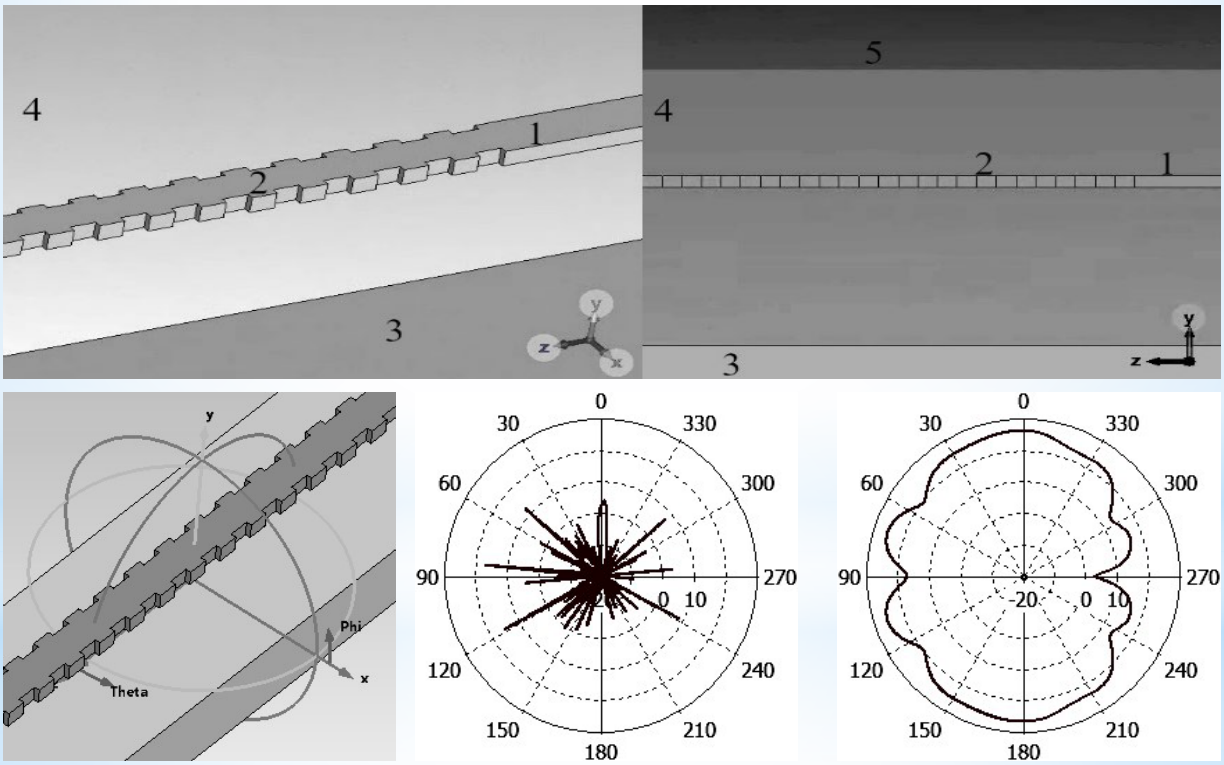
Издательство ИТПЭ РАН

ISSN 2949-0553

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

научный рецензируемый журнал



Гибридная оптическая антенна на основе нитрида кремния для пространственного сканирования

С.Д. Мошиченко, А.Б. Клещенков

2025 Т. 4. № 5 (19)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук

Журнал основан в 2022 году

Том 4. Выпуск № 5 (19)

Современная электродинамика

научный рецензируемый журнал

Под редакцией академика РАН А.Н. Лагарькова

Москва, 2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

ISSN 2949-0553

Современная электродинамика

Научный рецензируемый журнал. Издаётся с октября 2022 года.

Выходит один раз в два месяца.

