

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б. И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

На правах рукописи
УДК 535.14; 530.145

ПЕШКО
Илья Александрович

**КВАНТОВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ В
ДАЛЬНЕМ ПОЛЕ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Минск 2024

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Научный руководитель **Могилевцев Дмитрий Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент НАН Беларуси,
заместитель заведующего центром
«Квантовая оптика и квантовая
информатика» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
НАН Беларуси

Официальные оппоненты: **Редьков Виктор Михайлович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
центра «Фундаментальные взаимодействия
и астрофизика» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
НАН Беларуси

Новицкий Андрей Викторович,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры теоретической
физики и астрофизики Белорусского
государственного университета

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское учреждение
«Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного
университета

Защита состоится «04» октября 2024 г. в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2; тел. ученого секретаря 270-80-59; e-mail: vyblyi@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Я. Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций, кандидат
физико-математических наук _____



Вybлыи Ю.П.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы получила развитие новая область физики, которая вобрала в себя концепцию классических антенн, в частности фазированных решёток, но при этом излучение этих антенн обладает квантовыми свойствами, которые сохраняются и в дальнем поле – квантовые антенны (КА). КА состоит из следующих структурных элементов: питающая система, пространственно локализованные квантовые излучатели и система мод электромагнитного резервуара. Питающая система возбуждает квантовые излучатели в некоторое квантовое состояние, а излучатели, в свою очередь, взаимодействуя с электромагнитным вакуумом, спонтанно излучают в соответствующие моды поля. И излучатели, и резервуар в КА описываются с помощью квантового формализма, что делает такие системы предметом квантовой оптики. В качестве квантовых излучателей могут быть использованы, к примеру, локализованные в пространстве двухуровневые системы (ДУС), а также бозонные системы, такие как квантовые точки, центры окраски в алмазах и др.

Одним из кандидатов на квантовые антенны может быть система одномодовых волноводов, резонансные моды которых перекрываются, т.е. которые взаимодействуют, и, тем самым, возбуждение в них может перетекать от одного волновода к другому. Такие волноводные антенны могут быть спроектированы так, чтобы излучать электромагнитное поле непосредственно с конца волновода или из прорези в волноводе.

Исследование и создание КА является востребованным для современных практических приложений квантовых технологий. Эта область исследований имеет широкий спектр нерешённых задач: от поиска подходящих физических систем, до анализа преимуществ, которые они могут дать в конкретных приложениях по сравнению с классическими аналогами.

В настоящей диссертации исследовались особенности динамики возбуждения в волноводных цепочках в контексте использования этих цепочек в качестве КА. Причём предполагалось, что каждый второй волновод обладает усиленными потерями. Также, в качестве КА, рассмотрены цепочки двухуровневых систем, спонтанно излучающие в электромагнитный резервуар. Исследованы квантовые радарные схемы, использующие в качестве антенн цепочки бозонных мод и двухуровневых систем. Для анализа возможностей описанных радарных схем использовался подход, основанный на понятии информации Фишера.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Настоящая работа выполнялась в рамках Задания 3.01.3 "Новые технологии сверхразрешающей квантовой микроскопии и сенсинга, в том числе микроскопии биологических объектов, квантовых антенн, изучение коллективных эффектов взаимодействия излучения с веществом, в том числе динамики квантовых корреляций во внешних магнитных, электромагнитных и гравитационных полях с целью повышения чувствительности квантовых методов детектирования" ГПНИ «Конвергенция-2025» (шифр «Конвергенция 3.01.3», 2021-2025 гг., № госрегистрации 20210568).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь, в частности пунктам 1 «Физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, нейроцифровые, антропоморфные)» и 4 «Наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы.

Диссертация соответствует пунктам «Развитие и применение фундаментальных физических теорий и феноменологических моделей для описания различных состояний вещества и физических явлений в них» и «Квантовая механика. Квантовая теория информации и квантовые вычисления» паспорта специальности «01.04.02 — Теоретическая физика».

Объект исследования. Квантовые антенны на основе цепочек связанных одномодовых волноводов, а также на основе связанных двухуровневых систем в присутствии потерь.

Предмет исследования. Предметом исследования являются процессы динамики возбуждения в цепочке связанных одномодовых волноводов или связанных двухуровневых систем с потерями, а также способы использования таких цепочек для сканирования в дальнем поле.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертации является исследование возможностей использования квантовых систем в присутствии потерь в качестве квантовых антенн для метрологических приложений. Для достижения этой цели решаются следующие конкретные задачи:

1. Исследование особенностей динамики возбуждения в цепочках мод с потерями, взаимодействующих посредством линейной связи.
2. Исследование влияния нелинейных эффектов в рассматриваемых системах.
3. Моделирование работы схем сканирования, использующих в качестве источника рассматриваемые квантовые антенны и с помощью подхода, основанного на понятии информации Фишера, а также оценить преимущества этих схем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Управляя константой унитарной связи между цепочкой взаимодействующих бозонных мод, а также скоростью потерь можно добиться быстрой логарифмической зависимости времени смешивания от числа мод цепочки. Выбор начального состояния позволяет расширить область логарифмической зависимости и изменять характер смешивания от диффузного до супер-баллистического.
2. Цепочки связанных бозонных мод позволяют нарушить принцип взаимности распространения света и создать одномодовый оптический изолятор при наличии нелинейных потерь. Реализовать оптический изолятор можно с помощью нелинейных когерентных потерь, а также с помощью схемы, включающей светоделитель и устройство, дефазирующее свет в энергетическом базисе.
3. Квантовая антенна из двух взаимодействующих диполей способна создавать состояние поля, позволяющее достигнуть сверхразрешения при сканировании в дальней зоне. При измерении пространственно-временных корреляций поля антенны, рассеянного от объекта, можно получить больше информации о геометрической структуре объекта, чем при измерении без временных корреляций. Измерение пространственно-временных корреляций рассеянного поля позволяет избежать расходимости ошибки при уменьшении размера объекта.

Научная новизна и значимость полученных результатов:

1. Впервые было показано, что цепочки взаимодействующих волноводов типа Руднера-Левитова, когда каждый второй волновод с потерями, демонстрируют различные режимы переноса возбуждения в зависимости от начального состояния.

Также показано, что время смешивания в таких системах может быть оптимизировано подбором констант взаимодействия, а подбор начального состояния позволяет менять характер смешивания от диффузного до супер-баллистического.

2. Впервые показано, что нелинейные потери в системе связанных бозонных мод позволяют нарушить принцип взаимности распространения света. Важным условием нарушения взаимности являются не только нелинейные потери, но также и асимметричная структура такого устройства. Оно должно состоять по крайней мере из двух частей, каждая из которых обладает различными параметрами, характеризующими скорости взаимодействия между модами и потери. Установлено, что нелинейные потери позволяют создать одномодовый оптический изолятор. Предложен способ сделать это с помощью нелинейных когерентных потерь. Также показано, что с помощью дефазировки можно нарушить взаимность, и предложена схема, включающая светоделитель и устройство, дефaziрующее свет в энергетическом базисе.
3. Впервые исследована квантовая антенна, состоящая из пары взаимодействующих двухуровневых систем как источника коррелированного излучения для различных схем сканирования в дальнем поле. Показано, что измерения временных корреляций интенсивности позволяют добиться сверхразрешения при определении положения антенны, при определении расстояния между антенными излучателями, при определении расстояния между рассеивателями на которые падает излучение от антенны, и более того, позволяют избежать расходимости ошибки при уменьшении размера объекта.
4. Впервые показано, что если квантовая антенна, состоящая из цепочки невзаимодействующих двухуровневых систем, находится в симметричном состоянии Дике, то её диаграмма направленности имеет качественные отличия от диаграмм направленности классических аналогов. А именно присутствие направлений, для которых вероятность обнаружить фотон равна 0.

Полученные результаты могут оказать существенное влияние на такие области квантовых технологий, как квантовая метрология и квантовые радары.

Личный вклад соискателя. Диссертационная работа отражает личный вклад автора в проведенные исследования. Научным

руководителем д. физ.- мат. наук чл.-корр. Д. С. Могилевцевым была определена область исследований, осуществлялось общее руководство, оказывалась методологическая помощь, проводилось обсуждение полученных результатов.

Работы [1, 2] выполнены самостоятельно автором диссертации. Работы [3–6] выполнялись совместно с научным руководителем и другими соавторами.

Апробация результатов диссертации. Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на международных научных конференциях: «26th Central European Workshop on Quantum Optics» (Падерборн, Германия, 2019); «XVI International conference on quantum optics and quantum information» (Минск, 2019); «IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems» (Тель-Авив, Израиль, 2019); «URSI International Symposium on Electromagnetic Theory» (Сан-Диего, США, 2019); «URSI GASS» (Рим, Италия, 2021); «International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications» (Гранада, Испания, 2019); «Международная научно-практическая конференция аспирантов, магистрантов и студентов "Физика конденсированного состояния"» (Гродно, 2023); «VII Конгресс физиков Беларуси» (Минск, 2023), «Современные проблемы физики» (Минск, 2024).

Опубликованность результатов диссертации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 16 работах, включая 6 статей [1–6] в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК РБ (общим объемом 5.2 авторских листа), и 10 материалов и тезисов конференций [7–16]. Общий объем опубликованных материалов составляет 6.2 авторских листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя оглавление, перечень условных обозначений, введение, общую характеристику работы, три главы, заключение и библиографический список. Полный объем диссертации составляет 104 страницы. Диссертация содержит 34 рисунка, занимающих в совокупности 9.6 страницы. Библиографический список включает 91 наименование и занимает 7 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** приводится обоснование актуальности и научной значимости выбранной темы диссертации, а также освещён круг отдельных вопросов, которые необходимо рассмотреть для полноты исследования.

