

Погрешности высокоточных измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи информации и пути их минимизации

А. И. ГЛАЗОВ, М. Л. КОЗАЧЕНКО, А. Б. СВЕТИЧНЫЙ, С. В. ТИХОМИРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: mkozachenko@vniiofi.ru

Рассмотрены вопросы повышения точности измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передач. Также исследованы эталонные калориметрические системы, работающие в этой области.

Ключевые слова: средняя мощность излучения, волоконно-оптические системы передачи.

The problems of increasing of measurement accuracy of average power of optical radiation in fiber-optic transmission systems and the development of technique of precision calorimetric systems operation in this region are discussed.

Key words: average power radiation, fiber-optic transmission systems.

К настоящему времени в нашей стране завершен ряд разработок высокоточных эталонных систем для воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСП) [1]. Результаты этих исследований и международных сличений [2] позволили сделать определенные выводы об эффективности некоторых технических решений аппаратуры и алгоритмов ее работы, оценить достоинства и недостатки ряда вариантов, проанализировать возможные причины возникновения последних и наметить пути дальнейшего повышения точности измерений в этой области метрологии.

Прежде всего следует отметить быстрое развитие метрологии ВОСП, что находит отражение не только в расширении динамических диапазонов характеристик передаваемого по световодам излучения, но и в увеличении числа их параметров. Это связано с интенсивным поиском наиболее эффективных решений основных задач ВОСП, направленных, главным образом, на рост объемов, скорости и качества передаваемой информации. При этом на первый план выходят, в частности, измерения спектральных и амплитудно-частотных (АЧХ) характеристик излучения. Естественно, что наработки в этой области измерительной аппаратуры, оптических схем, алгоритмов измерительных процессов и методик нашли на практике широкое применение. Поскольку вклад в решение основных задач ВОСП от повышения точности измерений средней мощности оптического излучения не является решающим, то и накопление опыта ее измерений в данной области шло более медленными темпами.

Именно в этом кроются причины недостатков, выявленных в процессе разработки и исследований упомянутых ранее высокоточных систем измерений средней мощности излучения в ВОСП, где при проведении различных метрологических работ основное внимание традиционно уделяют

быстродействию измерительной аппаратуры и подавлению влияния факторов, вызывающих искажения АЧХ передаваемого и измеряемого излучения. При этом оценке некоторых потерь излучения на различных участках и элементах оптических схем и аперттурах применяемой аппаратуры, как правило, не придается особого значения. Такой подход можно считать в определенной степени оправданным при измерениях, например, АЧХ и спектральных характеристик излучения, когда даже значительные потери последнего не вызывают дополнительных погрешностей их измерений. Однако он недопустим при решении задач высокоточного воспроизведения и последующей передачи единицы средней мощности на уровне высшего звена поверочной схемы. При этом следует отметить, что погрешность действующего государственного первичного специального эталона ГЭТ 170—2011, возглавляющего государственную поверочную схему [3] в части воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, начинает уступать достижениям наиболее точных зарубежных эталонов в этой области, оцениваемым в настоящее время уровнями, близкими к 0,01 %, а по некоторым оценкам приближающимися к 0,005 %.

Поэтому, планируя достижение подобной точности для отечественной эталонной базы, следует сделать принципиальный выбор: либо при создании этой базы идти по пути приобретения зарубежной техники, либо, использовать накопленный многолетний опыт и проводить работы самостоятельно. В последнем случае полезно проанализировать применявшиеся ранее технические и схемные построения подобных эталонов и пути решения возникших при этом задач.

Прежде всего отметим, что измерению подлежит средняя мощность оптического излучения в ВОСП, которую, как правило, измеряют не в самом волокне, а на выходе из волоконно-оптического кабеля, где пучок излучения расходится. При этом традиционно полагали, что практически весь