Т. 4. № 5 (19)

2025

Главный редактор академик РАН А.Н.Лагарьков

Редакционная коллегия: к.т.н. Н.П. Балабуха, к.т.н. К.М. Басков, д.ф.-м.н. А.П. Виноградов, д.ф.-м.н. А.А. Дорофеенко, д.ф.-м.н. В.Н. Кисель, к.ф.-м.н. К.И. Кугель, к.т.н. Н.Л. Меньших, чл.-корр. РАН А.М. Мерзликин, д.ф.-м.н. А.А. Пухов, д.ф.-м.н. А.Л. Рахманов, д.ф.-м.н. А.В. Рожков, д.ф.-м.н. К.Н. Розанов, к.т.н. И.А. Рыжиков, д.ф.-м.н. А.К. Сарычев

Адрес редакции:

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 6

тел., факс 8 (495) 484-26-33

эл.почта electrodynamics@mail.ru

Зав. редакцией Е.В. Зеневич

Компьютерная вёрстка: Е.В. Зеневич

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-83666 от 26.07.2022 г.

Подписано в печать 31.10.2025. Тираж 30 экз.

© ИТПЭ РАН, 2025

Содержание номера

1 Вопросы экспериментальной электродинамики **4**
Черкесова Л.В., Болдырихин Н.В., Сафарьян О.А., Алфёрова И.А.
Возможности защиты конфиденциальных сообщений в системах передачи данных с помощью явлений динамического хаоса и оптических вихрей 4

2 Взаимодействие электромагнитного поля с материалами **23**
Тарасов А.П., Рогаткин Д.А.
Измерение светорассеивающих свойств фторопласта в диапазоне 400 – 800 нм 23

3 Вычислительная электродинамика **28**
Мошиченко С.Д., Клещенков А.Б.
Гибридная оптическая антенна на основе нитрида кремния для пространственного сканирования 28

УДК 004.056

Возможности защиты конфиденциальных сообщений в системах передачи данных с помощью явлений динамического хаоса и оптических вихрей

Л.В. Черкесова * [1], Н.В. Болдырихин[1], О.А. Сафарьян [1], И.А. Алфёрова [1]

[1] *Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия*

Статья поступила в редакцию 09.10.2025
Одобрена после рецензирования 20.10.2025
Принята к публикации 31.10.2025

Аннотация

Рассмотрена возможность создания систем конфиденциальной (секретной) связи с использованием явлений детерминированного хаоса и оптических вихрей, дана оценка их характеристик с точки зрения информационной безопасности. Показаны возможности применения методов нелинейной динамической *криптологии* для решения задач защиты информации. Выявлены особенности генерации, синхронизации, модуляции и управления хаотическими колебаниями при их использовании в системах передачи данных. Определены условия возникновения режимов детерминированного хаоса в динамической нелинейной параметрической системе. Показано, что свойство *грубости* системы оказывается большим преимуществом при решении задач построения систем конфиденциальной (секретной) связи с использованием нелинейных параметрических генераторов, работающих в хаотическом режиме. Показаны фазовые портреты аттракторов в характерных точках плоскости параметров.

В качестве генератора детерминированного хаоса оптического диапазона предложено использовать одну из разновидностей нелинейного параметрического генератора – *нелинейный кольцевой интерферометр* - резонатор, на базе которого разработан детектор топологического заряда вихря, предназначенный для измерения интенсивности светового пучка. Предложены математические модели процессов, происходящих в нелинейном кольцевом интерферометре, учитывая связь статического электрического поля с диффузией. Исходя из устройства кольцевых волоконно-оптических систем, выполненных на базе *эрбиевого лазера*, сопоставлены различные виды схем хаотической связи с целью выбора из них предпочтительной модели. Чтобы повысить *скрытность* стеганографических сообщений, передаваемых в системе хаотической связи, использующей нелинейное подмешивание скрытого сигнала, рекомендовано модифицировать схему шифрования / дешифрования, введя в передатчике и приёмнике второй контур.

С повышением числа параметров, от которых зависит электродинамика нелинейной параметрической системы при её использовании для шифрования сообщений, возрастает и количество *криптографических ключей*. Как показывают расчёты, если величина *расстройки времени (рассогласования) запаздывания сигнала* между контурами передачи и приёма системы хаотической связи уменьшается, то сокращается и количество *искажений*, возникающих в дешифруемом сообщении, что повышает качество функционирования канала связи.

Проведён анализ воздействия, оказываемого на характеристики системы передачи данных *возмущающими факторами*, такими как неидентичность (несовпадение) параметров компонентов передатчика и приёмника; нелинейные искажения, шумы и помехи в каналах связи; и неравномерность и спонтанность амплитудно-частотных характеристик элементов.