В **первой** главе представлены результаты исследования особенностей динамики возбуждения в цепочке линейно связанных бозонных мод, причём предполагается, что каждая вторая мода обладает спроектированными потерями. Данная система может быть использована в качестве квантовой антенны. В частности, такая бозонная цепочка может быть реализована с помощью цепочки взаимодействующих одномодовых волноводов.

Представлен краткий литературный обзор явлений, свойственных рассматриваемой системе, которые были исследованы в первой главе. Сформулирована математическая модель для описанной выше системы, которая заключается в эволюции оператора плотности, описываемой с помощью уравнения Линдблада.

Затем показано, что в предположении когерентного начального возбуждения системы, описание её состояния может быть эффективно сведено к вектору состояния, компоненты которого представляют амплитуды когерентного состояния в каждой бозонной моде, а эволюция описывается уравнением типа уравнения Шрёдингера с неэрмитовым эффективным «гамильтонианом»:

$$\frac{d}{dt} \vec{\psi} = -iH\vec{\psi}, \quad (1)$$

где $\vec{\psi} = (\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \dots, \beta_{N_L}, \alpha_{N_L+1})^T$ – вектор амплитуд когерентных состояний, соответствующих различным модам исследуемой цепочки, а ненулевые компоненты эффективного «Гамильтониан»:

$$\begin{aligned} H_{2n,2n} &= -i\Gamma, \quad H_{2n-1,2n} = H_{2n,2n-1} = v_1, \\ H_{2n+1,2n} &= H_{2n,2n+1} = v_2, \quad n = \overline{1, N_L} \end{aligned} \quad (2)$$

где Γ – скорость потерь в модах с потерями, $v_{1,2}$ – константы унитарной связи между модами, N_L – число мод с потерями. Также показано, что вектор $\vec{\psi}$ описывает динамику средних амплитуд для любого начального состояния.

Далее, были подробно рассмотрены особенности такой системы, следующие непосредственно из вида неэрмитова гамильтониана. Так, было показано, что в системе всегда существует нулевое собственное значение, которому соответствует стационарное не вакуумное состояние, которое мы называем «темновым». Если начальное состояние не ортогонально темновому, то система в ходе эволюции всегда приходит к смеси вакуума и темнового состояния.

Было показано, что спектр гамильтониана характеризуется набором так называемых исключительных точек, то есть точек в пространстве параметров, в которых происходит вырождение двух собственных значений.

Далее, было рассмотрено влияние параметров системы, таких как длина цепочки, константы унитарной связи между модами, скорость потерь в каждой второй моде, на процесс смешивания. Смешивание – это процесс, при котором система из начального локализованного состояния (возбуждение локализовано в одной или нескольких модах) приходит к делокализованному стационарному состоянию.

Быстрое смешивание является важнейшим условием в таких системах. Действительно, ведь если динамика будет слишком медленной, то, например, в случае волноводной её реализации потребуется более длинное устройство, что нежелательно. Для того чтобы количественно описать скорость смешивания вводят такую характеристику, как «время смешивания». Эта величина описывает то, как быстро система приходит к стационарному распределению. Однако для описания смешивания необходимо нормировать населённости в модах, вводя «вероятности» заполнения мод:

$$p_j(t) = |\psi_j(t)|^2 / P_{total}(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} p_j^{(st)} \quad (3)$$

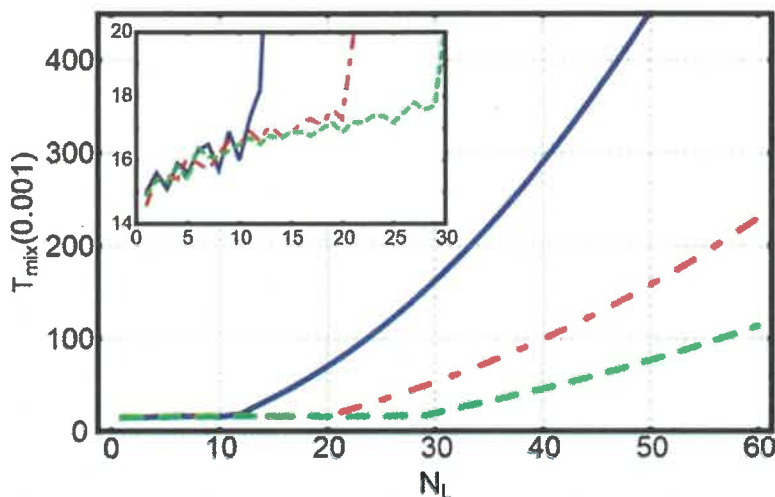
где $p_j^{(st)}$ – это стационарное распределение, соответствующее темновому состоянию системы, $\sum_j p_j(t) = 1$. Тогда время смешивания определяется стандартным образом, как

$$T_{mix}(\varepsilon) = \min\{t \geq 0 : \sum_j |p_j(t) - p_j^{st}| \leq \varepsilon\}, \quad (4)$$

для $\varepsilon > 0$.

Обнаружено, что структура исключительных точек в спектре гамильтониана определяет два режима смешивания относительно длины

цепочки: логарифмический и квадратичный. На рисунке 1 изображена зависимость времени смешивания от длины симметричной RL-цепочки, то есть для исследуемой цепочки с одинаковой константой унитарного взаимодействия между модами [6, с. 1–10].



