

А. В. Перчик, В. Э. Пожар, В. И. Пустовойт,
А. В. Шурыгин

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИИ

Приведен обзор современных акустооптических спектральных приборов, применяемых для решения задач мониторинга состояния окружающей среды. Рассмотрен акустооптический спектрометрический комплекс для мониторинга вод Мирового океана.

E-mail: perchik@bmstu.ru

Ключевые слова: акустооптика, акустооптический фильтр, спектрометр, видеоспектрометр, экологический мониторинг.

Спектральные методы изучения состояния окружающей среды находят широкое применение в задачах экологического мониторинга. При этом используются как лабораторные, так и полевые спектрометрические комплексы, бортовые приборы и аппараты, базирующиеся на авиационных и космических носителях. Спектральные приборы служат для изучения состава атмосферного воздуха, дистанционного зондирования земли, определения состояния вод Мирового океана.

Для решения такого широкого круга задач спектральные приборы должны обладать особыми свойствами. Для работы со слабыми спектральными линиями и в условиях большого фонового излучения необходима большая светосила при высокой спектральной разрешающей способности. Для решения задач количественного определения состава атмосферного воздуха следует обеспечить возможность произвольной спектральной адресации. Полевые и бортовые приборы должны удовлетворять требованиям компактности. Приборы авиационного и космического базирования должны иметь повышенную надежность и не содержать подвижных частей. Подобными свойствами обладают приборы, построенные на основе акустооптических (АО) монохроматоров [1].

АО-монохроматор работает следующим образом [2]: исследуемое излучение дифрагирует на наведенной в кристаллической среде акустической волной объемной дифракционной решетке. Период наведенной решетки, а следовательно, и длина волны оптического излучения, пропускаемого монохроматором, определяются высокочастотным управляющим сигналом, подаваемым на пьезопреобразователь, прикрепленный к кристаллу. В современных приборах для повышения спектрального контраста применяют двойные акустооптические моно-

хроматоры [3], уровень подавления вне полосы пропускания у таких монохроматоров — до 10^{-6} .

Лабораторные акустооптические приборы. В лабораторных исследованиях применяются акустооптические спектрометры, работающие в различных интервалах спектра: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК). Диапазон работы спектрометра определяется свойствами кристалла монохроматора. С помощью данных приборов можно исследовать спектры свечения пропускания или рассеяния объектов.

Для исследования комбинационного (рамановского) рассеяния (КР) применяют приборы серии RAOS совместно с лазерным источником. Излучение лазера рассеивается исследуемым объектом, спектр рассеянного излучения позволяет судить о химическом составе исследуемого образца. Таким способом исследуют пробы воды из различных водоемов.

Для исследования пространственного распределения спектрально контрастных элементов объектов, например тканей живых организмов, разработан микровидеоспектрометр, представляющий собой насадку на оптический микроскоп. С помощью данного прибора можно исследовать отклонения в структуре живых организмов, появившиеся в результате контакта с неблагоприятной окружающей средой. Перестраивая по спектру монохроматор, исследователь получает набор изображений в разных спектральных интервалах для дальнейшей обработки [4]. Проведен ряд исследований биологических тканей и обнаружены спектральные особенности некоторых из них. С помощью ИК-спектрометра RAOS получены спектры пропускания атмосферы, показавшие чувствительность спектров к влажности в ближней ИК-области.

Акустооптические приборы для мониторинга состояния атмосферы. Спектральные АО-устройства применяются в качестве мобильных многофункциональных (перенастраиваемых) спектральных детекторов для получения гиперспектральной информации и быстрой (в реальном времени) избирательной регистрации любой спектральной выборки с высоким пространственным разрешением. В качестве информативных величин могут использоваться линии поглощения атмосферных газов (H_2O , CO_2 , O_3), а также контролируемых газов — загрязнителей атмосферы. Для этого разработаны и обоснованы алгоритмы оптимального адаптивного изменяемого выбора спектральных каналов на основе спектроскопии с произвольной спектральной адресацией.