После анализа различных систем передачи и защиты конфиденциальных данных в системах связи с применением динамического хаоса и сопоставления полученных результатов построена классификация систем хаотической связи, существующих сегодня.

Ключевые слова: хаотическая динамика, радиочастотный диапазон, микроволновый диапазон, оптический диапазон, криптология, динамический нелинейный параметрический генератор, нелинейный кольцевой интерферометр, теория динамического хаоса, теория нелинейных колебаний и волн, управляемая и самоуправляемая нелинейность, оптические вихри, эмерджентный эффект, канал связи, криптографические ключи, хаотическая связь

EDN: GRGJCW

doi:10.24412/2949-0553-2025-519-04-22

*Автор, ответственный за переписку: Лариса Владимировна Черкесова, chia2002@inbox.ru

 ©2025 Л.В. Черкесова, Н.В. Болдырихин, ...

Possibilities of confidential messages protection in data transmission systems using phenomenon of dynamic chaos and optical vortexes

L.V. Cherckesova*[1], N.V. Boldyrikhin[1], O.A. Safaryan[1], I.A. Alferova[1]

[1] *Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

* chia2002@inbox.ru

Abstract

This article considers possibility of confidential (secret) communication systems creating using deterministic chaos and optical vortices phenomena, and assesses their characteristics from information security point of view. Possibilities of *nonlinear dynamic* cryptology methods using for solving data security problems are shown. Features of generation, synchronization, modulation and control chaotic oscillations when using in data transmission systems are revealed. Conditions for deterministic chaos modes occurrence in dynamic nonlinear parametric system are determined. It is shown that *system roughness* property turns out to be great advantage when solving problems of confidential (secret) communication systems constructing using nonlinear parametric generators operating in chaotic mode. Attractors phase portraits at parameter plane characteristic points are shown.

As optical range deterministic chaos generator, it is proposed to use one of nonlinear parametric generator varieties – *nonlinear ring interferometer* – resonator, on base of which detector of topological charge of vortex has been developed, intended for intensity of light beam measuring. Mathematical models of processes occurring in nonlinear ring interferometer are proposed, taking into account static electric field with diffusion relationship. Chaotic communication various schemes are compared, using example of ring fiber-optic systems based on *erbium laser*. It is recommended to modify "encryptor"/ "decryptor"scheme by adding second circuit in transmitter and receiver, to increase the secrecy of transmitted steganographic messages in system with hidden signal nonlinear mixing.

With increasing dynamic nonlinear parametric system parameters number, on which its electrodynamics depends, when using system as encryptor, *cryptographic keys* number increases.

As calculations show, when *delay time mismatch* value of signal passing between transmitter and receiver circuits of chaotic communication system is reduced, distortions amount occurring in decrypted message is reduced also. Analysis of disturbing factors impact on data transmission system characteristics is carried out. They are: non-identity (mismatch) of transmitter and receiver components parameters; *nonlinear distortions* in communication channels, *noise* and *interference*; as well as elements *unevenness* of amplitude-frequency characteristics. After comparing various systems for protecting transmitted data in dynamic chaotic communication systems, and comparing results obtained, chaotic communication systems existing today modern classification is given.

Key words: chaotic dynamics, radio frequency range, microwave range, optical range, cryptology, dynamic nonlinear parametric oscillator, nonlinear ring interferometer, theory of dynamic chaos, theory of nonlinear oscillations and waves, controlled and self-controlled nonlinearity, optical vortices, emergent effect, communication channel, cryptographic keys, chaotic communication

Введение

В современной геополитической ситуации задача сохранения конфиденциальности и секретности информации требует нового теоретического осмысления и технического обеспечения. Создание современных методов защиты информации как программных, так и аппаратных, – задача, объединяющая различные научные области – нелинейную (хаотическую) динамику, оптику, квантовую механику, радиофизику и криптографию как неотъемлемую часть защиты данных и информационной безопасности. В каждой науке есть свои возможности защиты информации, не только дополняющие друг друга, но и порождающие эффект эмерджентности – возникновения новых свойств [1].

