

# Интерпретация измерительной информации в оптико-физических измерениях

М. М. Кугейко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,  
e-mail: [kugeiko@bsu.by](mailto:kugeiko@bsu.by)

В обзорном докладе рассматривается регрессионный подход к интерпретации измерительной информации в оптико-физических измерениях, заключающийся в определении параметров исследуемой среды на основе аналитических выражений, аппроксимирующих связи искомым параметров среды с измеряемыми в эксперименте оптическими сигналами.

**Ключевые слова:** рассеивающие среды; оптико-физические измерения; оптические параметры; биофизические параметры; обратная задача; регрессионные связи; аппроксимационные соотношения.

## Interpretation of measurement information in optical-physical measurements

M. M. Kugeiko

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: [kugeiko@bsu.by](mailto:kugeiko@bsu.by)

The review paper considers the regression approach to the interpretation of measurement information in optical-physical measurements. It consists in determining the parameters of the medium under study on the basis of analytical expressions approximating the relationships between the desired medium parameters and the optical signals measured in the experiment.

**Keywords:** scattering media; optical-physical measurements; optical parameters; biophysical parameters; inverse problem; regression relations; approximation relations.

### Введение

Практически все оптико-физические измерения относятся к классу косвенных, состоящих в определении искомого значения физической величины линий на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

Важной задачей, требующей решения в косвенных оптико-физических измерениях, является интерпретация измерительной информации. В методах, где исследуется отклик среды как целого, интерпретация измерительной информации – это наиболее сложный этап. Наличие погрешностей в измерениях делает задачу обращения ещё и некорректной. Для решения таких задач требуется использование априорной информации об объекте исследования, допущений об исследуемой среде, регулирующих алгоритмов [1–3].

Задача количественной оценки определённых параметров объектов обычно реализуется в два этапа. На первом этапе определяются оптические параметры объекта путём сравнения экспериментальных и расчётных – теоретических (в рамках модели переноса и взаимодействия света). На втором этапе решается обратная

задача по восстановлению определяемых из полученных значений оптических параметров.

Для обеспечения необходимой для практики точности требуется использование методов теории переноса излучения не использующих различные приближения о доминирующем процессе взаимодействия, что, в свою очередь, требует больших вычислительных затрат и поэтому исключает возможность интерпретации экспериментальных данных в режиме реального времени (например, при использовании наиболее точного метода Монте-Карло).

Необходимость использования априорной информации или допущений об исследуемом объекте в настоящее время, например, не позволила метрологически аттестовать лазерно-локационные системы в создаваемых глобальных сетях (мировой, европейской, СНГ, РБ) мониторинга загрязнений окружающей среды (для интерпретации измерительной информации используются дополнительные радиометрические измерения), системы неинвазивной оптической диагностики биофизических параметров биообъектов и т. д. Кроме того, возможность простого и адекватного описания процесса распространения света в средах принципиально важно для развития научно обоснованных оптических методов исследования, контроля, диагностики различных объектов и сред, терапии различных заболеваний, анализа крови и т. д.

Таким образом, эффективное использование оптико-физических методов измерений в диагностике, контроле, в технологических процессах, в научных исследованиях и т. п. требует развитого методического обеспечения при проведении измерений в условиях априорной неопределённости, разработки на этой основе новых оптико-электронных систем различного назначения.

### **1. Регрессионный подход к решению обратных задач оптики рассеивающих сред**

Рассматривается разработанный регрессионный подход к решению обратных задач оптического зондирования рассеивающих сред (атмосферы, биологических тканей), заключающийся в извлечении из регистрируемых оптических сигналов линейно-независимых компонент, как проекций сигналов на пространство из собственных векторов их ковариационной матрицы, и определении искомым параметров среды на основе их устойчивых регрессионных связей с линейно-независимыми компонентами сигналов [1–5]. Использование в регрессиях линейно-независимых величин, соответствует извлечению из исходных (образаемых) данных «полезного сигнала» и отбрасыванию «шума», что позволяет строить решения обратных задач, устойчивые к случайным «возмущениям» этих данных. Вышеотмеченные собственные векторы и регрессионные решения обратных задач получают путем статистического моделирования оптических сигналов при максимальной вариативности параметров среды, влияющих на процесс переноса в ней излучения. В последующем это позволяет выполнять оперативную обработку измеряемых оптических сигналов без решения уравнения переноса излучения в исследуемой среде, доопределения и регуляризации обратной задачи.

