., Мицуро Р. Т. Родин В. М., Шишов В. Н. Автомат бесконтактного контроля на-

ружных резьб // Измерительная техника. 1991. № 9. С. 31–32.

5. ГОСТ 8.050–73. ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.

6. СанПиН 5894-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

Дата принятия: 15.12.2017.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

519.688, 621.373.826, 53.082.54

Минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера с помощью интерферометра Маха–Цендера на основе волокна с сохранением поляризации

А. Б. ПНЕВ, А. В. БОРИСОВА, Я. А. ДЕНИСОВА, К. В. СТЕПАНОВ, А. А. ЖИРНОВ, А. О. ЧЕРНУЦКИЙ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия,
e-mail: apniov@gmail.com, thefrost@list.ru

Предложено устройство для измерений фазовых шумов с использованием интерферометра Маха–Цендера, все волоконные элементы которого выполнены на основе волокна с сохранением состояния поляризации. Это позволяет не применять в устройстве опорный источник излучения и таким образом значительно снизить стоимость установки. В устройстве формируются два интерференционных сигнала от ортогонально поляризованных волн, разделяемые затем поляризационным демультиплексором, что устраняет влияние внешних шумов на результат измерения. Описан алгоритм вычисления фазового шума и приведена оценка влияния температурной неустойчивости. Для оценки работоспособности установки и алгоритма обработки сигнала выполнено сравнение вычисленных и заданных при моделировании характеристик фазового шума.

Ключевые слова: фазовый шум, волокно с сохранением поляризации, интерферометр Маха–Цендера, лазер, относительный шум интенсивности, спектральная плотность мощности.

A scheme for measuring phase noise using a PM-fiber based Mach-Zehnder interferometer is proposed. Two interference signals from orthogonally polarized waves are formed in the scheme, which subsequently are separated by a polarization demultiplexer. This allows to avoid the influence of external noise on the measurement result. An algorithm is described for calculating phase noise and the effect of temperature instability is estimated. In order to assess the operability of the scheme and the signal processing algorithm, the comparison is made of the calculated values of the phase noise and the values specified in the simulation.

Key words: phase noise, PM-fiber, Mach-Zehnder interferometer (MZI), relative intensity noise (RIN), power spectral density.

Фазовый шум лазера представляет флуктуации фазы излучения и количественно характеризуется спектральной плотностью мощности

$$R_{\varphi}(f) = |F\{\varphi(t)\}|^2 / T,$$

где $F\{\varphi(t)\}$ – Фурье-образ флуктуации фазы; $\varphi(t)$ – динамика изменения фазы интерференционного сигнала; T – период измерений.

Часто можно встретить определение фазового шума как корня из спектральной плотности:

$$S_{\varphi}(f) = \sqrt{R_{\varphi}(f)} = \sqrt{|F\{\varphi(t)\}|^2 / T}.$$

Основным источником фазового шума лазера является квантовый шум, связанный со спонтанным излучением активной среды и оптическими потерями. Возможным источником также может стать технический шум, возникающий из-за вибра-

