

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СЛИЧЕНИЙ HE-NE/¹²⁷I₂ ЛАЗЕРОВ

Ю.П.Мачехин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора
ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

Рассматриваются вопросы проведения сличений стабилизированных по частоте He-Ne/¹²⁷I₂ лазеров в различных условиях. Показано, что имеющаяся практика проведения ключевых сличений лазеров не использует опорное значение. В то же время приведены аргументы о целесообразности применения опорного значения при проведении внутренних сличений лазеров, входящих в состав группового эталона.

The matters of conducting comparisons of frequency-stabilized He-Ne/¹²⁷I₂ lasers under different conditions are considered. The available practice of conducting the key comparisons of lasers doesn't use the base value. The arguments of advisability of the base value application at conducting the internal comparisons of the lasers, which are components of the group standard, are also adduced.

Введение

Технической основой "Соглашения о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами" (MRA) [1] являются результаты ключевых сличений, проводимых Консультативными комитетами (КК), Международным бюро мер и весов (МБМВ) и региональными метрологическими организациями. Ключевые сличения позволяют установить степень эквивалентности национальных эталонов через опорное значение этих сличений. Степень эквивалентности выражается количественно через величину отклонения от опорного значения ключевого сличения и через неопределенность этого отклонения [2]. Для эталонов, не принимавших участие в ключевых сличениях КК и МБМВ, прослеживаемость к опорному значению достигается через участие в региональных ключевых сличениях [3, 4].

Процедуры, используемые при проведении и оценке результатов ключевых сличений, выбирают таким образом, чтобы они позволили достигнуть максимальной надежности и однозначности интерпретации полученных результатов. Кроме того, эти процедуры должны учитывать также особенности и характеристики самих эталонов. В зависимости от характеристик эталонов ключевые сличения разделяют на две группы. В первую группу ключевых сличений включаются эталоны, созданные

на основе квантовых эффектов и имеющие долгосрочную стабильность, а во вторую – эталоны, для которых нельзя предположить долгосрочную стабильность [5].

В настоящее время среди первичных эталонов Украины к первой группе относятся несколько эталонов единиц основных физических величин, два из которых, кроме того, представляют собой групповые эталоны, то есть группу однородных средств измерительной техники. Это – государственный эталон единицы времени и частоты, базирующийся на четырех водородных генераторах, и государственный эталон единицы длины, основу которого составляет комплекс лазерных источников (КЛИ), состоящий из трех He-Ne/¹²⁷I₂ лазеров [6].

В настоящей статье обсуждаются особенности и специфика проведения сличений национальных эталонов единицы длины и их влияние на использование результатов этих сличений при организации работы и хранения КЛИ государственного эталона единицы длины Украины.

Особенности сличения национальных эталонов единицы длины

В соответствии с определением метра 1983 г. [7] и рекомендациями по его реализации [8], широко применяемыми источниками меры длины стали стабилизированные по частоте He-Ne/¹²⁷I₂ лазеры с $\lambda=633$ нм. Поэтому основными сличениями эталонов в области длины, после принятия нового определения метра, стали сличения стабилизированных по частоте He-Ne/¹²⁷I₂ лазеров.

Как правило, международные сличения этих лазеров организовывались таким образом, что в них обязательно участвовал лазер, представляющий МБМВ. Как правило, это был лазер ВІРМ-4 [9]. Стабильность и абсолютное значение частоты этого лазера постоянно контролируются в МБМВ. Как правило, для этих целей используется радиооптический частотный мост. Однако, в последнее время стала активно развиваться и применяться техника измерения абсолютного значения частот лазеров, основанная на использовании спектра излучения фемтосекундных лазеров [10].

В рекомендациях МКМВ о порядке проведения ключевых сличений [11] обращается внимание на необходимость установления связи каждого эталона с опорным значением ключевых сличений

МКМВ. В каждом конкретном случае алгоритм реализации такой связи будет иметь свои особенности, обусловленные характером воспроизведения физической величины и условиями передачи ее размера другим средствам измерений.

