УДК 520.234.7

РЕГИСТРАЦИЯ МУАРОВЫХ ПОЛОС ПРИ НАСТРОЙКЕ МАКЕТА ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА БЕСКОНЕЧНО ШИРОКУЮ ПОЛОСУ

© 2007 г. **А. В. Багров***, доктор физ.-мат. наук; **А. Г. Серегин****, канд. техн. наук; **Г. Н. Виноградова*****, канд. техн. наук; **К. В. Улитин***; **И. В. Голов******

* Институт астрономии РАН, Москва

E-mail: abagrov@inasan.ru

** НПК "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: alexgseregin@mail.ru

*** Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

**** Государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург

Рассмотрен механизм формирования муаровых полос при некогерентном сложении монохроматических картин в звездном интерферометре ОЗИРИС. В макете интерферометра исследованы спектральные картины полос при изменении разности хода. Приведены результаты регистрации муаровых полос для исходной настройки макета интерферометра на бесконечно широкую полосу.

Коды OCIS: 230.0230, 120.3180, 120.6200, 350.6090.

Поступила в редакцию 23.04.2007.

Введение

Звездные интерферометры обеспечивают наивысшую точность астрометрических измерений, но их проведению сильно мешает земная атмосфера. Астрономическое применение интерференции на зрачке оптического инструмента началось уже в начале XX века [1], а в 30-х годах В.П. Линник успешно использовал изготовленные им инструменты для измерения диаметров звезд [2]. При этом им был достигнут предел, допускаемый земной атмосферой, для получения интерференции от источника конечных размеров. Почти три четверти века после этого интерференционные методы не применялись в наблюдательной астрометрии в оптическом диапазоне (зато активно использовались в радиодиапазоне, где методами радиоинтерферометрии достигнута точность позиционных измерений порядка 1 миллисекунды дуги).

С началом применения космических инструментов для астрономических исследований появилась возможность существенно повысить точность позиционных измерений космических источников в оптическом диапазоне спектра. С 70-х годов XX века в США группы исследователей начинают разработку космических интерферометров POINTS [3] и Newcomb [4] и космического интерферометра SIM [5]. В нашей стране подобные исследования были начаты только в 1996 г. [6]. К этому времени Европейским космическим агентством была уже успешно проведена миссия HIPPARCOS, в результате которой точность полученного каталога положений звезд была повышена на порядок по сравнению с наземными измерениями [7]. Оценочные расчеты показали, что с космическим оптическим интерферометром можно достичь точности единичного измерения еще на три порядка более высокой, поэтому при разработке астрометрического инструмента нового поколения была сразу определена задача достижения микросекундной точности угловых измерений.

Интерферометр Майкельсона позволяет измерить угол между волновым фронтом звезды и направлением базы интерферометра. Поскольку ориентация базы прибора в космосе не может быть не только определена с необходимой точностью, но даже зафиксирована в пространстве, требуется применение двух интерферометров с известным взаимным расположением баз, чтобы иметь возможность вычислить длину дуги между наблюдаемыми интерферометрами источниками. В первом варианте нашего прибора была применена идеология POINTS [3]: два интерферометра дополнялись системой внутренней метрологии, позволяющей измерить взаимное пространственное расположение баз. Однако вскоре нами было найдено простое решение, позволяющее реализовать общую базу для обоих интерферометров-дугомеров и отказаться от громоздкой системы внутренней метрологии (рис. 1).

В новой версии дугомера длина дуги между звездами *1* и *2* определяется простой суммой углов ψ_1 и ψ_2 между волновыми фронтами W_1, W_2 и общей базой B интерферометров *1* и *2*. Существенным моментом является необходимость измерений при неподвижной базе, т. е. за время, в течение которого изменение ориентации базы не превысит точности измерений.