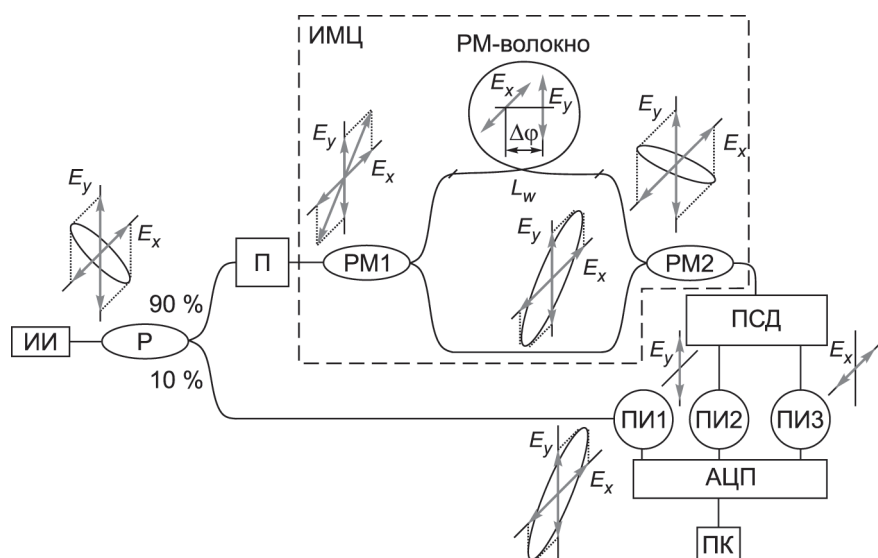


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

ИИ – источник излучения (исследуемый лазер); Р – разветвитель; П – поляризатор; РМ1, РМ2 – разветвители с сохранением состояния поляризации; РМ-волокну – оптическое волокно с сохранением поляризации; ПСД – поляризационный светоделитель; ПИ1, ПИ2, ПИ3 – приёмники излучения соответствующих каналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

ций зеркал резонатора или температурных флуктуаций [1]. Фазовый шум конкретного лазера может значительно отличаться от заявленного производителем. Так, в спецификации для лазеров Koheras BASIK (NKT Photonics, Дания) содержатся графики типичных спектральных характеристик фазовых шумов. Также приводятся максимальные значения фазового шума на частотах 1; 10; 100; 1000 Гц, которые отличаются от типичных значений примерно на 10 дБ. Характеристики шума и стабильность лазерного источника зачастую являются ключевыми с точки зрения устройств, создаваемых на основе лазеров, например, в установках для измерений линейных и угловых перемещений [2] или фазочувствительного рефлектометра [3, 4]. Эти ключевые параметры могут значительно влиять на распознавание сигналов [5, 6] и на погрешности измерений, поэтому в состав указанных устройств необходимо включать блок, измеряющий спектральную плотность фазового шума.

Известны интерферометрические способы измерения фазового шума со схемой обратной связи, обеспечивающие удержание рабочей точки интерферометра в области квадратуры [7, 8]. Однако такие установки имеют сложные схемы, и их необходимо калибровать. Также существуют схемы с опорным высокостабильным источником излучения, применение которого увеличивает стоимость установки в целом [9].

В предлагаемом авторами настоящей статьи устройстве, в отличие от рассмотренных в [7–9], используются оптические волокна, сохраняющие состояние поляризации (РМ-волокна), и поляризационный демультиплексор. Достоинство данной установки заключается в отсутствии референтного источника и уменьшении количества приёмных каналов, что значительно снижает её стоимость. Установку можно рассматривать как два

интерферометра для независимых состояний поляризации. Однако фактически интерферометр один, поэтому на оба выходных интерференционных сигнала влияют одинаковые внешние условия: флуктуации температуры и давления, вибрации. Перечисленные внешние воздействия – достаточно медленные процессы, следовательно, обе интерферограммы будут коррелировать между собой. Данный факт позволяет применить высокочастотную фильтрацию при цифровой обработке и, тем самым, компенсировать влияние шумов интерферометра на результат измерения фазового шума. При этом также можно избавиться от нечувствительности и нелинейности, которая характерна для устройств с одним интерферометром без обратной связи.

Схема установки для измерения фазовых шумов приведена на рис. 1. Установка содержит следующие функциональные элементы: источник излучения ИИ – исследуемый лазер; разбалансированный интерферометр Маха–Цендера ИМЦ; поляризатор П; делитель по состоянию поляризации (поляризационный светоделитель ПСД); приёмники излучения ПИ1, ПИ2, ПИ3; аналого-цифровой преобразователь АЦП и блок обработки данных (персональный компьютер ПК). Все волоконные компоненты в схеме выполнены из оптического РМ-волокна.