Для ключевых сличений лазеров этот порядок установлен и реализован в следующей схеме [12]. Значение ν_{ref} частоты лазера МБМВ, участвующего в ключевых сличениях, считается известным, поскольку оно измерено абсолютным способом и принимается за опорное значение этих сличений. Это первая особенность ключевых сличений лазеров, которые проводились в течение последних 15-ти лет. Однако надо отметить, что с широким применением фемтосекундной техники измерение абсолютного значения частот лазеров будет осуществляться независимо от сличений, и поэтому возможно проведение сличений по схеме, когда опорное значение вычисляется по результатам проведенных сличений [2].

Степень эквивалентности d_i частоты i -го лазера, участвующего в сличениях, определяется по результату измерения разности частоты ν_i i -го лазера и частоты ν_{ref} лазера МБМВ:

$$d_i = |\nu_i - \nu_{ref}|.$$

В этом случае стандартная неопределенность значения частоты i -го лазера определяется с помощью неопределенности измерения степени эквивалентности d_i и неопределенности опорного значения:

$$u^2(\nu_i) = u^2(d_i) + u^2(\nu_{ref}),$$

где знак (+) указывает на отсутствие корреляции результатов измерений.

Степень эквивалентности любой пары лазеров, участвовавших в сличениях, определяется через разность их измеренных частот:

$$d_q = \nu_i - \nu_j \quad \text{или} \quad d_q = d_i \pm d_j.$$

Неопределенность результата измерения степени эквивалентности частот двух лазеров определяется как

$$u^2(d_q) = u^2(\nu_i) + u^2(\nu_j).$$

В отличие от измерения степени эквивалентности i -го лазера, когда разность частот берется по модулю, при вычислении степени эквивалентности пары лазеров необходимо учитывать, как частоты лазеров располагаются относительно опорной частоты, с одной стороны или по разные стороны. Фактически для выявления этой особенности (как расположены частоты относительно друг друга) необходимы только групповые сличения, без которых все измерения позволяют определять только модуль значения разности частот лазеров.

Таким образом, полученное в процессе ключевых сличений значение частоты излучения лазера ν_i и неопределенность этого значения $u(\nu_i)$ явля-

ются основой для передачи абсолютного значения размера единицы длины другим лазерам, входящим в КЛИ.

Внутренние сличения лазеров, входящих в состав КЛИ государственного эталона единицы длины

В общем случае порядок выполнения процедур по хранению КЛИ государственного эталона единицы длины включает в себя как основную составляющую регулярные внутренние сличения лазеров КЛИ. С помощью этих сличений устанавливается связь между лазерами КЛИ и осуществляется установление размера единицы длины, который хранит групповой эталон КЛИ. В соответствии с действующими правилами хранения КЛИ, которые были разработаны в период создания эталона, значение размера единицы длины определяется через среднее значение частоты излучения всех лазеров, входящих в состав КЛИ, то есть

$$\nu_{et} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \nu_i. \quad (1)$$

Это значит, что КЛИ как групповой лазерный эталон воспроизводит и хранит меру длины, которая определяется через среднее значение частот всех лазеров, входящих в его состав. Однако, абсолютные значения частот всех лазеров КЛИ определяются через их внутренние сличения. При этом только для одного лазера из КЛИ, который участвовал в ключевых сличениях, известно абсолютное значение его частоты ν_i (индекс i указывает на номер, под которым лазер участвовал в ключевых сличениях).