Одной из главных проблем звездной метрологии является надежность нахождения нулевой разности

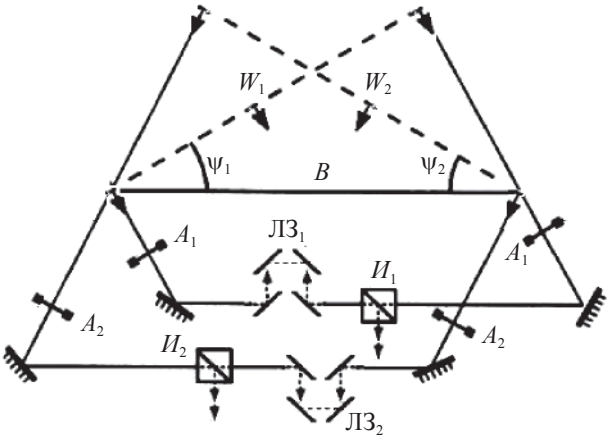


Рис. 1. Схема дугомера-интерферометра ОЗИРИС с общей базой. W_1, W_2 – волновые фронты от двух звезд *1* и *2*; $И_1$ и $И_2$ – интерферометры с общей базой B; ψ_1 и ψ_2 – углы между волновыми фронтами W_1, W_2 и общей базой В интерферометров; A_1 и A_2 – входные апертуры интерферометров; ЛЗ$_1$ и ЛЗ$_2$ – линии задержки интерферометров.

хода с помощью линии задержки (ЛЗ) при наведении на заданный опорный звездный источник (ЛЗ$_1$ и ЛЗ$_2$). Если в звездном интерферометре Майкельсона обеспечить с помощью управления оптической ЛЗ нулевую разность хода, то при некотором угле между интерферирующими пучками каждая спектральная монохроматическая составляющая образует картину полос соответствующего периода [8].

В точке с нулевой разностью хода они все суммируются, в результате чего образуется ахроматическая светлая или темная полоса. При увеличении разности хода из-за разности периодов монохроматических составляющих полосы приобретают цвет, механизм когерентного сложения постепенно вырождается и начинает действовать механизм некогерентного сложения. При разности хода 3–4 мкм цветных полос практически не видно, между тем для нормальной работы звездного интерферометра разность хода не должна превышать сотых долей микрометра. Выполнить это требование трудно, особенно если учесть, что ЛЗ должна работать в автоматическом режиме.

Если на выходе интерферометра ввести дисперсионный элемент, то в зависимости от его спектрального разрешения происходит монохроматизация падающего широкополосного излучения. На выходе такого сочетания интерферометра со спектрометром возникает особый вид картины спектра, пересеченного темными полосами. Такую картину еще в XIX веке впервые наблюдали Физо и Фуко [9]. Впоследствии таким же приемом пользовались многие авторы, называя эти полосы каналовым или канализированным спектром, а также полосами равного хроматического порядка. В последние годы появилось новое название, отражающее реальную суть этого явления. В этом случае очевидно когерентное формирование монохроматических картин полос, диапазон видности которых определяется спектральным разрешением спектрометра. В то же время некогерентное сложение периодических распределений интенсивности в монохроматических картинах приводит к появлению суммарного муара. Такой эффект в последние годы использовался в двухволновой и трехволновой интерферометрии для контроля асферических поверхностей без компенсатора.

Для широкополосных звездных источников этот способ используется, в частности, для расширения динамического диапазона нахождения положения подвижного зеркального компонента в линии оптической задержки звездного интерферометра типа Майкельсона вблизи нулевой разности хода интерферирующих пучков.

Механизм формирования муаровых полос при некогерентном сложении монохроматических картин

Реальные природные широкополосные, например, звездные, источники света в каждом из спектральных компонентов излучают хаотическую последовательность более или менее длинных волновых цугов. Поэтому мы можем рассматривать реальное излучение как совокупность большого числа монохроматических компонентов (теорема Фурье), имеющих разные частоты.