В 90-е годы XX–го века были обнаружены и исследованы явления, связанные с *непериодическими колебаниями*, возникающими в нелинейных динамических системах в определённых условиях. Подобные стохастические, или хаотические колебания, имеющие достаточно ограниченное количество степеней свободы, были зафиксированы во многих нелинейных динамических системах, имеющих самую разнообразную природу. Их свойства могут быть описаны с общих позиций синергетики [2] и проявляются в космологических, радиофизических, оптических, механических, химических, геофизических, биоло-

гических, экономических, социальных, когнитивных и др. нелинейных динамических системах. Для изучения многих феноменов, изучаемых различными областями науки, для решения задач хаотической динамикой электромагнитных полей наиболее пригодной оказалась теория хаоса.

Исследование *динамического хаоса* как детерминированного явления, привело к пониманию того, что хаос представляет собой основу построения принципиально новых перспективных систем обработки информации. Мозг человека, как и мозг других живых существ, как оказалось, функционирует в хаотическом режиме [3].

Исследования в этой области привлекают пристальное внимание со стороны учёных и исследователей всего мира. Формируются различные математические модели, описывающие процессы обработки данных с применением явлений хаотической динамики, к которым относятся нейроинформационные структуры (1D, 2D, 3D и многомерные отображения); нейронные цепи, решётки и пространства ячеечных хаотических структур [4].

С 1990-х годов разрабатываются принципы построения перспективных устройств защиты данных на базе хаотических явлений и оптических вихрей, которые рассматриваются в качестве потенциальных носителей информации [5]. Такое научное направление получило название *нелинейной динамической криптологии*. Поставленная авторами цель исследований заключается в теоретическом изучении электродинамических характеристик нелинейных параметрических генераторов детерминированного хаоса, а также создание на их основе защищённых систем конфиденциальной (секретной) связи, включая определение свойств и параметров нелинейных параметрических генераторов (НПГ) различных разновидностей и перспективных устройств связи на их базе.

1. Криптология как стратегия защиты информации

Основными методами защиты информации принято считать:

1. *Физические*, призванные сделать канал связи недоступным для противника.
2. *Стеганографические*, скрывающие сам факт передачи информации.
3. *Криптографические*, предназначенные для передачи по открытым каналам связи конфиденциальных (секретных) данных, проверки передаваемых сообщений на подлинность, хранения их в зашифрованном виде на съёмных носителях и др.

Физические и стеганографические методы весьма разнообразны и используют винтовые дислокации волнового фронта пучка (*оптические вихри*) [6]. Основная причина их появления – кодирование информации *формой фазового фронта*, а не уровнем интенсивности светового пучка. Корректный приём информационного сообщения затруднителен для противника, если его фотоприёмник смещён относительно оси светового пучка.

Из свойств таких вихревых пучков следуют основные достоинства, присущие «*вихревой связи*». Это *свойства: физической стойкости* – противодействия и отражения возможной *угрозы прослушивания* бокового рассеянного излучения со стороны противника; а также *электромагнитной совместимости* взаимодействующих абонентов системы связи при использовании ими одинаковых участков длин волн, частот и областей пространства [7].

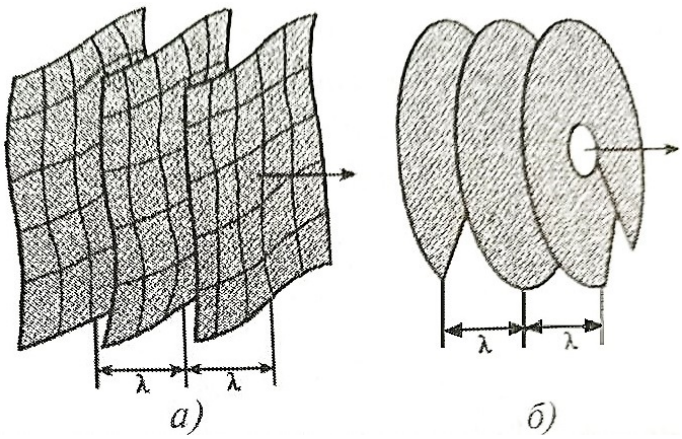


Рисунок 1 – «Волновые фронты распространения волн с колебаниями одинаковой фазы а) в отсутствии винтовой дислокации; б) при наличии винтовой дислокации» [7]

Пучки света переносят энергию; они имеют линейные и угловые моменты количества движения. Полный угловой момент количества движения включает *спиновую составляющую*, что связано с поляризацией, которая обусловливается фактом наличия спина у фотона; и *орбитальную составляющую*, которая определяется фактом наличия пространственного поперечного профиля, показывающего интенсивность и фазы излучения.