Результаты внутренних сличений трех лазеров КЛИ можно представить в следующем виде:

$$|\nu_1 - \nu_2| = \overline{\Delta\nu_{12}};$$

$$|\nu_2 - \nu_3| = \overline{\Delta\nu_{23}};$$

$$|\nu_1 - \nu_3| = \overline{\Delta\nu_{13}}.$$

При этом $\overline{\Delta\nu_{ij}}$ является средним значением экспериментально зарегистрированного сдвига между частотами ν_i и ν_j лазеров i и j , определенное в соответствии с методикой [13] по группе пиков d , e , f , g . Частота одного из лазеров КЛИ (в рассматриваемом случае это будет лазер 1) известна из результатов ключевых сличений, в которых он участвовал: $\nu_1 = \nu_i$; частоты остальных лазеров определяются через частоты $\overline{\Delta\nu_{ij}}$ и известную частоту ν_1 следующим образом:

$$\nu_2 = \nu_1 \pm \overline{\Delta\nu_{12}};$$

$$\nu_3 = \nu_1 \pm \overline{\Delta\nu_{13}}.$$

Знаки (+) или (-) определяются по величине $\overline{\Delta\nu_{23}}$ [13] и фактически устанавливаются, где располагаются частоты лазеров 2 и 3 по отношению к

частоте лазера 1. Таким образом, по результатам внутренних сличений устанавливается однозначная связь между частотами всех лазеров, входящих в КЛИ. Среднее значение частоты, хранимое эталоном в соответствии с правилами хранения, определяется как

$$v_{\text{et}} = v_1 \pm \frac{1}{3}(v_{12} \mp v_{13}).$$

При таком расчете предполагается, что поведение стабилизированной частоты у каждого лазера имеет одни и те же характеристики и вклад от каждого лазера в хранимое значение v_{et} соответственно одинаковый.

Однако, в аналогичной ситуации ключевых сличений, когда осуществляют расчет опорного значения, учитывают степень влияния каждого участника ключевых сличений на формирование опорного значения. Разработанная методика расчета опорного значения ключевых сличений [2] предусматривает в качестве объективной оценки значения величины, установленной в процессе ключевых сличений, использовать значение, которое вычисляется как средневзвешенное, учитывающее неопределенность измерения каждого значения:

$$v_{\text{et}} = \sum_{i=1}^3 v_i \omega_i, \quad (2)$$

где $\omega_i = u^{-2}(v_i) / \sum_{i=1}^3 u^{-2}(v_i)$; $u(v_i)$ – неопределенность измерения частоты i -го лазера. Т.е., если считать, что неопределенность измерения частоты у каждого лазера одна и та же, то тогда формула (2) переходит в формулу (1). Однако, поведение лазеров в процессе их хранения может оказаться не совсем прогнозируемым, что в итоге приводит к расширению неопределенности значения частоты лазеров. По этой причине качество хранения необходимо оценивать по величинам, учитывающим реальное состояние каждого лазера. С этой целью целесообразно использовать средневзвешенное значение результата сличений лазеров группового эталона, которое определяется как

$$v_{\text{et}} = (v_1 u^{-2}(v_1) + (v_1 \pm \overline{\Delta v_{12}}) u^{-2}(v_2) + (v_1 \pm \overline{\Delta v_{13}}) u^{-2}(v_3)) / \left(\sum_{i=1}^3 u^{-2}(v_i) \right),$$

или, после упрощения выражения и с учетом того, что $d_i = d_{\text{ref}i}$,

$$v_{\text{et}} = v_{\text{ref}} \pm d_{\text{ref}1} \pm (\overline{\Delta v_{12}} u^{-2}(v_2) \pm \overline{\Delta v_{13}} u^{-2}(v_3)) / \left(\sum_{i=1}^3 u^{-2}(v_i) \right).$$

Следовательно, основное влияние на значение величины v_{et} оказывают только процессы хранения и внутренних сличений лазеров через неопределенность измерения разностных частот между лазерами КЛИ.