Излучение лазера поступает на Y-образный разветвитель Р. Часть (10 %) излучения сразу поступает в приёмник излучения. Принятый сигнал используется в алгоритме обработки при компенсации шумов интенсивности лазерного источника. Большая часть (90 %) излучения источника, проходя через поляризатор П, поступает в разбалансированный интерферометр Маха–Цендера. Поляризатор необходим для получения линейной поляризации на входе в интерферометр.

Направление вектора напряжённости электрического поля поляризованного излучения отклонено на 45° относительно быстрой и медленной осей РМ-волокна. Следовательно, по волокну распространяются две ортогональные составляющие E_x , E_y с разными скоростями. Так как интерферометр разбалансированный, то между параллельными составляющими появляется разность фаз, обусловленная прохождением через волокно длиной L_w . Также в связи с различием показателей преломления для E_x , E_y -составляющих возникает запаздывание одной составляющей относительно другой (дополнительная разность фаз).

Интерферометр состоит из двух Y-образных разветвителей. Длина волокна, обеспечивающего смещение рабочей точки интерферометра, составляет 70 см, что соответствует оптической разности хода 1 м. Это позволяет измерять фазовые шумы, нормированные на единицу оптического пути. Аналогично частотному дискриминатору интерферометр преобразует малые изменения частоты в изменения интенсивности, которые далее преобразуются приёмниками в изменения

фототока и, соответственно, напряжения. После интерферометра сигнал поступает в поляризационный светоделитель ПСД, который позволяет разделить излучение на выходе интерферометра на ортогонально поляризованные составляющие. Сигналы приёмников излучения оцифровываются при помощи АЦП, после чего поступают в персональный компьютер для обработки. Полученные интерференционные сигналы можно описать следующей системой:

$$\begin{aligned} I_x &= [I_{\text{вх}}(t) + I_{\text{вх}}(t) \cos(2\pi \nu(t) \Delta_1(t)/c)]/2; \\ I_y &= [I_{\text{вх}}(t) + I_{\text{вх}}(t) \cos(2\pi \nu(t) \Delta_2(t)/c)]/2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_{\text{вх}}(t)$ – сигнал на входе в интерферометр; $\nu(t)$ – частота лазера; c – скорость света; $\Delta_1(t)$, $\Delta_2(t)$ – оптические разности хода лучей в плечах интерферометра для ортогональных составляющих E_x , E_y , соответственно.

Оптические разности хода можно определить из выражений

$$\Delta_1(t) = n_x L_{\text{в}};$$

$$\Delta_2(t) = n_y L_{\text{в}} = (n_x + \Delta n) L_{\text{в}};$$

$$\Delta n = \lambda / (BL),$$

где $L_{\text{в}} = 0,7$ м; λ – длина волны лазера (в данном случае $\lambda = 1550,12$ нм); n_x , n_y – показатели преломления медленной и быстрой осей, соответственно; Δn – разность показателей преломления для ортогональных составляющих; $BL = 3 \dots 5$ – длина биений (параметр РМ-волокна, определяющий расстояние, при прохождении которого разность фаз между ортогональными поляризованными модами равна 2π).

Внешние шумы и помехи в виде вибраций, перепадов давления и температуры оказывают влияние на чувствительный интерферометр Маха–Цендера, т. е. вносят дополнительный переменный сдвиг фазы интерференционного сигнала за счёт изменения оптических разностей хода лучей в плечах интерферометра для каждой ортогональной составляющей $\Delta_i(t)$. Флуктуации фазы в основном лежат в области низких частот (до единиц герц). В связи с этим можно выделить общий для двух спектров частотный диапазон и с использованием высокочастотной фильтрации компенсировать низкочастотные шумы интерферометра.