В ситуации, если электромагнитное поле имеет *винтовую дислокацию* – структуру, присущую *волновому фронту* (или оптическому вихрю, как показано на рисунке 1), то значения углового момента поля окажутся значительными по величине.

При наличии оптического вихря в световом (вихревом, или сингулярном) пучке, в окрестности самого вихря, комплексная амплитуда поля выражается следующей формулой:

$$A = Cr^{V_d} \exp\left(jV_d\vartheta\right),$$

где C – постоянная; $r \equiv |R|$ – интервал от средины оптического вихря, $r = (x, y)$ – радиус-вектор точки, расположенной в поперечном сечении светового пучка; при $r = 0$ имеет место сингулярность волнового фронта: значение фазы в ней не определено, интенсивность равна нулю; V_d – топологический заряд (квантовое число), присущее оптическому вихрю, ϑ – азимутальный угол (поворота вокруг оптической оси), $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, комплексное число [8].

Подобные световые пучки имеют *орбитальный угловой момент*, равный $\hbar V_d$, что эквивалентно одному фотону. Значению бита или байта информации можно поставить в соответствие значение топологического заряда V_d. Тогда, если $V_d = 0$, то принимается значение *логического нуля*, а если $V_d = 1$ – то значение *логической единицы*. В системах оптической связи для обработки информации можно использовать величину *орбитального углового момента*, для определения которого достаточно найти значение топологического заряда V_d и умножить его на $\hbar$ – приведённую постоянную Планка [9].

Таким образом, оптический вихрь может служить переносчиком данных в системах сингулярно-оптической (вихревой) связи. Построение подобной системы связи предполагает ответы на многие вопросы: какая аппаратура в ней должна применяться, как влияют на её работу фазовые и амплитудные искажения светового пучка при его распространении в оптически неоднородной среде. Ответом служит разработка системы передачи данных на основе детектора оптического вихря – принцип работы, модель и моделирование (симуляция) условий воздействия турбулентности (шума или других видов помех).

2. Принцип сингулярно-оптической (вихревой) системы связи

Предположение о возможности построения системы сингулярно-оптической, или вихревой связи базируется на свойствах *винтовых дислокаций волнового фронта* электромагнитного поля. Подобная система обладает признаками как *стеганографической*, так и *физической стойкости*, что демонстрирует работа *нелинейного кольцевого интерферометра*, способного распознавать топологический заряд (порядок) оптического вихря.

Упростив схему такого интерферометра, можно показать принцип действия детектора заряда вихря и системы связи на его основе. Шумы фотоприёмника, а также фазовые и амплитудные искажения, характерные для светового пучка при его распространении в оптически неоднородной среде, например, в турбулентной атмосфере, оказывают большое влияние на работу системы связи. Вместе с тем, при вычислении ошибки передачи данных, вызванной шумами и искажениями, становится очевидным, что её можно минимизировать.

Следует принять во внимание, что лазерный пучок света распространяется в канале связи с искажениями, вызванными, например, турбулентностью атмосферы, что повышает вероятность появления существенных ошибок в передаваемой информации.

В каждом случае следует подвергать анализу возможность появления всевозможных искажений и количество ошибок. Их возникновение непосредственно зависит как от состояния искажающей среды, так и от работы самой системы связи и недостатков её реализации.

Если в хаотических системах связи используются оптические вихри для шифрования данных, то целесообразно изучить механизм воздействия самой искажающей среды на процесс распространения вихревых лазерных пучков. В статье [9] авторы изучили влияние аберраций – случайных отклонений и искажений сигнала, возникших из-за атмосферной турбулентности, на качество функционирования оптической системы связи.

В той же работе рекомендована новая концепция сингулярно-оптической системы связи и показан принцип её действия. В схеме имеется *передатчик*, состоящий из генератора оптического вихря, на который поступают данные, и предварительного корректора волнового фронта; и *приёмник*, включающий

датчик волнового фронта, обозначенный $S(r,t)$; детектор топологического заряда $V_d(r,t)$ и положения оптического вихря $r_d(t)$; корректор волнового фронта и компаратор, выполняющий сравнение входных сигналов (рисунок 2).