Сплошная, штрихпунктирная и штриховая линии соответствуют отношению скорости унитарного взаимодействия между модами к скорости потерь в каждой второй моде $\nu / \Gamma = 3, 5, 7$ соответственно. На вставке показано время смешивания T_{mix} для тех же кривых, но в меньшем масштабе. Изначально возбуждается только первый узел RL-цепочки.

Рисунок 1 – Зависимость времени смешивания T_{mix} , выраженная в единицах Γ^{-1} , от количества узлов с потерями N_L для симметричной RL-цепочки

Как видно из рисунка 1, при определённом отношении ν/Γ существует число узлов в решётке, меньше которого зависимость времени смешивания от этого числа хорошо ложится на логарифмическую зависимость, тогда как за этим значением, зависимость квадратичная.

Кроме того, в первой главе детально рассмотрен режим диссипативной связи в таких цепочках, когда скорость потерь в каждой второй моде значительно превосходит скорость унитарного взаимодействия между модами. В этом пределе исследован процесс переноса возбуждения по цепочке мод. Было обнаружено, что, управляя начальным состоянием, можно добиться как локализации, так и сверхбаллистического режима распространения, что выходит за рамки

обычных представлений о переносе возбуждения в линейно связанных цепочках [5, с. 1–10].

Во второй главе были рассмотрены нелинейные явления в квантовых антенных системах. Под нелинейными явлениями мы понимаем явления, происходящие в системе с нелинейным откликом на внешнее поле. В этом смысле даже самая базовая модель квантовой оптики является нелинейной, а именно модель Джейнса-Каммингса, которая представляет собой систему из двухуровневой системы (ДУС) и оптической моды взаимодействующих друг с другом. Действительно, ведь отклик ДУС зависит от её населённости, а та, в свою очередь, нелинейно зависит от интенсивности внешнего поля. При этом уравнения, описывающие динамику волнового вектора или матрицы плотности, являются линейными относительно этих величин.

Одним из важных практических свойств, рассмотренных во второй главе, которые могут быть получены в оптических системах с помощью нелинейных эффектов, является нарушение взаимности. Глава начинается с краткого аналитического обзора литературы, касающейся принципа взаимности и способов его нарушения.

Было предложено квантовое описание взаимности и её нарушения в открытых квантовых системах. На основе этого описания было показано, что добавление нелинейных потерь в цепочку бозонных мод позволяет реализовать не только многомодовые, но даже одномодовые невзаимные устройства, в частности одномодовый оптический изолятор [4, с. 1–10].

Для демонстрации нарушения взаимности, в диссертации предложены как идеализированные схемы, в которых преобразование оператора плотности оптической системы описывается набором операторов Крауса, так и реалистичные волноводные схемы, в которых потери реализуются через хорошо изученный механизм, так называемых, нелинейных когерентных потерь.

На примере реалистичной волноводной схемы показано, что в прямом направлении возбуждение эволюционирует к стационарному не вакуумному состоянию, тогда как в обратном направлении, при том же входном состоянии, состояние на выходе является вакуумным.

Важным условием нарушения взаимности и, как следствие, создания устройства типа оптического изолятора, являются не только нелинейные потери, но и асимметричная структура такого устройства. Оно должно состоять, по крайней мере, из двух частей, каждая из которых обладает различными величинами, характеризующими скорости взаимодействия между модами и потери.

Также, в рамках второй главы была исследована цепочка ДУС в контексте использования её в качестве квантовой антенны. Было показано, что если такая цепочка изначально находится в перепутанном состоянии

Дике (СД), то поле такой антенны, спонтанно испускаемое в электромагнитный резервуар, качественно отличается от поля, испускаемого антенной изначально находящейся в перепутанном, псевдоклассическом состоянии (ПК). Состояния ПК и СД определяются следующим образом:

$$|\Psi_{ПК}^{m,M}\rangle = \prod_{j=1}^M \otimes \left(\sqrt{1-\frac{m}{M}} |g_j\rangle + \sqrt{\frac{m}{M}} |e_j\rangle \right), \quad |\Psi_{СД}^{m,M}\rangle = \sum_{j_1 \neq \dots \neq j_m}^M \sqrt{\frac{(M-m)!}{m!M!}} |e_{j_1}, \dots, e_{j_m}\rangle, \quad (5)$$

где M – число ДУС, из которых состоит антенна; m – число возбуждений в антенне; $|g_j\rangle$ и $|e_j\rangle$ – вакуумное и возбужденное состояние j -го ДУС соответственно; $|e_{j_1}, \dots, e_{j_m}\rangle$ – состояние антенны, когда ДУС с номерами j_1, \dots, j_m возбуждены, а остальные находятся в вакуумном состоянии.

Были получены выражения для интенсивности и корреляционной функции второго порядка поля в дальней зоне квантовой антенны, представляющей собой линейную цепочку ДУС, которая изначально находится в состояниях (5).