Для данного интерферометра было оценено влияние температуры. Для расчётов выбран лазер с длиной волны $\lambda_1 = 1550,12$ нм ($f_1 = 193,40$ ТГц), что соответствует 34-му каналу сетки ИТУ-лазеров С-диапазона. Температурная нестабильность вызывает изменение оптической длины волокна и, следовательно, изменение разности плеч интерферометра:

$$\Delta = (\alpha_{\Lambda} + \alpha_n)(n + \Delta n) L_{\text{в}} \Delta T,$$

где α_{Λ} – тепловой коэффициент расширения ($\alpha_{\Lambda} = 0,55 \cdot 10^{-6}$ для плавленого кварца); α_n – термооптический коэффициент ($\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6}$ для длины волны $\lambda = 1550,12$ нм) [11].

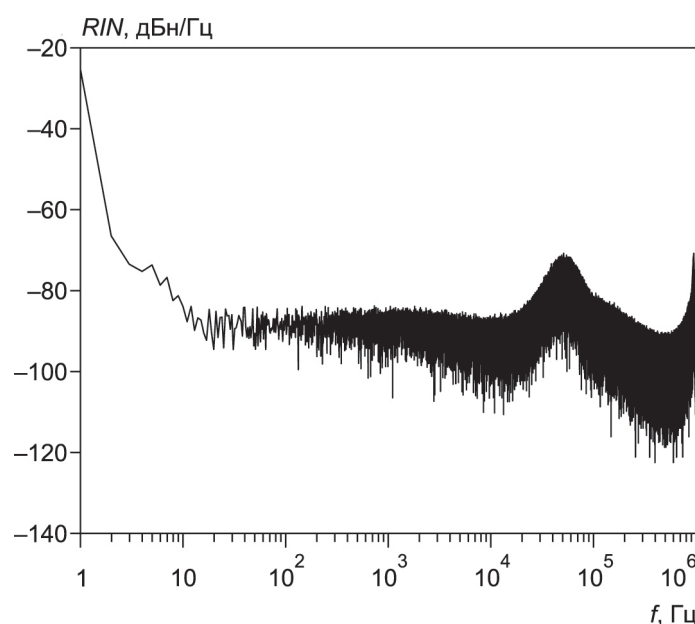


Рис. 2. Заданная модель относительного шума интенсивности RIN лазера

При нестабильности температуры всего $0,1$ °С изменение фазы сигнала составит

$$\Delta \varphi = 2\pi \Delta / \lambda = 1,42\pi.$$

При вычислении фазового шума необходимо также учитывать флуктуации выходной мощности лазера. Поэтому в предлагаемом устройстве присутствует отдельный канал для измерений мощности лазера, сигнал которого используется для нормировки интерференционных сигналов и расчёта относительного шума интенсивности RIN .

В процессе моделирования и проверки работоспособности приведённого ниже алгоритма были заданы относительный шум интенсивности и фазовый шум лазера, представленные на рис. 2, 3 (показаны чёрным цветом). Также задана возможная динамика изменения температуры в процессе измерений. Проанализировано влияние уровня шума интенсивности на погрешность вычисления фазового шума. Результаты представлены на рис. 4 в виде графиков отклонения относительной погрешности вычисления для различных уровней RIN от этой же погрешности при шуме с RIN , приведённом на рис. 2.

Также оценена ширина спектра лазера, фазовые шумы которого можно измерять с помощью предлагаемой установки. Для корректной работы изменение фазы интерференционного сигнала из-за вариаций частоты за время измерений при условии постоянства температуры не должно превышать π . Тогда при оптической разности хода 1 м данное условие можно описать выражением

$$\Delta \varphi = 2\pi n L_{\text{в}} \Delta \nu / c = 2\pi \cdot 1 \cdot \Delta \nu / (3 \cdot 10^8) \leq \pi.$$

Отсюда следует, что максимально допустимый дрейф частоты за время измерений T составляет

$$\Delta\nu_{\max} = 3 \cdot 10^8 / 2 = 150 \text{ МГц.}$$

Если $T=10$ с, то можно измерять фазовые шумы лазеров, скорость дрейфа частоты которых не превышает 900 МГц/мин.