поток излучения на выходе многомодового волоконно-оптического кабеля полностью сосредоточен в пределах угловой апертуры 25—30°, а одномодового волокна — до 15°. Тогда для проведения надежных и достаточно точных измерений какого-либо параметра ВОСП достаточно обеспечить в оптической схеме согласование входной апертуры применяемого средства измерений этого параметра с названной угловой апертурой излучения. Такой подход вполне приемлем при измерениях большинства параметров, характеризующих ВОСП. Однако при высокоточных измерениях именно средней мощности излучения, выходящего из световода, этот же подход может приводить к существенным погрешностям. Дело в том, что в действительности выходящее из световода излучение практически может распространяться в телесном угле вплоть до 180°. Интенсивность излучения в периферийной области этого пучка будет на несколько порядков ниже, чем в названных ранее пределах его рабочей угловой апертуры. Однако в силу значительных размеров периферийной области полной угловой апертуры, занимаемой малоинтенсивным излучением, уровень средней мощности этого излучения в интеграле может характеризоваться весьма существенными значениями, достигающими, по некоторым данным, не только долей, но и единиц процентов средней мощности всего пучка. Поэтому полностью игнорировать возможное негативное влияние такого фактора на погрешности измерений средней мощности излучения в ВОСП, по-видимому, не следует. В стандартах, характеризующих ВОСП, не дается четкого определения значения той угловой апертуры выходящего из световода излучения, которая принимается для характеристики его средней мощности. В этом случае приходится предполагать, что измерению подлежит средняя мощность всего проходящего по световоду и выходящего из него излучения. Из этого, в свою очередь, следует сделать вывод, что при воспроизведении единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП либо должен полностью использоваться весь поток излучения, выходящий из световода эталонной системы в угле 180°, либо, при невыполнении этого условия, исходя из реальной несогласованности угловых апертур излучения и применяемого эталонного приемника, следует проводить экспериментальную или аналитическую оценку потерь излучения с внесением соответствующих поправок в результаты измерений.

При рассмотрении факторов, влияющих на погрешности измерений средней мощности оптического излучения ВОСП, связанных с частичным попаданием последнего в приемный элемент эталонного первичного преобразователя этого параметра, безусловно требуется обращать самое пристальное внимание на состояние и пространственную ориентацию поверхности выходного торца световода. Мельчайшие сколы на этой поверхности или отклонение ее плоскости от перпендикулярности к оси световода могут приводить как к частичному рассеянию выходящего из световода излучения, так и отклонению его оси от оси световода, увеличивая попадание излучения во входное окно приемного элемента эталонного калориметра и связанных с этим его неконтролируемых потерь. Это подтвердили результаты исследований созданных ранее эталонных систем, например, на базе прецизионного полостного калориметрического преобразователя средней мощности оптического излучения ПСМ.ПМ [1]. Поглощающий излучение полостной приемный элемент этого калориметра имеет входное окно диаметром 1,0 мм и расположен в эталонной системе относительно выходного тор-

ца световода таким образом, что выходящий из последнего расходящийся пучок излучения даже при его угловой апертуре, достигающей 60°, полностью перехватывается этим окном. Более того, на окружающий входное окно плоский участок полости диаметром 3 мм нанесено поглощающее покрытие — эмаль АК-243, характеризующаяся коэффициентом поглощения излучения 98 %. С учетом этого участка апертурный угол излучения, выходящего из световода и захватываемого черненной поверхностью приемного элемента калориметра, увеличивается до 124°. Однако при такой надежной защите излучения от неконтролируемых потерь из-за рассмотренных ранее факторов при работе созданных эталонов наблюдались нарушения процессов воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП.

Для повышения уровня защиты от негативного влияния указанных факторов эталонные системы полезно дополнительно оснастить простыми, надежными и регулярно применяемыми вспомогательными устройствами. Сколы и загрязнения на выходной торцевой поверхности световода можно контролировать, например, вводя в световод излучение вспомогательного He—Ne-лазера и наблюдая картину его рассеяния на выходном торце. Для этой же цели, а также для контроля угловой направленности расходящегося пучка на выходе световода можно использовать простейшее устройство на базе обычной, оснащенной фотоприемником и имеющей выходное окно, фотометрической сферы. Применительно к эталонной системе на основе преобразователя ПСМ.ПМ достаточно подобрать в этом устройстве такое соотношение диаметра сферы и ее выходного окна, при котором выходящий из закрепленного в стенке сферы торца световода расходящийся пучок излучения с апертурным углом 60°, будет полностью выходить через это окно. Выполнение этих требований, вытекающих из простейших геометрических зависимостей, в совокупности с простейшей оптической калибровкой фотометрической сферы позволит проконтролировать долю потерь оптической мощности в эталонном калориметре на участке оптической схемы от торца закрепленного в калориметре световода до входного окна поглощающей полости.