Для контроля воздуха на промышленных предприятиях разработан газоаналитический АО-спектрометр [5], позволяющий определять наличие различных загрязнителей на уровне предельно допустимых концентраций для жилой зоны. К особенностям спектрометра

относятся: одновременное измерение различных загрязнителей, возможность расширения списка регистрируемых веществ программными средствами, оптимизированный скоростной режим измерений, компактность системы.

Акустооптические методы и приборы для мониторинга состояния вод Мирового океана. Спектральные методы являются чувствительными и информативными методами изучения вод Мирового океана, принцип работы которых основан на различных физических эффектах, таких как абсорбция, комбинационное рассеяние, флуоресценция. Спектр поглощения водной среды позволяет определить тип вод и оценить содержание взвеси и растворенного органического вещества в воде. На основании этих данных делают вывод о гидрологии исследуемого участка океана, его биохимии и биопродуктивности.

Для задач определения состава растворенных веществ и загрязнений в воде более информативными являются методы регистрации рассеяния света.

Для исследований растворенных неорганических солей и газов интерес представляет спектроскопия КР. С помощью КР-спектрометра можно определять содержание основных анионов (карбонатных, сульфатных, фосфатных), а также основных газов (кислорода, азота, сероводорода).

Спектры флуоресценции позволяют исследовать распределение и динамику флуоресцирующей компоненты растворенного органического вещества, а также обнаружить наличие в воде органических загрязнений, в частности углеводов. Возможность неразрушающего контроля вещества в малых объемах с чрезвычайно низким порогом обнаружения, пригодность для раздельного определения веществ в их смеси (селективность), доступность необходимых технических средств — основные достоинства фотолюминесцентных методов анализа, благодаря которым они получили широкое практическое применение. Интерес представляет диапазон, который отвечает длинам волн излучения 200...740 нм, т. е. УФ- и видимой (400...740 нм) областям спектра. ИК-излучение сильно поглощается водой, и поэтому свечение тел в ИК-области не представляет интерес при изучении оптических явлений в Мировом океане. По сравнению с иными типами люминесцентного свечения фотолюминесценция изучена лучше и применяется шире благодаря доступности необходимых технических средств, возможности управлять ее возбуждением и получать информацию о строении и свойствах вещества. Применительно к молекулам органических соединений информативность обусловлена тем, что фотолюминесценция возникает вследствие изменений энергии внешних валентных электронов электронной обо-

лочки молекулы. Они связывают ее части, через них молекула взаимодействует с окружающей средой.

Обычно люминесцентный анализ проводят на образцах или препаратах, предварительно специально подготовленных таким образом, чтобы оптимизировать измерение фотолюминесценции. Особенностью изучения спектральных характеристик вод естественных водоемов (как морских, так и пресных) является отсутствие возможности предварительной подготовки образца, при которой можно свести к минимуму механизмы тушения люминесценции. В первую очередь это относится к механизмам температурного тушения люминесценции.

Измерения фотолюминесценции препаратов, образцов и других статичных разрозненных объектов в лабораторных исследованиях выполняются в условиях, которыми можно управлять, тогда как объектами наблюдений в толще морской воды являются непрерывно распределенные изменчивые субстанции, пребывающие в условиях, не поддающихся воздействию экспериментатора. Фотолюминесцентное определение содержания вещества в морской воде методом зондирования или с использованием погружных спектрометров включает любой способ оптимизации и требует учитывать соотношение оптических свойств определяемой субстанции, самой воды и содержащихся в ней примесей различного происхождения.

Разработан спектрометрический комплекс для мониторинга водной поверхности с борта судна [6], включающий двухканальный АО-спектрометр, мини-спектрометр, пирометр и GPS-приемник. С его помощью в автоматическом режиме регистрировалась спектральная информация о восходящем от поверхности воды излучении. Спектрометр разработан на новой элементной базе с расширенными возможностями. Так, совмещение в нем адаптивного двухкристального АО-спектрометра с мини-спектрометром, дающим грубый спектр, но в реальном масштабе времени, и дистанционным измерителем температуры позволяет существенно увеличить эффективность и достоверность получаемых данных. Испытания измерительного комплекса проводились с борта судна в акватории Азовского моря.