Нижний порог изменения частоты, которое можно зарегистрировать с использованием разработанной установки, определяется отношением сигнал–шум, при этом сигнал обусловлен мощностью лазера и контрастом интерференционного сигнала. Источниками шума являются приёмники излучения и АЦП. Рабочий диапазон применяемого 14-разрядного АЦП составляет ± 3 В, при этом шумы приёмников в темновом режиме лежат в диапазоне 1–6 отсчётов АЦП.

Регистрируемый полезный сигнал напряжения $U(t)$ согласно формуле (1) пропорционален $\cos\{2\pi\nu(t)\Delta_1/c\}$. Изменение напряжения при допущении постоянства оптической разности хода выражается как

$$\Delta U(t) \sim \sin\{2\pi\nu(t)\Delta_1/c\} 2\pi\Delta\nu(t)\Delta_1/c,$$

где $\Delta\nu$ – изменение частоты в интервале между соседними отсчётами АЦП.

Минимальное изменение полезного сигнала должно превышать уровень шума приёмника, следовательно, справедливо неравенство

$$\sin\{2\pi\nu\Delta_1/c\} 2\pi\nu\Delta_1/c \geq N/S_{\max},$$

где $N=6$ – уровень шума приёмника, выражаемый числом отсчётов АЦП; $S_{\max}$ – уровень полезного сигнала, также выражаемый числом отсчётов АЦП.

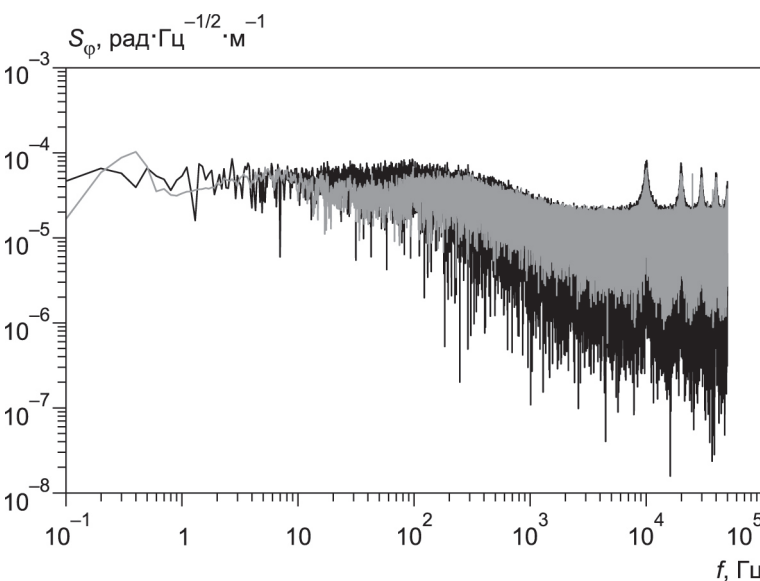


Рис. 3. Исходный (чёрный) и вычисленный (серый) фазовые шумы

При полном использовании динамического диапазона АЦП, т. е. для $S_{\max}=2^{13}$ отсчётов АЦП ($+3$ В), минимально регистрируемое изменение частоты лазера составляет

$$\Delta\nu_{\min} \geq \frac{N}{S_{\max}} \frac{c}{2\pi\Delta_1} \frac{1}{\sin(2\pi\nu\Delta_1/c)} = \frac{6}{2^{13}} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 1} \cdot \frac{1}{0,5} \approx 0,07 \text{ МГц.}$$

С учётом монохроматической чувствительности s_λ используемых приёмников излучения на длине волны 1550 нм и нагрузочного сопротивления R , а также суммарных потерь α_Σ на всех элементах устройства (выраженных в децибелах), можно установить требование к мощности лазерного излучения на входе в интерферометр (после поляризатора):

$$P_{\text{вх}} = 2U_{\max} \cdot 10^{0,1\alpha_\Sigma} / s_\lambda R,$$

где $U_{\max}$ – максимальное напряжение.