Оптимальная размерность собственного базиса ковариационной матрицы образаемых данных, используемого для их разложения на линейно-независимые

компоненты, определяется на основе замкнутых численных экспериментов по восстановлению параметров среды из характеристик ее светорассеяния. Для этого первоначально на основе смоделированного ансамбля реализаций вектора измерений  $\mathbf{r}$  формируется «тестовый» ансамбль, в котором каждая реализация  $\mathbf{r}$  получена путем наложения на компоненты исходного вектора  $\mathbf{r}$  случайных отклонений в пределах погрешности измерений  $\delta\mathbf{r}$ . Далее перебираются все реализации «тестового» ансамбля и для каждой из них осуществляется решение обратной задачи по формулам регрессии между модельными параметрами  $\mathbf{x}$  и линейно-независимыми величинами, составленными из компонентов  $\mathbf{r}$ . Получаемые в итоге значения модельных параметров  $\mathbf{x}^*$  сравниваются с их фактическими значениями  $\mathbf{x}$ , и рассчитываются погрешности их восстановления. В соответствии с этим выбирается количество линейно-независимых компонентов обрабатываемых данных при заданной погрешности измерений и характеристики светорассеяния среды, по которым можно наиболее точно определять конкретные параметры среды в условиях априорной неопределенности всех других. Это также позволяет оценить информативность измеряемых данных, получить представление о теоретически достижимой точности восстановления из них параметров среды, исследовать влияние количества и точности оптических измерений на точность решения обратной задачи.

Продемонстрированы возможности регрессионного подхода к планированию экспериментов по оптическому зондированию рассеивающих сред, включающие анализ информативности спектральных коэффициентов ослабления и направленного светорассеяния разбавленной крови, аэрозолей естественного и антропогенного происхождения, газовых компонент в условиях перекрытия их спектральных линий, выбраны длины волн оптического зондирования и углы приема рассеянного излучения, оптимальные для определения микрофизических параметров эритроцитов и аэрозолей (показателя преломления, счетной и объемной концентраций, характеристик распределения частиц по размерам), получены соответствующие множественные регрессии, позволяющие определять искомые микрофизические параметры в широких пределах их вариаций без решения некорректных обратных задач.

Установлены оптико-микроструктурные регрессионные соотношения для аэрозолей естественного и антропогенного происхождения, представляющие большой интерес для практического применения при лазерно-локационном и спутниковом мониторинге окружающей среды и контроле технологических процессов. На этой основе разработаны методы, использующие предварительно полученные аналитические выражения, связывающие определяемые параметры среды или объекта с их спектрально-пространственными характеристиками. Методы являются основой для создания нового поколения лазерно-локационных систем, использующих минимальное количество априорной информации, дополнительных измерений, калибровочных процедур.

На основе оптических моделей кожи и слизистых оболочек человека, а также метода Монте-Карло (МК) для решения уравнения переноса в них излучения получены устойчивые регрессионные решения обратных задач спектроскопии биотканей с пространственным разрешением, позволяющие определять оптические (коэффициент поглощения, транспортный коэффициент рассеяния, фактор анизотропии) параметры тканей.

тропии индикатрисы рассеяния) и структурно-морфологические (концентрации меланина, общего гемоглобина и билирубина в ткани; степень оксигенации крови; средний диаметр кровеносных сосудов; концентрация и размер эффективных рассеивателей) параметры тканей напрямую из сигналов их обратного рассеяния (ОР), регистрируемых на основе волоконно-оптической техники с пространственным разнесением каналов посылки и приема излучения.

Оценены погрешности восстановления параметров биотканей, вызванные их статистическим разбросом и погрешностями оптических измерений. Совместная обработка спектральных и пространственных характеристик ОР ткани с использованием полученных регрессий позволяет в 2–3 раза уменьшить погрешность восстановления оптических параметров (ОП) ткани по сравнению результатами их восстановления только из спектральных или только из пространственных характеристик ОР.

