

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра оптики и биофотоники

Квантовые корреляционные эффекты в оптических системах

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2223 группы

направления 03.04.02 «Физика»
профиль «Квантовые технологии»
Института физики

Попова Сергея Валерьевича

Научный руководитель:
доцент кафедры оптики и
биофотоники, к.ф.-м.н.

должность, уч. ст., уч. зв.



личная подпись, дата

И.В. Федосов

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой оптики и
биофотоники:
проф., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

должность, уч. ст., уч. зв.



личная подпись, дата

В.В. Тучин

инициалы, фамилия

Саратов 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Корреляционные методы оптической визуализации находятся на стыке статистической и квантовой оптики. Призрачная визуализация (англ. ghost imaging) позволяет восстанавливать изображение объекта по совместной статистике двух световых каналов, причём канал, регистрирующий свет после объекта, не обладает пространственным разрешением. Метод реализуется в двух физически различных вариантах — классическом, на псевдотепловом источнике, и квантовом, на парах фотонов спонтанного параметрического рассеяния. Поскольку оба варианта описываются близкими корреляционными выражениями, принципиальным остаётся вопрос о том, в чём состоит физическое различие режимов и при каких условиях квантовый режим даёт практическое преимущество. Этот вопрос особенно значим для биофотоники, где световая доза на образец ограничена из-за фотоповреждения и фотовыцветания, и где режим малого числа фотонов является основным.

Цель работы. Численно сравнить классический псевдотепловой и квантовый бифотонный режимы корреляционной призрачной визуализации и определить условия, при которых квантовый режим даёт преимущество по физическому ресурсу и по обнаружимости слабоконтрастных объектов.

Задачи работы. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) рассмотреть теоретические основы корреляционной призрачной визуализации в классическом и квантовом режимах; 2) построить численную модель псевдотеплового источника и проверить восстановление объекта по корреляциям интенсивности; 3) построить модель бифотонного источника спонтанного параметрического рассеяния, исследовать пространственные корреляции фотонных пар и подтвердить квантовый ресурс по критерию ЭПР–Рида и числу Шмидта; 4) сопоставить классический и квантовый режимы на общем объекте по единому набору метрик качества; 5) исследовать поведение режимов при ограниченной фотонной дозе на слабоконтрастном биофотонном объекте, построить карту областей применимости и проверить вывод на реальных биологических

изображениях.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена методами численного моделирования. Псевдотепловое поле моделировалось как спекл-поле с гауссовой моделью пространственной когерентности; распространение оптического поля рассчитывалось в параксиальном приближении скалярной дифракции. Бифотонное состояние спонтанного параметрического рассеяния описывалось двугауссовой волновой функцией; квантовый ресурс оценивался аналитически и методом Монте-Карло. Сравнение режимов проводилось на едином тестовом объекте по единому набору метрик (среднеквадратичная ошибка, пиковое отношение сигнал/шум, коэффициент корреляции Пирсона, контрастно-шумовое отношение, коэффициенты Дайса и Жаккара) и по общей фотонной дозе. Дополнительно использовались реальные биологические изображения из библиотеки scikit-image (гистологический срез и изображение глазного дна).

Структура работы. ВКР состоит из введения, двух глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Первая глава — теоретическая часть — посвящена корреляционным эффектам в оптических системах, псевдотепловому свету и пространственной когерентности, численному распространению поля, псевдотепловой корреляционной призрачной визуализации, квантовым корреляциям бифотонов СПР, сопоставлению классических и квантовых корреляций и метрикам качества восстановления. Вторая глава — практическая часть — содержит единую постановку численного эксперимента, исследование псевдотеплового и квантового режимов, их сопоставление на общем объекте, анализ поведения при малом числе фотонов с построением карты областей применимости и проверкой на реальных биоизображениях, а также обсуждение результатов и ограничений модели. Работа изложена на 77 страницах, содержит 31 рисунок, 3 таблицы и 42 использованных источников.

Научная новизна. Впервые в единой численной постановке — на общем объекте, по единому набору метрик и с приведением обоих режимов к общей фотонной дозе — выполнено сопоставление классической псевдотепловой и

квантовой бифотонной призрачной визуализации с одновременным подтверждением квантового ресурса по критерию ЭПР–Рида и числу Шмидта и построением карты областей применимости режимов, в том числе на реальных биологических изображениях.

Научная и практическая значимость. Показано, что при достаточной фотонной дозе режимы дают сопоставимое качество восстановления, тогда как физическое различие состоит в наличии у квантового режима подтверждаемой пространственной запутанности. Определена область параметров (малая доза, слабый контраст), в которой квантовый режим обеспечивает преимущество по обнаружимости, что задаёт практический ориентир для применения квантовой корреляционной визуализации в биофотонике, где световая нагрузка на образец ограничена.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена теоретическим основам работы. Рассмотрены интенсивностные корреляции и статистика света, призрачная визуализация как корреляционный метод и различие классических и квантовых источников корреляций. Изложена модель псевдотеплого света: спекл-поля, отрицательно-экспоненциальная статистика интенсивности и гауссова модель когерентности Шелла. Описано численное распространение поля в параксиальном приближении и ограничения расчётной области. Сформулирована схема псевдотепловой призрачной визуализации с интегральным и опорным каналами и корреляционное восстановление изображения. Для квантового режима рассмотрено бифотонное состояние спонтанного параметрического рассеяния, пространственная запутанность и критерий ЭПР–Рида, число Шмидта как мера запутанности и восстановление по регистрации совпадений. Отдельно проведено сравнение классических и квантовых корреляций: показано, что классический предел корреляции второго порядка составляет $g^{(2)}(0) \leq 2$, тогда как квантовый признак — нарушение границы ЭПР, и обсуждена связь запутанности с пространственным разрешением. Введён единый набор метрик качества восстановления:

среднеквадратичная ошибка, пиковое отношение сигнал/шум, коэффициент корреляции Пирсона, а также метрики формы и контраста.