Было показано, что поле в дальней зоне антенны, которая находится в СД состоянии с одним возбуждением, демонстрирует направления, в которых интенсивность поля равна 0 (вероятность обнаружить фотон в этом направлении равна 0), чего нельзя достичь для перепутанных ПК состояний (рис. 2).

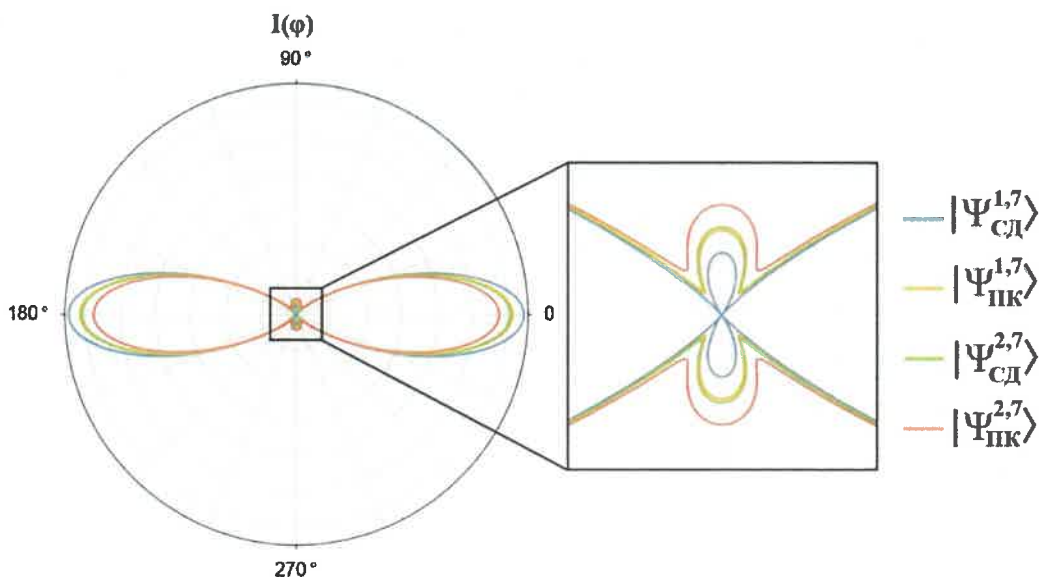


Рисунок 2 – Диаграммы направленности интенсивности квантовой антенны, состоящей из 7 ДУС, для четырех начальных состояний

Аналогичный результат был получен и для корреляционной функции второго порядка: для антенны, находящейся в СД состоянии с двумя возбуждениями, существуют пары углов, для которых вероятность обнаружить пару фотонов равна 0 [2, с. 1–5].

В третьей главе были исследованы конкретные квантовые радарные схемы, антенны которых представляют собой цепочки бозонных мод или двухуровневых систем, рассмотренные в первой и второй главе.

Глава начинается с краткого литературного обзора, касающегося информационного подхода, используемого для анализа преимуществ исследуемых радарных схем. Этот подход основан на матрице информации Фишера, которая позволяет получить количественное значение информации об неизвестных параметрах в некоторой измерительной схеме.

Матрица информации Фишера определяется следующим образом:

$$F_{kl} = \sum_{\forall j} \frac{1}{p_j} \left(\frac{\partial}{\partial x_k} p_j(\vec{x}) \right) \left(\frac{\partial}{\partial x_l} p_j(\vec{x}) \right), \quad (6)$$

где $p_j(\vec{x})$ – набор вероятностей, описывающих результаты измерений, \vec{x} – вектор неизвестных параметров, которые влияют на результаты измерения.

Если оценка k -го параметра несмещённая, то дисперсия этой оценки Δ_k^2 удовлетворяет неравенству Крамера-Рао

$$\Delta_k^2 \geq \frac{1}{N} [F^{-1}]_{kk}, \quad (7)$$

где N — размер выборки измерения.

Для расчёта матрицы информации Фишера и оценки нижней границы дисперсии оцениваемых параметров рассчитывалось поле, создаваемое рассматриваемыми антеннами, либо рассеянное от объектов с неизвестными геометрическими параметрами. На основе этого рассчитывались вероятности детектирования фотонов, а также их корреляций, в различных направлениях и в различные моменты времени.

С помощью подхода на основе матрицы информации Фишера, было показано, что использование квантовой антенны, представляющей собой два взаимодействующих диполя, которые описываются двухуровневыми системами, позволяет добиться сверхразрешения при сканировании в дальнем поле. Более того, измерение пространственно-временных корреляций от двух точечных рассеивателей позволяет преодолеть

стремление ошибки к бесконечности при сближении этих рассеивателей, чего нельзя добиться измерением интенсивности или просто пространственных корреляций рассеянных фотонов [3, с. 1–15].

Было показано, что антенны, представляющие собой линейную цепочку из более чем двух ДУС и находящиеся в СД состояниях, также демонстрируют информационное преимущество перед ПК состояниями такой антенны [2, с. 5–6].