Пусть свет от источника, используемого в интерференционном эксперименте, разлагается с помощью какого-либо спектрального прибора (призма, дифракционная решетка) на множество монохроматических пучков. Поскольку процесс собственно излучения не является периодическим, в результате мы получим “сплошной” спектр, т. е. набор монохроматических компонентов, частоты которых непрерывно заполняют некоторый спектральный диапазон. Каждая спектральная линия первичного источника создает свою интерференционную картину, распределение интенсивности от разности хода Δ в которой описывается формулой

$$I(\Delta) = 2I_0(1 + \cos k\Delta). \qquad (1)$$

Закон аддитивного сложения интенсивностей спектральных компонентов в интервале волновых чисел (k, $k + dk$) определяется как

$$I(\Delta) = 2\int I_1(k)(1 + \cos k\Delta)dkI. \qquad (2)$$

где $I_1(k)$ – спектральное распределение интенсивности источника, $I_1(k)dk$ – интенсивность одного из интерферирующих пучков в интервале волновых чисел (k, $k + dk$).

Для любого излучения, занимающего спектральный диапазон δk, длину когерентности $l = 2\pi/\delta k$ всегда можно принять за некоторую эффективную протяженность волновых цугов. При таком подходе две возможные интерпретации исчезновения интерференционных полос при больших разностях хода (в рамках представлений о хаотической последовательности волновых цугов конечной протяженности или о наложении интерференционных картин, создаваемых отдельными монохроматическими компонентами в спектре излучения) оказываются эквивалентными [10].

Выделив свет одной из этих линий с помощью светофильтра или монохроматора, можно использовать его для наблюдения, например, полос равного наклона в интерферометре Майкельсона. Оказывается, что интерференционные полосы видны очень отчетливо, когда оптические длины путей обоих интерферирующих пучков примерно одинаковы. Если отодвигать одно из зеркал так, чтобы разность хода Δ пучков постепенно увеличивалась, видность полос уменьшается (в общем случае немонотонно) и в конце концов интерференционные полосы исчезают совсем.

Введение разности хода между пучками эквивалентно задержке одного из них во времени, поэтому способность световых колебаний в одной точке исходного пучка к интерференции после его разделения на два пучка и последующего их соединения с некоторой разностью хода называется временной когерентностью. Максимальная разность хода, при которой возможна интерференция, называется длиной когерентности излучения $l_{\text{ког}}$, а соответствующее ей запаздывание – временем когерентности $\tau_{\text{ког}} = l_{\text{ког}}/c$.

Условие временной когерентности световых колебаний можно записать в виде $\Delta < l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$.

Уменьшение когерентности световых колебаний с увеличением временной задержки, т. е. уменьшение видности интерференционных полос при возрастании разности хода, связано с конечной шириной спектральной линии источника квазимонохроматического света. Такое излучение можно рассматривать как совокупность не скоррелированных между собой отдельных монохроматических волн, частоты которых сплошь заполняют некоторый интервал $\delta\omega$, малый по сравнению со средней частотой ω.

Каждая монохроматическая волна из этой совокупности создает в интерферометре свою картину полос, и полное распределение освещенности, как и в приведенном ранее примере, определяется сложением этих картин.

При малых разностях хода интерферирующих лучей (порядка нескольких длин волн) положение полос в картинах, создаваемых отдельными монохроматическими составляющими, практически одинаково. Поэтому полосы суммарной картины отчетливы. По мере увеличения разности хода отдельные монохроматические картины полос смещаются одна относительно другой из-за различия в длинах волн, и в конце концов суммарная картина оказывается полностью размытой.

Оценить разность хода, при которой происходит исчезновение полос, можно следующим образом. Примем, что отдельные монохроматические компоненты равномерно заполняют спектральный интервал шириной $\delta\omega$ (“прямоугольный” спектральный контур линии). Если разделить мысленно этот интервал на множество пар бесконечно узких спектральных линий, отстоящих по частоте на $\delta\omega/2$, т. е. на $\delta k/2$ по шкале волновых чисел ($k = \omega/c$), то распределение освещенности от каждой пары дается формулой

$$I(\Delta) = 4I_0[1 + \cos(\delta k\Delta/2)\cos k\Delta], \qquad (3)$$

в которой δk (расстояние между монохроматическими компонентами) следует теперь заменить на $\delta k/2$. Полосы в этой картине пропадают при такой разности хода $\Delta_{\max} = l_{\text{ког}}$, когда аргумент первого косинуса в (3) становится равным $\pi/2$. Заменив δk на $\delta k/2$, находим .

$$l_{\text{ког}} = 2\pi/\delta k = \lambda^2/\delta\lambda. \qquad (4)$$

Условие исчезновения полос для всех пар монохроматических компонентов, на которые был разделен спектральный интервал $\delta\omega$, одинаково. Поэтому при разности хода $\Delta = l_{\text{ког}}$ происходит размытие полос полной интерференционной картины.