Так же, как по результатам ключевых сличений устанавливается абсолютное значение частот лазеров и их неопределенность, по результатам про-

ведения внутренних сличений КЛИ устанавливается связь между частотами лазеров и рассчитывается неопределенность хранимого эталоном значения частоты v_{et} :

$$u^2(v_{\text{et}}) = u^2(v_{\text{ref}}) + u^2(d_{\text{ref}1}) + (u^2(\overline{\Delta v_{12}}) u^{-2}(v_2) + u^2(\overline{\Delta v_{13}}) u^{-2}(v_3)) / \left(\sum_{i=1}^3 u^{-2}(v_i) \right).$$

Заключение

Существующий порядок проведения сличений стабилизированных по частоте He-Ne/¹²⁷I₂ лазеров позволяет установить связь между национальными эталонами через лазер ВРМ-4, принадлежащий МБМВ. В настоящее время – это единственный подход, позволяющий осуществить поддержание единства измерений и передачу размера единицы длины посредством стабилизированных по частоте лазеров. Опорное значение для таких сличений не вычисляется, как это рекомендуется в [2], а устанавливается равным значению частоты лазера ВРМ-4. Аналогичным образом происходит процедура сличения лазеров в составе группового эталона КЛИ государственного эталона единицы длины Украины, когда один из лазеров участвовал в международных сличениях, в процессе которых и установлено абсолютное значение его частоты. Частоты остальных лазеров из состава КЛИ определяются посредством сличения с лазером, участвовавшим в международных сличениях. Для группового эталона КЛИ установлена величина частоты, которая хранится эталоном и вычисляется как усредненное по всем лазерам значение частоты. В статье расчет этой величины предлагается осуществлять исходя из подхода, основанного на расчете опорного значения для группы сличаемых друг с другом эталонов. В этом случае можно будет оценивать влияние каждого лазера, входящего в состав КЛИ, на формирование хранимого эталоном значения частоты и тем самым своевременно устанавливать критическое состояние лазеров, когда возникает потребность в их дополнительном техническом обслуживании. Таким образом, предлагаемый подход позволяет осуществлять с единых позиций не только внутренние сличения лазеров КЛИ (и тем самым устанавливать связь всех лазеров КЛИ), но и формировать опорное значение, хранимое эталоном, а также устанавливать связь между хранимой эталоном величиной и опорным значением ключевых сличений.

Список литературы

1. Mutual Recognition Arrangement (MRA), 14 October 1999, http://www.bipm.org/enus/8_Key_Comparisons/mra.html
2. Cox M.G. The evaluation of key comparison data // Metrologia. -2002. -39. -P. 589–595.
3. Квинн Т.Дж. Руководство по ключевым сличениям эталонов, проводимым консультатив-

- ными комитетами //Измерительная техника. - 1998. -№ 8. -С. 69-72.
4. Квинн Т.Дж. Взаимное признание национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки, выдаваемых национальными метрологическими институтами //Там же. -1998. -№ 5. -С. 67-71.
 5. Харитонов И.А., Чуновкина А.Г. Некоторые предложения к регламенту обработки результатов измерений ключевых сличений RMO в области измерений ионизирующих излучений //Математические методы для расчета неопределенности измерений: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. семинара. -С.-Пб.: ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, 2004. -С. 76-78.
 6. Зимокосов Г.А., Мачехин Ю.П., Оголюк В.П. и др. Государственный первичный эталон единицы длины //Український метрологічний журнал. -2001. -Вип. 4. -С. 39-45.
 7. BIPM Com. Cons. Def. Metre, 1982, 7, M 57 and Documents Concerning the New Definition of the Metre //Metrologia. -1984. -19. -P. 167-168.
 8. Recommendation CCL3 (BIPM Com. Cons. Long., 10th Meeting, 2001) adopted by the Comite International des Poids et Mesures at its 91st Meeting as Recommendation 1 (CI-2002).
 9. Quinn T.J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) //Metrologia. -2003. -40. -P. 103-133.
 10. Lea S.N., Rowley W.R.C. et al. Absolute frequency measurements of 633 nm iodine – stabilized helium-neon lasers //Metrologia. -2003. -40. -P. 84-88.
 11. Guidelines for CIPM key comparisons (Appendix A to Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, Technical Report, International Committee for Weights and Measures, 1999).
 12. Quinn T.J. Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992) //Metrologia. -1994. -30. -P. 523-541.
 13. Мачехин Ю.П. Основные принципы передачи размера единицы длины путем сличения лазеров //Український метрологічний журнал. -2001. -Вип. 2. -С. 43-46.