Разработанный комплекс предназначен для измерения с борта судна или самолета спектральной плотности энергетической яркости восходящего от поверхности моря потока излучения в видимом диапазоне спектра и имеет следующие особенности: в качестве спектральных элементов применены двойные АО-монохроматоры; управляющие устройства обеспечивают произвольную спектральную адресацию с точностью до долей полосы пропускания, что позволяет точно прописывать контуры спектральных линий; используемая электроника вместе с многообразным программным обеспечением реализует раз-

личные режимы измерений, а именно регистрацию спектров, временных зависимостей и режим произвольной спектральной адресации.

Кроме того, современная элементная база позволяет значительно сократить размеры аппаратуры, осуществлять предварительную обработку информации непосредственно в приборе, выдавая минимально необходимое количество информации, что важно для оптимизации объема информации в линиях связи и в базах полученных данных.

Дистанционный измеритель температуры и GPS-приемник дополняют спектры сопутствующей информацией: температурой и пространственной привязкой. Мини-спектрометр на основе дифракционной решетки и линейки фотодетекторов обеспечивает регистрацию всего спектра в режиме реального времени. Он работает непрерывно, получая «мгновенную» информацию о спектре с «грубым» разрешением. При регистрации мини-спектрометром исследуемых участков в спектре восходящего излучения включается АО-спектрометр для более детального измерения выделенных участков.

Для исследований были выбраны 16 точек акватории Азовского моря с разными типами водных масс, на которые оказывают влияние стоки рек Дона, Кубани, Обиточной, а также стоки промышленных городов Мариуполя, Бердянска, Темрюка, Ейска. В качестве основной определяемой величины выбран коэффициент спектральной яркости (КСЯ) водной толщи. Для этого проводились измерения трех величин: СПЭЯ водной поверхности, СПЭЯ участка неба, обуславливающей составляющую в яркости водной поверхности вследствие рэлеевского отражения этого участка и СПЭЯ от эталонного внутреннего источника.

Высокая спектральная разрешающая способность аппаратуры и точная привязка выделяемых спектральными каналами участков к шкале длин волн позволили выявить в спектрах и более тонкие эффекты. Так, можно уверенно различить характерные признаки, обусловленные поглощением света пигментами фитопланктона. Кроме того, в ряде спектров проявляется структура, возникающая в результате поглощения хлорофилла. По характерным признакам полученных оптических спектров были оценены концентрации некоторых присутствующих в воде примесей.

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанный спектрометрический комплекс может быть использован для распознавания загрязнения толщи воды выбросами промышленных предприятий, загрязнения поверхности воды нефтепродуктами, количественного определения содержания хлорофилла, распределения желтого вещества и минеральной взвеси в водах морей и океанов, распознавания видов фитопланктона, оценки степени покрытия водоемов растительностью.

Описанный выше спектрометр позволяет регистрировать состояние только поверхностного слоя океана. В то же время загрязнители, смываемые с поверхности суши, могут скапливаться в различных глубинных слоях толщи морской воды. Для получения информации о более глубоких слоях необходимы приборы, которые могли бы определять состояние вод на различной глубине. Такой аппарат может буксироваться судном на необходимой глубине для мониторинга глубинных слоев.

Кроме того, существует задача исследования свойств морских вод в естественных условиях (не воспроизводимых полностью в лаборатории) при высоких давлениях и особых состояниях вещества, например газогидратов.

Новейшей разработкой является спектрометрический комплекс, позволяющий проводить измерения непосредственно в толще воды на месте нахождения буксирующего судна [6]. Особенности данного спектрометра являются небольшие габариты, возможность работы как в автономном, так и в буксируемом режимах. Спектрометр позволяет проводить непрерывный мониторинг состава воды в наиболее важных точках Мирового океана, в том числе с разрешением по глубине.