Формулу (4) можно использовать для оценки длины когерентности и в случае более сложной формы контура спектральной линии квазимонохроматического света, понимая под δk (или $\delta\lambda$) полуширину контура (т. е. ширину на половине высоты). Длине когерентности соответствует максимально возможный порядок интерференции $m_{\max} = \lambda/\delta\lambda = \omega/\delta\omega$, который можно получить в квазимонохроматическом свете со спектральной шириной $\delta\omega$ (или $\delta\lambda$).

Для белого света (солнце, лампа накаливания, дуга с угольными электродами) и визуального наблюдения эффективный диапазон длин волн $\delta\lambda$ простирается приблизительно от 400 до 700 нм, т. е. $\delta\lambda \sim \lambda$. В этом случае $m_{\max} \sim 1$ и интерференционные полосы, казалось бы, наблюдаться не должны. Действительно, приемник излучения, обладающий примерно одинаковой чувствительностью в различных участках спектра, например термоэлемент, покажет при перемещении в поле зрения поперек полос почти равномерное распределение освещенности. Но глаз представляет собой селективный приемник с сильно изменяющейся чувствительностью в зависимости от длины волны, что дает некоторым длинам волн преимущество перед другими [10].

Визуальное наблюдение полос в белом свете облегчается и благодаря способности нашего зрения различать цвет, а не только интенсивность света. Поэтому в белом свете глаз различает около десятка окрашенных интерференционных полос. При равной нулю разности хода, т. е. в тех местах, куда обе интерферирующие волны приходят в одинаковых фазах, условие максимума выполняется для всех длин волн. В этом месте получается ахроматическая (т. е. неокрашенная) светлая полоса. По обе стороны от нее находятся окрашенные максимумы и минимумы, цвета которых постепенно тускнеют по мере удаления от полосы нулевого порядка, а еще дальше поле зрения кажется глазу равномерно освещенным белым светом. Таково происхождение красивых интерференционных цветов в тонких пленках масла или бензина на поверхности воды. Однако в этом случае разность хода имеет один знак и не проходит через нуль. Это уникальное свойство картины интерференции в белом свете позволяет использовать его для устранения $2\pi m$-неопределенности в метрологических системах фазирования составных зеркал адаптивных астрономических телескопов и в линиях задержки звездных интерферометров при определении нулевой разности хода интерферирующих пучков.

Описание установки

Для наблюдения описанного эффекта возникновения муара в спектральной интерференционной картине спектра мы использовали следующую установку (рис. 2) на основе схемы интерференционного измерителя углового положения образцовой пластины.

Имитацией ЛЗ задержки звездного интерферометра служит поворотная стеклянная пластина, на которую нанесены зеркальные покрытия *13* и *14*. Поворот пластины вокруг оси *O*, перпендикулярной плоскости рисунка, увеличивает разность хода в одном из плеч интерферометра и уменьшает в другом. Поворот пластины выполняется с помощью рычажно-зубчатого механизма, позволяющего изменять разность хода с чувствительностью в 1–2 мкм. Диапазон изменения разности хода равен 2 мм. Подвижное зеркало позволяет направить в интерферометр излучение или от лампы *1*, или от лазера *4*.

Отверстие *16* в диафрагме *17*, диаметр которого приблизительно равен диаметру кружка Эри, играет роль пространственного фильтра и используется для юстировки интерферометра и настройки на бесконечно широкую полосу. Зеркала *7*, *10*, *11* и *12* используются для юстировки макета. Подвижный объектив *19* в сочетании с окуляром *20* позволяет наблюдателю видеть изображения в диафрагме *17* и юстировать интерферометр. После юстировки они выводятся из хода лучей.