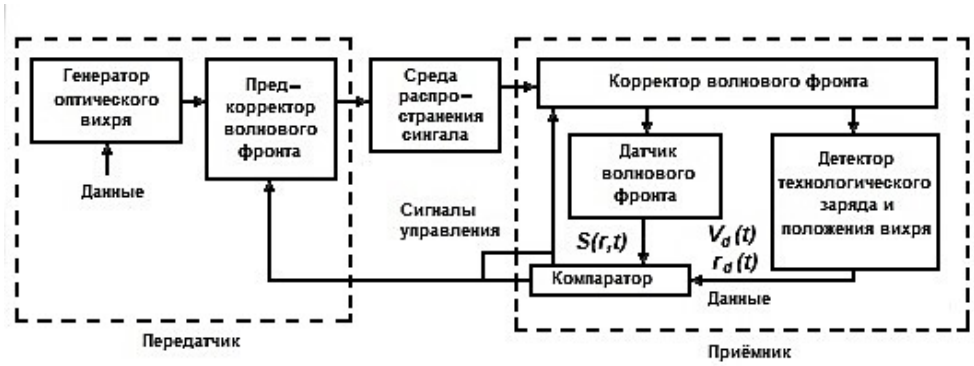


Рисунок 2 – «Сингулярно-оптическая система связи, состоящая из передатчика и адаптивного приёмника» [9]

В предложенной системе связи новым является тот факт, что в приёмнике кроме датчика волнового фронта $S(r,t)$ есть детектор технологического заряда $V_d(r,t)$ и параметров вихря $r_d(t)$. Для восстановления фазы детектор не предусмотрен, но он фиксирует *присутствие* и определяет *положение* оптического вихря в передаваемом сигнале. В результате устанавливается значение неискажённого распределения фазы $S_0(r,t)$ и амплитуды светового пучка. При этом множество эталонных информационных сигналов согласовывается заранее, что означает, что содержание передаваемого значения бита («0» или «1») в системе связи является известным фактом.

Детектор технологического заряда и положения вихря целесообразно строить на базе регистрирующих или измерительных устройств, а также приборов, способных определить: топологический заряд вихря с помощью метода голографического распределения вихревых лазерных пучков согласно дифракционным максимумам [7]; распределение градиента фазы сигнала, например, пирамидального датчика [8]; порядок распределения интенсивности немонохроматического сингулярного пучка [9]; интерферограммы [10] и др.

Вместе с тем, быстродействие существующих сегодня устройств, необходимых для подобных операций, является слишком низким (порядка десятка килогерц [10]) и не удовлетворяет жёстким критериям современных систем оптической связи.

С другой стороны, многие явления, эффекты и закономерности, найденные в последние десятилетия, всё ещё находятся в стадии исследований. К настоящему времени на их основе ещё созданы новые алгоритмы нахождения положения (локации) оптических вихрей в пространстве, а также их топологических зарядов. По этим и не только причинам метрологические принципы, предназначенные для создания измерительной аппаратуры (на базе как микропроцессоров, так и компьютеров), ещё не созданы, а устройства, необходимые для нахождения величины заряда оптического вихря в близко локализованных структурах, имеющих одинаковый заряд, сегодня ещё не построены и находятся в стадии разработки.

Наиболее перспективным считается метод голографического разделения оптических вихревых пучков [11], однако на сегодня он всё ещё не получил практической реализации.

В качестве генератора детерминированного хаоса *оптического диапазона* в работе [7] предлагается применить одну из разновидностей нелинейных параметрических генераторов – *нелинейный кольцевой интерферометр*. На его базе можно разработать быстродействующий детектор топологического заряда вихря, предназначенный для измерения интенсивности светового пучка и способный работать с субтерагерцовой скоростью. Его преимущество – возможность двумерного преобразования светового поля лазерного пучка в его поперечной плоскости, а также наличие многих проходов излучения через контур обратной связи.

3. Моделирование физических процессов в нелинейной оптической среде

Рассмотрим физические процессы, происходящие на входе и на выходе оптической среды, обладающей эффектом Керра – *квадратичным электрооптическим эффектом*, представляющим собой

явление изменения значения показателя преломления оптического материала пропорционально квадрату напряжённости приложенного электрического поля.