Спектрометрический комплекс для регистрации спектров люминесценции включает в себя лазерный источник, программируемый светосильный высокочувствительный спектрометр, средства управления и обработки результатов измерений. Комплекс располагается в герметичном корпусе, погружаемом на глубину до 20 м.

Для регистрации оптических спектров используется спектрометр на основе перестраиваемого АО-монохроматора. Такой спектрометр является светосильным, причем его входная апертура на один-два порядка превосходит апертуру современных дифракционных миниспектрометров, используемых в том числе для морских и подводных исследований. Спектрометр является программно-управляемым, причем режим работ может меняться и оптимизироваться непосредственно в процессе эксплуатации комплекса без изменения аппаратной части прибора. Для повышения чувствительности комплекса в спектрометре применен двойной АО-монохроматор.

В качестве лазерного источника использован компактный твердотельный лазер (с длиной волны 532 нм). Излучение лазера с помощью оптической системы направляется в исследуемую среду, рассеянное излучение собирается приемным объективом, а затем фильтруется АО-монохроматором и регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Сигнал с ФЭУ оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя и анализируется на компьютере.

В ходе работ была проведена обработка данных, полученных при испытаниях спектрометрического подводного комплекса. Основой

для анализа являлись спектры рассеянного в толще воды лазерного излучения, зарегистрированные прибором в восьми разных точках акватории Азовского моря. Для каждой географической точки измерения проводились на разных глубинах: от 0,3 м до 6 м. На глубине менее 1 м в получаемых спектрах наблюдается влияние спектра неба, который имеет характерные особенности, позволяющие использовать их для спектральной калибровки комплекса по длине волны. Одной из таких особенностей являются линии Фраунгофера, представляющие собой линии поглощения в хромосфере Солнца, видимые на фоне непрерывного спектра фотосферы.

Вне зависимости от присутствия шумов в полученном спектре линии Фраунгофера хорошо различимы на спектрах при малой глубине проведения эксперимента. Поскольку значения длин волн, соответствующие линиям поглощения, известны и не зависят от внешних факторов, их можно использовать для контроля точности юстировки прибора по длинам волн.

Затем проводили анализ зависимости изменения величины сигналов от глубины измерения. Для этого вначале выбирали две наиболее репрезентативные длины волны: из области основного максимума (желто-зеленая часть спектра) и из красной области, соответствующей дополнительному пику функции в области 680 нм. Для всех географических точек максимум интенсивности для этого диапазона длин волн на глубине при включенном лазере наблюдается при длине волны 679 нм. Для сравнения использовали спектр интенсивности от глубины на 579 нм, соответствующий максимуму интенсивности спектра неба. Анализ показал, что в области основного пика (579 нм) излучение спадает экспоненциально с глубиной, а в области дополнительного пика — выходит на постоянный уровень. Это означает, что оптический сигнал в первом случае вызывается солнечным излучением, а во втором — другим фактором, не зависящим от глубины. С учетом того, что при отсутствии лазерного излучения (532 нм) оптический сигнал снижается экспоненциально, можно утверждать, что наблюдаемый источник света на длине волны 679 нм обусловлен флуоресценцией находящихся в воде веществ и взвеси, которые могут быть связаны с растворенным органическим веществом или веществами-загрязнителями, микроорганизмами.

Для анализа данных с приборов серии «ОКЕАН» разрабатываются соответствующие методики и программные средства.

Информация о спектрах и служебная информация хранится в базе данных в неизменном виде, что позволяет проводить ее обработку по мере совершенствования и разработки новых методик.

Задача обработки спектральной информации. В рамках научно-исследовательской работы студентов решалась задача по созданию

алгоритмов обработки спектров, содержащих характеристические линии, в пакетах Origin и Matlab. Была разработана программа для обработки линейчатых спектров с низкоамплитудным гладким фоном. Подобные спектры присущи различным калибровочным источникам, а также спектрам пропускания воды, полученным с подводного АО-спектрометрического комплекса. Порядок обработки спектров следующий.