Все рассмотренные ранее решения могут привести к положительным результатам лишь при ужесточении требования к соосности световода с окном и полостью приемного элемента эталонного калориметра. На первый взгляд, выполнение этого требования не должно вызывать особых трудностей. Однако, как уже было отмечено ранее, диаметр входного окна приемного элемента калориметра ПСМ.ПМ, успешно использовавшегося в последних разработках эталонных систем, составляет всего 1,0 мм. При этом его центрирование с осью световода осуществляется через цепочку коаксиально расположенных и сочлененных с различными посадочными допусками элементов пассивного термостата, теплоизолирующих и тепловыравнивающих его оболочек и корпуса калориметра. Именно с учетом связанных с этим возможных нарушений соосности световода и окна полости в рассматриваемой эталонной системе апертурный угол выходящего из световода и захватываемого окном приемника излучения был увеличен до 60°, а также была зачернена окружающая окно поверхность полости диаметром 3 мм, что увеличило рабочий апертурный угол до 124°. Как показали проведенные исследования, даже это не гарантировало полного исключения нарушений процессов передачи еди-

ницы средней мощности излучения. Поэтому дальнейшее ужесточение требований к соосности световода и окна приемного элемента в совершенствуемых эталонных системах скорее всего может вызвать соответствующее ужесточение не только конструктивных, но технологических требований.

Завершая рассмотрение неконтролируемых потерь излучения на участке торец световода — окно приемного элемента, следует отметить возможность введения световода в это окно, что практически полностью исключит потери излучения на данном участке. С одной стороны, это связано с еще большим ужесточением требований к соосности световода и окна, поскольку его нарушение при минимизации зазора между краями окна и световодом чревато не только ростом погрешности измерений, но и разрушением как самого световода, так и приемного элемента эталонного калориметра. С другой стороны, расширение этого зазора может привести к значительному увеличению его площади и доли выходящего из полости излучения, а следовательно, к уменьшению ее черноты и эквивалентности замещения.

Сложность поисков оптимальных решений оптических задач при создании эталонных систем для воспроизведения и передачи единицы средней мощности излучения в ВОСП не ограничивается лишь рассмотренным участком оптической схемы от торца световода до окна калориметра. Оптические схемы таких систем кроме эталонных калориметров включают еще и источники излучения, средства прерывания его подачи, разветвители волоконных кабелей на рабочие и контрольные каналы, средства оценки уровня средней мощности излучения в контрольных каналах и многие другие элементы. Можно отметить ряд весьма полезных результатов, которые были получены в процессе исследований вариантов достаточно сложных оптических схем, опробованных при создании высокоточных эталонов средней мощности излучения. В некоторых из этих схем, например, описанных в [3], операции прерывания и разветвления излучения осуществлялись в открытых пучках. С этой целью в специально выполненных разрывах волоконно-оптического кабеля последовательно устанавливали оптические элементы, преобразующие расходящееся излучение на выходе соответствующего участка световода в его открытый параллельный поток, затем в этот поток помещали шторку затвора или делительную пластину, а за ними — оптический элемент, фокусирующий излучение на входной торец следующего фрагмента оптического кабеля. При этом отраженное от делительной пластины излучение также фокусировалось на входной торец световода контрольного оптического канала, работающего с контрольным приемником излучения. Эти результаты подтвердили необходимость тщательного согласования угловых апертур приемников с пространственными параметрами излучения, минимизации как неконтролируемых потерь последнего, так и его частичного возврата в источник излучения.

Рассмотрение влияния оптических факторов и анализ полученных результатов позволяет подтвердить, что работа в области дальнейшего совершенствования оптических схем и их отдельных элементов для вновь создаваемых высокоточных эталонных систем, предназначенных для воспроизведения и передачи единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, по-прежнему актуальна.

Технические решения применяемой эталонной калориметрической аппаратуры для воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, помимо упомянутой ранее точности сборки ее отдельных узлов и применения при этом вспомогательных технологических приспособлений, еще не исчерпала своих возможностей. К ним можно отнести использование активной термостабилизации этой аппаратуры в дополнение к пассивной, например, с помощью вспомогательных термокамер в совокупности с циркуляционными термостатами. Это позволит не только эффективно сглаживать температурные колебания приемных элементов калориметров, но и поддерживать температуру на заданном уровне. Решению задачи повышения термостабилизации эталонной аппаратуры может способствовать частичная роботизация проводимых на эталонном стенде механических операций. Это даст возможность избежать непосредственных контактов обслуживающего персонала с калориметрической аппаратурой, например, при коммутировании выходных элементов световода между эталонными калориметрами разных рангов, а также нарушений температурного режима полости термокамеры при ее периодических вынужденных открываниях и сообщениях с окружающей средой. Как показали результаты исследований, даже простой ввод наконечника световода в посадочное гнездо в корпусе эталонного преобразователя или его удаление из гнезда увеличивает скорость дрейфа нулевого уровня калориметра. Этот фактор также требует проведения тщательных исследований длительности и характера последующих релаксационных процессов, учета их параметров при разработке алгоритмов измерительных операций и их автоматизации. Особое внимание этому фактору придается при размещении торца наконечника световода в створе входного окна поглощающей полости.