Вместе с тем, были исследованы возможности двух бозонных мод в качестве квантовой антенны. В случае если обе моды антенны находятся в одинаковых когерентных состояниях, то интенсивность поля в плоскости перпендикулярной направлениям дипольного момента является анизотропной в отличие от теплового состояния. Этот факт позволяет преодолеть проблему расходимости ошибки уже при измерении интенсивности. Для теплового состояния обеих мод анизотропной является двухвременная корреляционная функция, измерение которой также позволяет преодолеть расходимость ошибки [1, с. 1–7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

На основе теории открытых квантовых систем и управляющего уравнения Линдблада проведено теоретическое исследование динамики возбуждения в цепочках взаимодействующих бозонных мод или ДУС в присутствии неоднородных потерь. Используя подход на основе информации Фишера, исследованы преимущества использования таких цепочек в качестве квантовых антенн для сканирования в дальнем поле.

В диссертации получены следующие научные результаты:

1. Показано, что цепочки унитарно связанных бозонных мод с усиленными потерями в каждой второй моде проявляют известные в фотонике свойства неэрмитовой динамики. Обнаружено, что в спектре эффективного гамильтониана, описывающего такую систему, существуют исключительные точки, определяющие время, за которое локализованное возбуждение размазывается по всей цепочке (время смешивания). Установлено, что управляя константой унитарной связи между модами, а также скоростью потерь в каждой второй моде, можно добиться логарифмической зависимости времени смешивания от числа узлов цепочки, что определяется положением исключительных точек в

пространстве параметров системы. Для любого фиксированного отношения константы взаимодействия к скорости потерь по мере увеличения числа узлов система в конечном итоге пересекает последнюю исключительную точку и время смешивания приобретает квадратичную зависимость от числа узлов. Можно расширить область логарифмической зависимости, подобрав локализованное начальное состояние [6].

Выявлено, что описанные цепочки могут демонстрировать ряд аномальных режимов переноса возбуждения в зависимости от начального состояния цепочки. Возможны режимы гипербаллистического распространения возбуждения, субдиффузионные режимы и даже локализация возбуждения [5].

2. Показано, что нелинейные потери в системе связанных бозонных мод позволяют нарушить принцип взаимности распространения света. Установлено, что нелинейные потери позволяют создать одномодовый оптический изолятор. Предложен способ сделать это с помощью нелинейных когерентных потерь. Также показано, что с помощью дефазировки можно нарушить взаимность и предложена конкретная схема, включающая светоделитель и устройство, дефазирующее свет в энергетическом базисе [4].

3. Продемонстрировано, что простейшая квантовая антенна, состоящая из двух взаимодействующих диполей, описываемых как двухуровневые системы, способна создавать состояние поля, которое позволяет достигнуть сверхразрешения при сканировании в дальней зоне. Показано, что при измерении пространственно-временных корреляций поля такой антенны, которое было рассеяно от объекта, можно получить больше информации о геометрической структуре сканируемого объекта, чем при измерении без временных корреляций. Установлено, что такое измерение пространственно-временных корреляций позволяет преодолеть «рэлеевскую расходимость» [3].

Показано, что простейшая квантовая антенна, состоящая из двух взаимодействующих диполей, описываемых как бозонные моды, также позволяет преодолеть «рэлеевскую расходимость» и достигнуть сверхразрешения, даже если диполи находятся в состояниях, соответствующих классическим состояниям. Установлено, что если диполи находятся в одинаковых когерентных состояниях, то для сверхразрешения достаточно уже измерения интенсивности, а если они находятся в тепловых состояниях, необходимо измерение временных корреляций рассеянного поля [1].

4. Для квантовой антенны, которая состоит из цепочки невзаимодействующих ДУС, расположенных на одной прямой, показано,

что, если она находится в симметричном состоянии Дике, то при определённых условиях возможны запрещенные углы: вероятность обнаружить фотон в определённых направлениях равна нулю. Установлено, что такое поведение поля невозможно для псевдоклассических, перепутанных состояний антенны с таким же средним числом возбуждений. В задаче обнаружения угла поворота квантовой антенны продемонстрировано информационное преимущество состояния Дике с квантовой запутанностью по сравнению с псевдоклассическим аналогичным состоянием антенны для квантовой метрологии [2].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в диссертации результаты представляют интерес с точки зрения практической реализации целого ряда устройств для приложений квантовой оптики и интегральной фотоники.

Результаты первой главы можно использовать для оптимизации параметров устройств, в которых необходимо быстро и эффективно переносить сигнал между оптическими модами. Например, для создания оптических делителей и разветвителей.

Результаты второй главы могут быть использованы для создания невзаимных устройств, таких как оптические изоляторы, циркуляторы и т.д. В особенности эти результаты актуальны для интегральных оптических схем.

Результаты третьей главы имеют большую практическую значимость при создании схем квантовой микроскопии позволяющих преодолеть классический предел разрешения. Реализация описанных квантовых антенн может быть использована для сканирования структуры «хрупких» объектов (например, биообъектов).