1. Импорт текстовых данных из файла известного расширения и структуры. Поскольку работа ведется с приборами, выходные файлы которых имеют расширения .dat или .txt, а также структура вывода данных и заголовков не изменяется от измерения к измерению, то данная операция выполняется одной функцией (`importdata()`) и не требует предварительной подготовки.

2. Разбиение всего спектрального диапазона на участки. Данная операция применяется для выделения линии (кривой неизвестной заранее формы) фона. В настоящее время выбор ширины интервалов исключительно статистический, это оправдано тем, что цель текущей реализации заключается в обработке спектров с одинаковыми спектральными диапазонами и настройкой прибора. В дальнейшем планируется вычислять ширину участка, исходя из априорных данных о спектральном диапазоне, числе зарегистрированных точек и аппаратной функции прибора.

3. Присвоение каждому измерению весового коэффициента в зависимости, обратно пропорциональной его амплитуде. Данная операция должна устранить влияние узких пиков излучения на дальнейшее вычисление средневзвешенных значений на каждом участке, которые будут использованы для построения линии фона. Это наиболее простая из возможных операций и дает хорошие результаты для целевых спектров. Дальнейшее совершенствование методики будет связано с введением линии регрессии и учетом конечной ширины пиков, что обеспечит полное устранение влияния линий излучения на результат. Следует отметить, что данный алгоритм основан на предположении гладкости фона, что позволяет рассмотреть его на каждом малом участке в приближении к линейной функции.

4. Интерполяция функции фона по точкам, вычисленным в предыдущем пункте. На данном этапе не рассматривалась возможность применения методики для работы со спектрами, в которых фон имеет разрывы первой производной.

5. Далее функция фона вычитается из исходного спектра. В результате получаем набор данных, включающих линии излучения и некоторый шум.

6. На последнем этапе проводится вычисление положений линий. Первичное определение осуществляется путем поиска локальных максимумов. Далее положение уточняется с помощью аподизации аппаратной функцией. В результате получаем значение положения

линии излучения и ее амплитуды. Методика может быть улучшена введением возможности задания функции аподизации.

Выводы. Разработка спектральных АО-приборов для решения задач, связанных с экологическим мониторингом, является перспективной и позволит решать вновь появляющиеся задачи на высоком уровне, например: исследование загрязнений толщи воды промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, нефтепродуктами, количественное определение содержания хлорофилла, распределения желтого вещества и минеральной взвеси в водах морей и океанов, содержание фитопланктона и распознавание его видов.

Перспективными являются следующие направления исследований:

- создание комплексов авиационно-космического базирования;
- создание АО-систем видения для дистанционного мониторинга;
- разработка программных средств, позволяющих создать на основе АО-приборов и комплексов современную информационную систему.

Исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», контракт П972 от 27 мая 2010 г. «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы и гидросферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустовойт В. И., Пожар В. Э. Акустооптические спектральные устройства: состояние и перспективы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 2. С. 6–15.
2. Акустооптические процессоры спектрального типа / Под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с.
3. Мазур М. М., Пожар В. Э., Пустовойт В. И., Шорин В. Н. Двойные акустооптические монохроматоры // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 10. С. 19–30.
4. Пожар В. Э., Пустовойт В. И. Возможности создания новых систем видения на основе акустооптических видеоспектрометров. // Радиотехника и электроника, 1996. Т. 41. Вып. 10. С. 1272–1278.
5. Современные средства и методы акустооптической спектрометрии / В.И. Пустовойт, В.Э. Пожар, Е.А. Отливанчик и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 8. С. 48–56.
6. Пожар В. Э., Фадеев А. В. Особенности использования акустооптических спектрометров в задачах мониторинга атмосферного воздуха // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 12. С. 53–59.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012.