Исследуем связь электрических полей керровской среды с диффузией – процессом взаимопроникновения молекул одного вещества между молекул другого, происходящих в нелинейном кольцевом интерферометре – виде нелинейных параметрических генераторов.

Как известно, большинство изотропных материалов, к которым, например, относятся многие драгоценные камни (алмазы, гранаты, флюориты и др.), ряд металлов (алюминий, вольфрам, медь и др.), стёкла различных составов (кварцевые, ювелирные, стеклоуглероды и др.), жидкости (вода, бензин, спирт и др.), газы (азот, неон, аргон и др.) и другие вещества, находящиеся в *статическом электрическом поле*, проявляют себя как *одноосные кристаллы*. Для них направление оптической оси движется вдоль силовых линий поля.

Показатель преломления вещества при отсутствии поля обозначим как величину n_0; тогда для лучей, падающих параллельно и перпендикулярно, показатели преломления будут обозначены как $n_\parallel$ и $n_\perp$ соответственно. Для них верны законы Керра и Хоуэлока [9]:

$$\left(n_\parallel - n_\perp\right) = \lambda E B^2;\ \left(n_\parallel - n_\perp\right) = 2\left(n_\perp - n_0\right). \tag{1}$$

Здесь λ – длина световой волны, для которой определяется показатель преломления; E – вектор напряжённости для электрического поля, порождающего анизотропию, B – постоянная Керра.

Из соотношений (1) получаем следующие выражения:

$$n_\perp(\lambda) = n_0 + n_2 E^2;\ n_\parallel(\lambda) = n_0 + 2n_2 E^2, \tag{2}$$

где $n_2 = \lambda_0 B$.

Если на керровскую среду воздействует переменное во времени электрическое поле с постоянным направлением вектора напряжённости, то формирование ориентации молекул, находящихся в состоянии равновесия, а, значит, и показателей преломления $n_\parallel$ и $n_\perp$ для лучей, падающих параллельно и перпендикулярно, будет происходить асимптотически.

Назовём переменные показатели преломления лучей в текущий момент времени $n_\parallel(t)$ и $n_\perp(t)$ соответственно. Предположим, что процесс установления равновесной ориентации молекул и показателей преломления происходит в соответствии с экспоненциальным законом, асимптотически, с постоянной величиной по времени τ_n. В этом случае для переменных электрических полей будут выполняться следующие соотношения:

$$\frac{dn_\perp(t)}{dt} = \frac{\left|n_\perp - n_\perp(t)\right|}{\tau_n};\ \frac{dn_\parallel(t)}{dt} = \frac{\left|n_\parallel - n_\parallel(t)\right|}{\tau_n}. \tag{3}$$

Подставляя выражения (2) в уравнения (3), находим обобщённое уравнение в форме:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{n_0 + an \cdot n_2 E^2(t) - n(t)}{\tau_n}. \tag{4}$$

Здесь произведение принимает следующие значения: $an = 1$, если $n = n_\perp$; $an = 2$, если $n = n_\parallel$. Из-за диффузии (с коэффициентом D) молекул или носителей заряда нелинейной среды её показатель преломления изменяет своё значение. Это влечёт за собой появление поперечной связи электрических полей, являющейся локальным соединением. При этом воздействие диффузии следует принимать во внимание, скорее, как феноменологический эффект, важный для формулировки закономерностей, вставляя в выражение (4) оператор Лапласа.

В случае, когда вдоль оси z диффузии нет, в приближении для тонкой среды, приняв обозначение $r \equiv (x, y)$ из выражения (4), находим следующее соотношение:

$$\frac{\partial n(r,t)}{\partial t} = \frac{n_0(r) + an \cdot n_2(r) E^2(r,t) - n(r,t)}{\tau_n(r)} + D\Delta\left[n(r,t) - n_0(r)\right]. \tag{5}$$

Введя нормированный ко времени релаксации нелинейной среды и к квадрату некоего характерного размера r_0 эффективный коэффициент диффузии $D_e(r) = \tau_n(r) D/r_0^2$ и обозначая $r := r/r_0$, из уравнения (5) найдём выражение, описывающее эволюцию (развитие во времени, вдоль оси z) показателя преломления пространственно неоднородной в плоскости xOy тонкой керровской оптической