Также, развитая в ходе диссертационной работы методология может быть использована для исследования особенностей неэрмитовой физики на основе пассивных волноводных сетей.

Список публикаций соискателя ученой степени

Статьи в научных изданиях:

1 Пешко, И.А. Уход от “рэлеевской катастрофы” при использовании асимметричных антенн // Журнал прикладной спектроскопии. — 2020. — № 87.— С. 407–412.

2 Пешко, И.А. Запрещенные углы излучения квантовых антенн // Журнал прикладной спектроскопии. — 2021. — № 88.— С. 682–688.

3 Quantum noise radar: superresolution with quantum antennas by accessing spatiotemporal correlations / I. Peshko, D. Mogilevtsev, I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. P. Nizovtsev, G. Ya. Slepyan, A. Boag // Opt. Express. — 2019. — Vol. 20, №27.— С. 29217–29231.

4 I. Peshko, D. Pustakhod, D. Mogilevtsev, Breaking reciprocity by designed loss // J. Opt. Soc. Am. B — 2022. — Vol. 7, №39.— С. 1926–1935.

5 I. Peshko, G. Ya. Slepyan, D. Mogilevtsev, Anomalous transport in periodic photonic chains with designed loss // Phys. Rev. B — 2023. — Vol. 107, №. 5.— С. 054308.

6 I. Peshko, M. Antsukh, D. Novitsky, D. Mogilevtsev, Optimizing mixing in the Rudner-Levitov lattice // J. Opt. Soc. Am. B — 2021. — Vol. 40, №. 10.— С. 2566–2575.

Тезисы докладов:

7 Superresolution and overcoming “Rayleigh catastrophe” via delayed correlations measurement / I. Peshko, D. Mogilevtsev, I. Karuseichyk, A. P. Nizovtsev, G. Ya. Slepyan, A. Boag. // ICQOQI'2019, (May 13-17, Minsk, Belarus).

8 Super-resolution by accessing spatiotemporal correlations / D. Mogilevtsev, I. Peshko, I. Karuseichyk, A. P. Nizovtsev, G. Ya. Slepyan, A. Boag. // CEWQO 2019, (June 3-7, Paderborn, Germany).

9 The Concepts of Quantum Antennas and their Potential Applications in Quantum Far-field Sensing / Gregory Ya. Slepyan, Dmitri Mogilevtsev, Ilja Peshko, Alexander B. Mikhalychev, Ilya Karuseichik, Alexander P. Nizovtsev, Amir Boag // URSI GASS 2021, Rome, Italy, 29 August - 4 September 2021.

10 Quantum Noise Radar: Assessing Quantum Correlations / D. Mogilevtsev, I. Peshko, I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. P. Nizovtsev, G. Ya. Slepyan, A. Boag // COMCAS 2019, 1-3 November, Tel Aviv, Israel.

11 D. Mogilevtsev, I. Peshko, G. Y. Slepian, A. Boag, Collective Emission of Quantum Antennas for Super-Resolution: Using Temporal Correlations // Proceedings of the 2019 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS), 27-31 May, San Diego, USA.

12 Quantum noise radar: superresolution with quantum antennas by accessing spatiotemporal correlations / D. Mogilevtsev, I. Peshko, I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. P. Nizovtsev, G. Ya. Slepian, A. Boag // ICEAA 2019, 9-13 September 2019, Granada, Spain.

Материалы конференций:

13 И. А. Пешко, Г. Я. Слепьян, Д. С. Могилевцев. "Аномальное распространение света в фотонных сетях с искусственными потерями" // VII Конгресс физиков Беларуси (26-28 апреля 2023 года, Минск).

14 И.А. Пешко. "Аномальное распространение света в фотонных сетях с искусственными потерями" // XXXI ФКС, (13-14 апреля 2023 года, Гродно).

15 М.А. Анцух, П.А. Леоник, А.И. Пешко. «Минимизация времени смешивания в решетках Руднера-Левитова оптимизацией начального состояния» // Мат. XI Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики - 2024». Минск, 24-26 апреля 2024, С.57-60.

16 А.И. Пешко. «Смешивание в цепочках волноводов с потерями» // Мат. XI Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики - 2024». Минск, 24-26 апреля 2024, С.87-90.



РЕЗЮМЕ

Пешко Илья Александрович

КВАНТОВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ В ДАЛЬНЕМ ПОЛЕ

Ключевые слова: квантовые антенны, квантовая метрология, неэрмитова фотоника, квантовые блуждания, время смешивания, нарушение взаимности, информация Фишера, сверхразрешение.

Целью исследования является анализ возможностей использования квантовых систем в присутствии потерь в качестве квантовых антенн для метрологических приложений.