Диаметр пучка, выходящего из объектива *8* и входящего в объектив *15* на выходе интерферометра, равен 9 мм, расстояние между центрами зеркальных участков *13* и *14* на стеклянной пластине около 130 мм.

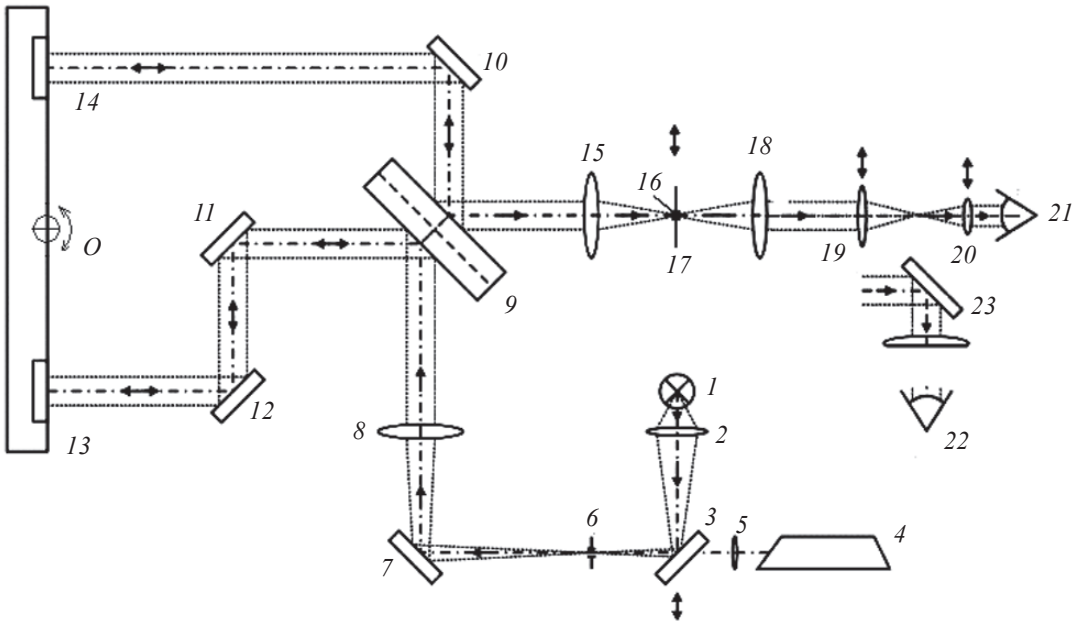


Рис. 2. Макет звездного интерферометра. *1* – лампа накаливания, *2* – конденсор, *3* – зеркало подвижное, *4* – гелий-неоновый лазер, *5* – конденсор, *6* – диафрагма с отверстием, *7*, *10–12* – неподвижные зеркала; *8* – коллимирующий объектив, *9* – полупрозрачная пластина, *13* и *14* – зеркальные участки на стеклянной поворотной пластине, *15* – объектив, *16* – отверстие в диафрагме *17*, диаметр которого приблизительно равен диаметру кружка Эри; *18* – объектив, *19*, *20* – подвижный объектив и окуляр; *21* и *22* – глаз наблюдателя, *23* – диспергирующий элемент.

Результаты

В предыдущей работе [11] мы сравнивали возможности различных дисперсионных устройств для нахождения нулевой разности хода в лабораторном макете звездного интерферометра и оказалось, что наиболее оптимально в качестве диспергирующего элемента для наших целей подходит дифракционная решетка с частотой 500 штр/мм. В результате эффективность поиска интерференционной картины повысилась за счет увеличения на 3 порядка динамического диапазона регистрации муаровых полос. Для минимальной частоты муаровой картины при выводе решетки из хода лучей на выходе интерферометра наблюдались интерференционные полосы белого света с ахроматической белой полосой, соответствующей нулевой разности хода (рис. 3а).