Еще одно известное и весьма эффективное техническое решение может быть направлено на радикальное повышение эквивалентности замещения средней мощности измеряемого оптического излучения средней мощностью постоянного электрического тока при калибровке эталонного калориметра. Этого можно достичь размещением эталонного калориметра в компактной вакуумной камере, имеющей герметичные оптический и электрические вводы, и создания вакуума в ее полости. Активная термостабилизация корпуса этой камеры, с помощью циркуляционного термостата поможет параллельно термостабилизировать эталонный калориметр. При этом вакуумирование камеры возможно без применения герметичного входного окна, вносящего значительную неопределенность при оценке уровня средней мощности направляемого на него излучения. Подобный способ был уже применен при разработке государственного первичного эталона единицы средней мощности лазерного излучения [4—7].

Реализация всех или даже части из перечисленных технических решений при совершенствовании эталонных калориметрических систем, в совокупности с успешными решениями рассмотренных ранее оптических задач, может обеспечить дальнейшее планомерное развитие в РФ рассматриваемой области метрологии.

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Метрология и измерительная техника в связи. 1999. № 4. С. 20—24.

2. Tihomirov C. V. e. a. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre power // Metrology. 2000. 37. P. 347—348.

3. ГОСТ 8.575—2005. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и скорости распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации.

4. ГОСТ 8.275—78. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения.

5. Кауфман С. А. и др. Метрологическое обеспечение измерений средней мощности и энергии лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 26—27; Kaufman S. A. e. a. Metrological provisions for measuring the laser-radiation mean power and energy // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N. 11. P. 1319—1322.

6. Загорский Я. Т. и др. Воспроизведение единицы средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 28—30; Zagorskii Ya. T. e. a. Reproduction of the laser-radiation mean-power unit // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N. 11. P. 1322—1325.

7. Ильин А. С. и др. Эталонный первичный измерительный преобразователь средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 38—39; Il'in A. S. e. a. Primary reference measuring transducer // Measurement Techniques. 1979. V. 22. N. 11. P. 1337—1339.

Дата принятия 18.02.2014 г.

535.31:004.932

Восстановление 3D-профиля деформированной металлической пластины методом корреляции фоновых изображений

А. Ю. ПОРОЙКОВ

Национальный исследовательский университет МЭИ Москва, Россия,
e-mail: poroykovAY@gmail.com

Приведены результаты экспериментальных исследований по применению метода корреляции фоновых изображений для восстановления 3D-профиля деформированной поверхности на примере изгиба металлической пластины. Разработан и реализован алгоритм цифровой обработки экспериментальных изображений. Дано сравнение результатов измерений предложенным методом с результатами прямых измерений.

Ключевые слова: метод корреляции фоновых изображений, восстановление 3D-профиля поверхности, кросскорреляционная обработка.

The paper presents the results of experimental studies of application of the image pattern correlation technique (IPCT) for 3D reconstruction of surface profile of deformed metal plate. An algorithm of digital processing of experimental images was developed and implemented. The comparison of IPCT measurement results with the results of direct measurements is presented.

Key words: image pattern correlation technique, reconstruction of 3D surface profile, cross-correlation processing.

В современной науке и технике измерения деформаций уделяется особое внимание. Любой механизм и конструкция при эксплуатации подвергаются различным видам нагрузок, что вызывает деформации узлов и элементов. Измерения деформаций проводятся различными методами, в том числе и оптическими [1, 2]. Современное развитие микроэлектроники и вычислительной техники привело к появлению новых методов измерений деформации, позволяющих проводить их в большем объеме и в более сложных условиях (натурных экспериментах), чем классическими методами, со сравнимой или меньшей погрешностью [3].

Метод корреляции фоновых изображений (МКФИ). Этот оптический метод диагностики деформации (положения, перемещения, изгиба, скручивания и др.) основан на применении цифровых фото- и видеокамер и компьютерной обра-

ботки оптических изображений поверхности по кросскорреляционным алгоритмам [4]. Основные достоинства метода — минимальное количество необходимого для измерения оборудования и использование современной цифровой обработки изображений, что позволяет выполнять измерения в натурных экспериментах [5].

Принципиальная схема установки МКФИ приведена на рис. 1. Алгоритм метода включает следующие этапы последовательных действий.

1. Нанесение фонового экрана на исследуемую поверхность. Фоновый экран — это специальный рисунок, изображение которого регистрируется цифровыми видеокамерами. На практике чаще всего он состоит из черных точек (эллипсов), расположенных случайным образом на белом фоне. Процедура нанесения может проходить путем накле-