Вторая глава содержит результаты численного эксперимента. В единой постановке зафиксированы общий тестовый объект, единая нормировка и набор метрик, а также параметры модели, что обеспечивает корректность сопоставления.

Для псевдотеплового режима подтверждена корректность источника: статистика интенсивности соответствует отрицательно-экспоненциальному распределению, а функция корреляции второго порядка в нуле составляет $g^{(2)}(0) = 1,993 \approx 2$, что отвечает тепловой группировке. На валидационном объекте (тройная щель) показано корректное восстановление, а с ростом числа реализаций качество монотонно возрастает, а ошибка убывает, причём обнаружимость растёт пропорционально корню из числа реализаций.

Для квантового режима СПР проверено бифотонное состояние с позиционной корреляцией в ближней зоне и импульсной антикорреляцией в дальней зоне. По критерию ЭПР–Рида получен нормированный параметр нарушения $\varepsilon = 3,59 \cdot 10^{-3}$, то есть классическая граница нарушена примерно в 278 раз; число Шмидта составляет $K \approx 278$, что соответствует сильной многомодовой запутанности. Результат подтверждён двумя независимыми способами — аналитически и методом Монте-Карло — с расхождением менее 1 %. Выполнено восстановление изображения по регистрации совпадений; учтены случайные совпадения и исследована сходимость по числу фотонных пар.

При сопоставлении режимов на общем объекте установлено, что по форме изображения качество сопоставимо: коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,798 в псевдотепловом режиме и 0,815 в квантовом режиме с шумом (0,945 в идеальном пределе без шума). Отличие квантового режима проявляется в более высоком контрасте: контрастно-шумовое отношение возрастает с 2,95 до 6,29. Сделан вывод, что различается не качество восстановления, а физическая природа метода — наличие подтверждаемой запутанности у квантового режима.

При исследовании поведения режимов при малом числе фотонов сравнение

проведено по общей фотонной дозе. При контрасте объекта 0,25 квантовый режим достигает порога обнаружимости (контрастно-шумовое отношение, равное 3, по критерию Роуза) при дозе около $1 \cdot 10^6$ фотонов, тогда как псевдотепловой режим — около $2 \cdot 10^{10}$ фотонов; выигрыш по фотонной дозе составляет примерно четыре порядка. Построена карта областей применимости в координатах «контраст – число фотонов», разделяющая режимы малой и большой дозы. Вывод подтверждён на реальных биологических изображениях (гистологический срез и изображение глазного дна): пороговые дозы составляют около $5 \cdot 10^6$ фотонов для квантового и около $1 \cdot 10^{10}$ фотонов для классического режима.

В разделе обсуждения отмечены ограничения модели: разрешающая способность квантовой схемы ограничена шириной пространственных корреляций σ -, в силу чего при большой дозе классический режим точнее передаёт тонкие детали; высокодозовая часть классической зависимости получена обоснованной нормальной аппроксимацией, привязанной к прямому методу Монте-Карло; работа носит характер численного моделирования. Тем самым итоговый результат имеет вид карты областей применимости, а не утверждения об универсальном превосходстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построены и верифицированы численные модели классического псевдотеплового и квантового бифотонного режимов корреляционной призрачной визуализации. Псевдотепловой источник воспроизводит тепловую статистику интенсивности с $g^{(2)}(0) = 1,993$, а бифотонная модель — состояние пространственно коррелированных фотонных пар.

Подтверждён квантовый ресурс квантового режима: по критерию ЭПР–Рида классическая граница нарушена примерно в 278 раз ($\epsilon = 3,59 \cdot 10^{-3}$), число Шмидта составляет $K \approx 278$; результат проверен аналитически и методом Монте-Карло с расхождением менее 1 %. Такого нарушения классический псевдотепловой источник дать не может в принципе.

Установлено, что при достаточной фотонной дозе режимы дают сопоставимое

качество восстановления (коэффициент корреляции Пирсона около 0,80 и 0,82 соответственно), при более высоком контрастно-шумовом отношении у квантового режима. При малом числе фотонов и слабом контрасте квантовый режим достигает порога обнаружимости примерно на четыре порядка раньше классического (около $1 \cdot 10^6$ против $2 \cdot 10^{10}$ фотонов), что подтверждено и на реальных биологических изображениях.

Универсальное превосходство квантового режима не утверждается: при большой фотонной дозе классический режим точнее передаёт тонкие детали, поскольку разрешение квантовой схемы ограничено шириной пространственных корреляций. Итоговый результат имеет вид карты областей применимости: квантовая корреляционная визуализация целесообразна там, где фотонная доза ограничена, — прежде всего в биофотонике. Поставленная цель достигнута, все задачи работы выполнены.

Лос