При использовании диспергирующего элемента *23* (рис. 2) происходит разложение света на спектральные компоненты в обоих пучках. На рис. 3б показана интерференционная картина, полученная с узкополосным зеленым фильтром, как пример одного из компонентов, входящих в широкополосный спектр звездного источника.

При работе с муаровыми полосами, соответствующими реальной настройке интерферометра на конечные полосы, как известно, наблюдается одновременное вращение муаровых полос в разные стороны в зависимости от направления смещения из положения нулевой разности хода и соответствующее изменение их частоты.

В настоящей работе мы продолжили исследования и на нашем макете с использованием дифракционной решетки и наблюдали муаровые полосы равного хроматического порядка при настройке на бесконечно широкую полосу для различных значений разности хода (рис. 4). В этом случае оказалось, что картина муаровых полос при наложении двух

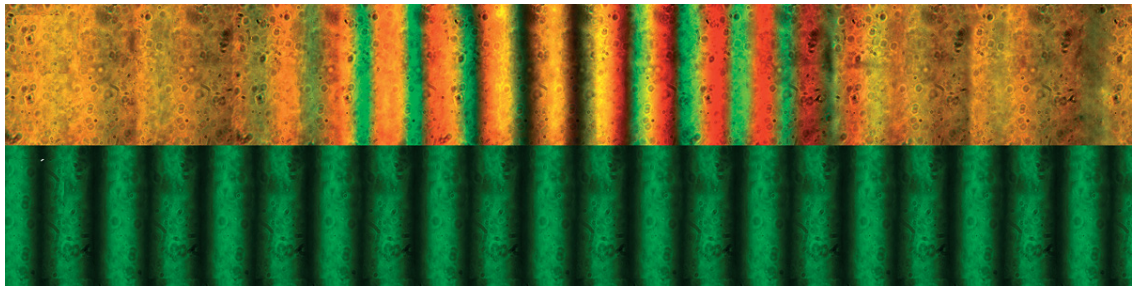


Рис. 3. а – интерференционные полосы белого света с ахроматической белой полосой, б – интерференционные полосы в монохроматическом свете за узкополосным зеленым фильтром.