При $U_{\max}=3$ В, $s_\lambda=0,95$ А/Вт, $R=3,3$ кОм, $\alpha_\Sigma=1,5$ дБ требуемая мощность составит $P_{\text{вх}}=2,7$ мВт.

Таким образом, динамический диапазон изменений частоты, регистрируемый на предлагаемой установке, определяется отношением полезного сигнала к шуму приёмников, контрастом интерференционного сигнала, зависящим от точности разветвителей и от потерь в плечах интерферометра. При моделировании также было рассчитано среднее квадратическое значение относительной погрешности вычисления фазового шума, которое составило 25 %.

Приведём алгоритм определения фазового шума.

1. Получение данных от приёмников излучения и запись их в массивы I_x , I_y , I_l интенсивностей интерференционных сигналов для составляющих x , y и излучения лазера после деления на разветвителе l , соответственно.

2. Компенсация амплитудной нестабильности источника: определение коэффициента пропорциональности, отвечающего за соотношение средних потоков от лазера, падающих на приёмники ПИ1, ПИ3 (см. рис. 1) по формуле

$$k_1 = \langle I_x \rangle / \langle I_l \rangle;$$

вычитание из интерференционного сигнала (из массива I_x) интенсивности I_l излучения лазера, приведённой к I_x при умножении на рассчитанный коэффициент пропорциональности k_1 , т. е.

$$I_x^{(K)}(t) = I_x(t) - k_1 I_l(t);$$

получение гармонической составляющей в чистом виде (без, множителя интенсивности) при делении на временной сигнал приёмника ПИ3 в виде

$$I_x^{(r)}(t) = I_x^{(K)}(t) / k_1 I_l(t).$$

3. Получение спектров интерференционных картин с помощью быстрого преобразования Фурье – массивов данных F_x , F_y .

4. Анализ фурье-спектров в области низких частот (до единиц герц).

5. Высокочастотная фильтрация: подавление фурье-спектров в области, где спектры сигналов от ортогональных компонент совпадают.

6. Получение фильтрованных временных реализаций интерференционного сигнала I_x^Φ , I_y^Φ с помощью обратного преобразования Фурье.

7. Вычисление флуктуации фазы источника как аргумент оставшегося массива по формуле

$$\Phi_1 = \arcsin[I_x^\Phi(t)].$$

8. Вычисление спектральной плотности мощности колебаний фазы путём возведения в квадрат модуля прямого преобразования Фурье от массива фаз и нормировки его на время реализации T :

$$R_\varphi(f) = S_\varphi^2(f) = \frac{|F[\Phi_1]|^2}{T} = \frac{\Delta t_d^2}{T} \left| \sum_{n=1}^N I_x^\Phi(n) e^{-i\omega n} \right|^2.$$

9. Нахождение фазовых шумов как корень из спектра их мощности:

$$S_\varphi(f) = \sqrt{\frac{\Delta t_d^2}{T} \left| \sum_{n=1}^N I_x^\Phi(n) e^{-i\omega n} \right|^2}.$$

Для оценки эффективности работы приведённого алгоритма обработки сигнала было выполнено сравнение вычисленного фазового шума с исходным (заданным при моделировании) и найдена погрешность вычислений (см. рис. 3). Рассчитанный фазовый шум согласуется с заданным, что свидетельствует о высокой работоспособности предложенной установки для измерения фазового шума и алгоритма его вычисления.

Заключение. Разработана установка для измерения фазовых шумов на основе поляризационного разделения без использования опорного источника и схемы обратной связи. На данной установке можно проанализировать два интерференционных сигнала и согласно представленному алгоритму обработки скомпенсировать шумы интерферометра и интенсивности лазера. Оценено влияние флуктуаций температуры на интерференционную картину и результаты измерений. По описанному алгоритму рассчитана спектральная плотность фазового шума, построен её график и выполнено сравнение с заданной плотностью при моделировании спектральной плотности фазового шума. По результатам сравнения установлена высокая работоспособность предложенной измерительной установки и алгоритма обработки сигнала.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.577.21.0224, уникальный идентификатор RFMEFI57716X0224).