Предложено решение обратной задачи реконструкции двумерных распределений структурно-морфологических параметров (СМП) тканей человека по их мультиспектральным изображениям. Для устранения влияния неравномерной освещенности и геометрии съемки ткани на результаты восстановления ее параметрических карт используются изображения ткани, нормированные на один из своих спектральных слоев. Обратная задача состоит в восстановлении СМП ткани из спектральных значений каждого пикселя нормированного изображения. Для ее решения используются регрессионные соотношения, предварительно полученные на основе репрезентативной выборки спектра диффузного отражения (ДО) среды, моделирующей исследуемую ткань. Устойчивость регрессионных операторов преобразования изображений тканей в параметрические карты к погрешностям измерений обеспечивается за счет использования для решения обратной задачи линейно-независимых составляющих изображения, получаемых путем проекций спектральных значений каждого пикселя на собственные векторы ковариационной матрицы спектра ДО ткани.

Регрессионный подход к количественному анализу характеристик светорассеяния биологических тканей позволят с успехом решать широкий круг практических задач, и обладает рядом важных достоинств. Во-первых, он позволяет в реальном масштабе времени обрабатывать экспериментальные данные и вести непрерывный мониторинг параметров исследуемого объекта, например, во время хирургических операций, терапевтических процедур или в ходе проведения эндоскопического обследования. Во-вторых, регрессионный метод дает возможность определять искомые параметры ткани в тех случаях, когда объем экспериментальных данных не достаточен для использования строгих математических методов решения некорректных обратных задач. И наконец, интерпретация экспериментальных данных на основе предварительно построенных регрессионных соотношений не требует привлечения сложных алгоритмов и компьютерных кодов, а также больших затрат вычислительных ресурсов, что позволяет в реальном времени обрабатывать большие объемы экспериментальных данных, содержащиеся в мультиспектральных изображениях биотканей.

В то же время, регрессионный метод не позволяет выполнять тонкий анализ характеристик светорассеяния ткани, например, выявлять в них особенности, обу-

словленные малыми вариациями компонентного состава крови. Малые вариации спектра ОР ткани, обусловленные вариациями гемоглобинного состава, в значительной степени усредняются по статистическому материалу, используемому для получения регрессий, что делает регрессионный метод слабо чувствительным к концентрации каждой конкретной формы гемоглобина в условиях их общей вариативности. В этих условиях значительно более высокая точность оценки искомых параметров может быть достигнута путем измерений спектра ОР ткани с высоким спектральным разрешением и последующего решения обратной задачи, заключающейся в моделировании теоретического спектра по отношению к экспериментальному путем подбора модельных параметров. Высокое спектральное разрешение исходных данных обеспечивает устойчивость обратной задачи к погрешностям оптических измерений и устраняет неоднозначность ее решения в рамках используемой модели биоткани. Сложность здесь заключается в адекватном теоретическом расчете характеристик ОР ткани.

Расчет оптических сигналов наиболее точно осуществляется с использованием метода МК. Однако он требует больших затрат машинного времени, что существенно затрудняет его практическое использование. Сокращение времени расчетов может быть достигнуто путем установления связей (аналитических или аппроксимационных) между оптическими параметрами среды и регистрируемыми сигналами. Особо следует отметить разработанные аппроксимационные аналоги метода МК для быстрых расчетов характеристик переноса излучения в однородной и двухслойной многократно рассеивающих средах.

Рассмотрены полученные аппроксимационные выражения для расчета спектра диффузного пропускания кюветы с цельной кровью в зависимости от биохимического состава крови и морфологических параметров эритроцитов, а также для расчета спектрально-пространственных характеристик ДО и ОР кожи, слизистых оболочек в зависимости от их оптических и структурных параметров, проведен анализ эффективности использования полученных выражений для решения обратных задач оптики биотканей.

### **Библиографические ссылки**

1. *Кугейко М. М.* Лазерная диагностика и спектроскопия (в условиях априорной неопределенности). Минск: БГУ, 2019. 260 с.
2. *Кугейко М. М., Лысенко С. А.* Лазерная спектрофелометрия аэродисперсных сред. Минск, БГУ. 2012. 208 с.
3. *Лысенко С. А.* Методы оптической диагностики биологических объектов. Минск: БГУ. 2014. 232 с.
4. *Кугейко М. М., Баравик А. А.* Определение концентрации компонентного состава газов методом оптической спектроскопии в условиях перекрытия их спектральных линий // Оптика и спектроскопия, 2021. Т. 129, выпуск 10. С.1221–1227
5. *Кугейко М. М., Смунев Д. А.* Методы определения микрофизических параметров эритроцитов по поляризационно-нефелометрическим измерениям // Электроника-инфо. 2016. № 2. С. 41–49.