Методы исследования: методы квантовой оптики и теории открытых квантовых систем, аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений, а также численные методы, встроенные в систему компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

В результате исследований показано, что, управляя константой унитарной связи в цепочке взаимодействующих бозонных мод, а также скоростью потерь в каждой второй моде, можно добиться логарифмической зависимости времени смешивания от числа узлов цепочки. Нелинейные потери в системе связанных бозонных мод позволяют нарушить принцип взаимности распространения света. Важным условием такого нарушения являются не только нелинейные потери, но также и асимметричная структура такого устройства. Установлено, что нелинейные потери позволяют создать одномодовый оптический изолятор. Простейшая квантовая антенна, состоящая всего из двух взаимодействующих диполей, описываемых двухуровневыми системами, способна создавать состояние поля, которое позволяет достигнуть сверхразрешения при сканировании в дальней зоне.

Рекомендации по использованию. Полученные в диссертации результаты представляют интерес с точки зрения практической реализации целого ряда оптических устройств, таких как: квантовые антенны, оптические делители, оптические изоляторы и т.д.

Области применения: квантовая оптика, квантовая метрология, неэрмитова фотоника.

РЭЗІЮМЭ

Пяшко Ілля Аляксандравіч

КВАНТАВЫЯ АНТЭННЫ ДЛЯ СКАНАВАННЯ У ДАЛЁКІМ ПОЛІ

Ключавыя словы: квантавыя антэны, квантавая метралогія, неэрмітавая фатоніка, квантавыя блуканні, час змешвання, парушэнне ўзаемнасці, інфармацыя Фішэра, звышразрозненне.

Мэтай даследавання з'яўляецца аналіз магчымасцяў выкарыстання квантавых сістэм у прысутнасці страт у якасці квантавых антэн для метралагічных прыкладанняў.

Метады даследавання: метады квантавай оптыкі і тэорыі адкрытых квантавых сістэм, аналітычныя і лікавыя метады рашэння дыферэнцыяльных раўнанняў, а таксама лікавыя метады, убудаваныя ў сістэму кампутарнай алгебры Wolfram Mathematica.

У **выніку даследаванняў** паказана, што, кіруючы канстантай унітарнай сувязі ў ланцужку ўзаемадзеінічаючых базонных мод, а таксама хуткасцю страт у кожнай другой модзе, можна дамагчыся лагарыфмічнай залежнасці часу змешвання ад ліку вузлоў ланцужка. Нелінейныя страты ў сістэме звязаных базонных мод дазваляюць парушыць прынцып узаемнасці распаўсюджвання святла. Важнай умовай такога парушэння з'яўляюцца не толькі нелінейныя страты, але таксама і асіметрычная структура такой прылады. Устаноўлена, што нелінейныя страты дазваляюць стварыць аднамодавы аптычны ізалятар. Найпростая квантавая антэна, якая складаецца ўсяго з двух якія ўзаемадзеінічаючых дыполяў, апісаных двухузроўневымі сістэмамі, здольная ствараць стан поля, якое дазваляе дасягнуць звышразрозненне пры сканаванні ў далёкай зоне.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя ў дысертацыі вынікі ўяўляюць цікавасць з пункту гледжання практычнай рэалізацыі цэлага шэрагу аптычных прылад, такіх як: квантавыя антэны, аптычныя разгаліноўцы, аптычныя ізалятары і г.д.

Вобласці прымянення: квантавая оптыка, квантавая метралогія, неэрмітавая фатоніка.

SUMMARY

Peshko Ilya

QUANTUM ANTENNAS FOR FAR-FIELD SCANNING

Keywords: quantum antennas, quantum metrology, non-Hermitian photonics, quantum walks, mixing time, breaking reciprocity, Fisher information, super-resolution.

The aim of research is to analyze the possibilities of using quantum systems in the presence of losses as quantum antennas for metrology applications.

Research methods: methods of quantum optics and the theory of open quantum systems, analytical and numerical methods for solving differential equations, as well as numerical methods built into the Wolfram Mathematica computer algebra system.

As a **result of the research**, it was shown that by controlling the unitary coupling constant in a chain of interacting bosonic modes, as well as the loss rate in every second mode, it is possible to achieve a logarithmic dependence of the mixing time on the number of nodes in the chain. Nonlinear losses in a system of coupled bosonic modes make it possible to violate the principle of reciprocity of light propagation. An important condition for such a violation is not only nonlinear losses, but also the asymmetric structure of such a device. It has been established that nonlinear losses make it possible to create a single-mode optical isolator. The simplest quantum antenna, consisting of just two interacting dipoles described by two-level systems, is capable of creating a field state that allows one to achieve super-resolution when scanning in the far field.

Recommendations for use. The results obtained in the dissertation are of interest from the point of view of the practical implementation of a number of optical devices, such as: quantum antennas, optical splitters, optical isolators, etc.

Applications: quantum optics, quantum metrology, non-Hermitian photonics.

ПЕШКО Илья Александрович

**КВАНТОВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ В
ДАЛЬНЕМ ПОЛЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Подписано в печать «5» августа 2024 г. Формат 60 × 90 1/16.
Бумага – офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.4
Уч. изд. л. 1.2 Тираж 60 экз. Заказ № 7.

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА НАН БЕЛАРУСИ,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2.
Отпечатано на ризографе ГНУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И.
СТЕПАНОВА НАН БЕЛАРУСИ».