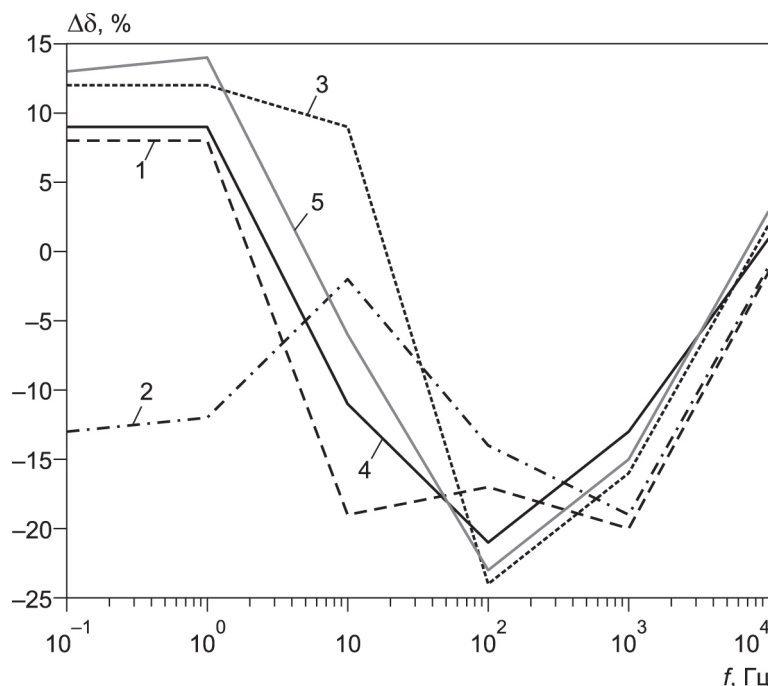


Рис. 4. Изменение относительной погрешности измерения фазового шума при уровнях относительного шума интенсивности 0,001RIN; 0,1RIN; 10RIN; 100RIN; 1000RIN – линии 1–5, соответственно

Л и т е р а т у р а

1. **Paschotta R.** Encyclopedia of laser physics and technology. V. 1. Berlin: Wiley-vch, 2008.
2. **Гришин С. Г., Телешевский В. И.** Анализ фазовых шумов в гетеродинной интерферометрии с акустооптическим преобразованием частоты света // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 17–21.
3. **Wang Y., Jin B., Wang Y., Wang D., Liu X., Bai Q.** Real-Time Distributed Vibration Monitoring System Using Phi-OTDR // IEEE Sensors J. 2017. V. 17. No. 5. P. 1333–1341.
4. **Pnirov A., Zhirnov A., Shelestov D., Stepanov K., Nesterov E., Karasik V., Laporta P., Galzerano G., Taccheo S., Piroddi L., Norgia M., Pesatori A., Svelto C.** Yb, Er: glass Microlaser at 1,5 μm for optical fibre sensing: Development, characterization and noise reduction // Acta IMEKO. 2016. V. 5. No. 4. P. 24–28.
5. **Fedorov A. K., Anufriev M. N., Zhimov A. A., Stepanov K. V., Nesterov E. T., Namiot D. E., Karasik V. E., Pnev A. B.** Note: Gaussian mixture model for event recognition in optical time-domain reflectometry based sensing systems // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. No. 3. P. 036107. DOI: 10.1063/1.4944417.
6. **Makarenko A. V.** Deep learning algorithms for signal recognition in long perimeter monitoring distributed fiber optic sensors // Machine Learning for Signal Processing (MLSP): IEEE 26th International Workshop on, Vietri sul Mare. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/MLSP.2016.7738863.
7. **Williams K. J., Dandridge A., Kersey A. D., Weller J. F.,**

Yurek A. M., Tveten A. B. Interferometric measurement of low-frequency phase noise characteristics of diode laser-pumped Nd: YAG ring laser // Electronics Lett. 1989. V. 25. P. 774–776. DOI: 10.1049/el:19890523.