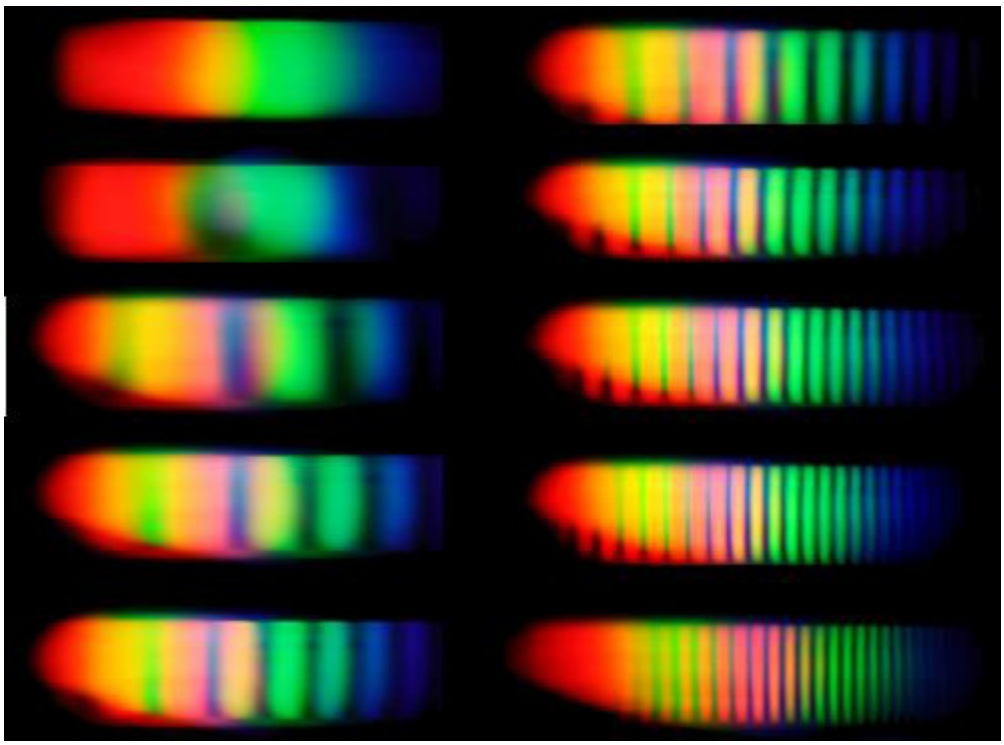


Рис. 4. Картины муаровых полос в макете звездного интерферометра, настроенного с помощью дифракционной диафрагмы на бесконечно широкую полосу, при изменении разности хода от 0 до 100 мкм.

неподвижных спектров от интерферирующих пучков при изменении разности хода изменяется только по частоте полос, а ориентация их остается неизменной. То есть муаровые полосы перпендикулярны спектральной оси, положение которой определяется положением дифракционной решетки. Таким образом, применение дифракционной пространственной фильтрации обеспечивает настройку на бесконечно широкую полосу, что в свою очередь упрощает алгоритм автоматизированной обработки муаровой картины при определении положения зеркального отражателя в линии задержки звездного интерферометра, максимально приближенного к нулевой разности хода.

Для независимой проверки отсутствия эффекта вращения полос при настройке на бесконечно широкую полосу мы повторили эксперименты на интерферометре бокового сдвига ИТ-183. [12] при нулевом сдвиге и получили однозначное подтверждение эффекта бесконечно широкой полосы. Такой же эффект можно получить в схеме, приведенной в [8], при установке щели спектрографа параллельно полосам настройки. В нашем же случае щель не нужна и фактически мы используем преимущество фурье-спектрометра для повышения энергетической эффективности.

Использование интерферометра бокового сдвига ИТ-183 навело нас на представление о спектральной интерферометрии, как интерферометрии бокового сдвига в направлении и пропорционально дисперсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Michelson A.A., Pease F.G., Pirson F.* Repetition of the Michelson-Morley experiment // JOSA. 1929. V. 18. № 3. P. 181–182.
2. *Линник В.П.* Интерференционные астрономические инструменты Пулковской обсерватории // Тр. XI астр. конф. СССР. Л.: ГАО, 1955. С. 270.
3. *Reasenberg R.D. et al.* POINTS: an astrometric spacecraft with multifarious applications. Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II / ed. J.B. Breckinridge // Proc. SPIE. 1994. V. 2200. P. 2–17.
4. *Reasenberg R.D. et al.* Newcomb: a scientific interferometry mission at low cost. Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II / ed. J.B. Breckinridge // Proc. SPIE. 1994. V. 2200. P. 18–26.
5. http://planetquest.jpl.nasa.gov.sim/sim_index.html.
6. *Боярчук А.А. и др.* Космическая оптическая интерферометрия для астрометрии // Космич. исследования. 1999. Т. 37. № 1. С. 3–12.
7. *Perriman M.A.C.* The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission // Noordwijk, Nederlands: ESA Publication Division, 1977, Series: ESA SP Series. 1997. V. 1200. ISBN: 9290923997 (set).
8. *Захарьевский А.Н.* Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
9. *Fizeau H., Foucault L.* Sur le phenomene des interferences entre deux rayons de lumiere dans le cas de grandes differences de marche // C.R. Del L'academie des sciences. 1845. T. 21. C. 1155–1158.
10. *Бутиков Е.И.* Оптика. СПб.: Невский диалект, 2003. 480 с.
11. *Улитин К.В., Начаров А.П., Серегин А.Г.* Разработка лабораторного макета звездного интерферометра ОЗИРИС // Труды конференции "Оптика-2005". СПб., 17–21 октября 2005. С. 187.
12. *Серегин А.Г., Багров А.В., Серегин Д.А., Лебедева Г.И.* // Схемы наведения звездного интерферометра ОЗИРИС и имитатора интерференционного узла светоделителя-спектрографа // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 11. С. 51–56.