8. Meng Z., Hu Y., Xiong S., Stewart G., Whitenett G., Culshaw B. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd: YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer // Appl. Opt. 2005. V. 44. No. 17. P. 3425–3428. DOI: 10.1364/AO.44.003425.

9. Pnev A. B., Stepanov K. V., Dvoretzkiy D. A., Zhirnov A. A., Nesterov E. T., Sazonkin S. G., Chernutsky A. O., Shelestov D. A., Fedorov A. K., Svelto C., Karasik V. E. Minimization of errors in narrowband laser phase noise measurements based on reference measurement channels // Intern. J. Advanced Biotechnology and Research. 2016. V. 7. No. 4. P. 1445–1451.

Дата принятия: 03.11.2017.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.373.82

Минимизация нестабильности водородных стандартов частоты на длительных интервалах времени

В. И. ВАСИЛЬЕВ

Нижегородское научно-производственное объединение им. М. В. Фрунзе, Н. Новгород, Россия, e-mail: vvladich@yandex.ru

Приведён обзор результатов исследований нестабильности частоты выходного сигнала водородного стандарта частоты. Рассмотрены причины увеличения нестабильности в интервалах измерения более 1000 с. Исследовано влияние температуры окружающей среды и геомагнитного поля. Изложена методика компенсации дрейфа частоты с помощью периодической коррекции.

Ключевые слова: водородный стандарт частоты, водородный мазер, нестабильность частоты, температурный коэффициент частоты, дрейф частоты.

The review of research results of frequency instability of the hydrogen frequency standard output signal is presented. The reasons for increasing instability in the measurement interval more than 1000 s are considered. Dependences on ambient temperature and geomagnetic field are investigated. The procedure of the frequency drift compensation by using a periodic correction is presented.

Key words: hydrogen frequency standard, hydrogen maser, frequency instability, temperature coefficient of frequency, frequency drift.

В ряду серийно выпускаемых высокостабильных генераторов водородный стандарт частоты (ВСЧ) обладает высочайшей стабильностью частоты выходного сигнала в интервалах времени измерения τ от 1 с до нескольких суток. Основой ВСЧ является водородный мазер (Н-мазер) в режимах генерации или усиления, поэтому стандарты данного типа называют либо активными (АВСЧ), либо пассивными (ПВСЧ). Они входят в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012, вторичных и рабочих эталонов, а также применяются для проверки или синхронизации различных источников электрических колебаний.

Для ряда практических применений ВСЧ наиболее важна долгосрочная нестабильность частоты выходного сигнала. Например, в настоящее время в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» поставлена задача разработки хранителя единицы времени и частоты со средне-

квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКДО) на уровне $1\text{--}2 \cdot 10^{-16}$ при интервалах времени измерения более 10^5 с.

Предельная нестабильность частоты ВСЧ. Фундаментальной причиной нестабильности частоты Н-мазера при $\tau \geq 100$ с является тепловое излучение стенок СВЧ-резонатора в возбуждаемую моду. Существующая оценка долговременного СКДО частоты для АВСЧ связана с характеристиками спектральной линии Н-мазера [1]:

$$\sigma(\tau) = (1/Q_n) \sqrt{kT_p / (2P_a \tau)},$$

где Q_n – добротность спектральной линии водорода; k – постоянная Больцмана; T_p – абсолютная температура СВЧ-резонатора мазера; P_a – мощность индуцированного излучения атомов водорода, рассеиваемая в резонаторе.

На основании уточнённого рассмотрения продольной и поперечной релаксаций квантовой системы в [2, 3] была получена