среды. В этом случае рассмотрим влияние на эту среду пространственно неоднородного в плоскости xOy электрического поля, переменного во времени, с учётом диффузии молекул нелинейной оптической среды. После громоздких преобразований из (5) получим следующее выражение:

$$\tau_n(r)\frac{\partial n(r,t)}{\partial t} = an(r)E(r,t) - [n(r,t) - n_0(r)] + D_e(r)\Delta[n(r,t) - n_0(r)]. \tag{6}$$

Если протяжённость l нелинейной керровской оптической среды вдоль траектории движения световой волны по оси Oz пренебрежимо мала, то это позволяет не учитывать величину искажения и деформации лучей в процессе преодоления нелинейной среды и работать с показателем преломления, усреднённым по длине l. Аналогично, можно пренебречь измерением *времени распространения* Δt_n статического электрического поля в керровской нелинейной оптической среде за интервал времени t_n: $\omega\Delta t_n \ll 2\pi$.

В этом случае можно не учитывать *эффекты преобразования энергии*, связанные с поляризацией и релаксацией нелинейной среды, а также явлениями дисперсии и дифракции.

Соотношение, связывающее значения напряжённости статического электрического поля на *входе* и *выходе* нелинейной оптической среды с учётом уравнения (6) выглядит как:

$$E_{out,nm}(r,t) = \sqrt{\alpha(r,t)}C_n(r)[E_{in,nm}(r,t) - t_n(r,t)], \tag{7}$$

где $\alpha(r,t) = 1/\{1 + dt_n(r,t)/dt\}$ – коэффициент, который в первом приближении выражает степень увеличения *объёмной плотности* энергии световой волны после того, как была изменена оптическая длина рассматриваемой нелинейной керровской оптической среды;
$C_n(r)$ – бугеровские потери в рассматриваемой среде, описываемые выражением $[\exp(-\alpha_b l/2)]$;
$t_n(r,t) = n(r,t)l/c$ – время распространения световой волны, прибывшей к моменту времени t из точки r' *входной плоскости* рассматриваемой среды в точку r её *выходной плоскости*;
$n(r,t)$ – показатель преломления для этой волны;
c – скорость света.

Из неравенства $\omega\Delta t_n \ll 2\pi$ при допущении, что $\Delta t_n \approx t_n(r,t)\frac{dt(r,t)}{dt}$, можно вывести альтернативное выражение и оценку его величины: $\frac{dt_n(r,t)}{dt} \ll \frac{\lambda}{n(r,t)} < 1$.

Отсюда следует, что $\alpha(r,t) \approx 1$, а в ранее полученных выражениях (6) и (7) скорость преобразования показателя преломления ограничена и определяется неравенствами:

$$\frac{d[n(r,t)l]}{cdt} \ll \frac{2\pi c}{\omega n(r,t)l}, \quad \text{или} \quad \frac{dn(r,t)}{dt} \ll \frac{2\pi c^2}{\omega n(r,t)l^2}. \tag{8}$$

В процессе широкомасштабной трансформации электрического поля воздействие линейного оптического элемента проявляется в том, что лазерный луч, пришедший в точку $r' \equiv (x', y')$ поперечного сечения светового пучка, попадает в точку $r \equiv (x, y)$.

В конечном итоге лазерный пучок проходит ряд пошаговых трансформаций: M_x или M_y – зеркальное отображение пучка света относительно прямой, параллельной оси Ox или Oy, проходящей через центр пучка – оптической оси интерферометра; поворот на угол Δ; растяжение поперечного сечения пучка в σ_x раз вдоль оси Ox (либо в σ_y раз вдоль оси Oy); сдвиг на величину δ_x вдоль оси Ox или на δ_y вдоль оси Oy. Отклонение лазерного луча $|r - r'|$ при этом сопоставимо с размерами самого светового пучка [12].

Предположим, что центральная часть входного лазерного пучка соответствует началу координат плоскости xOy, а направление вектора E остаётся неизменным. В том случае, если величины дифракции и дисперсии света пренебрежимо малы, подобные ограничения позволяют вычислить результат, который получится в итоге преобразования статического электрического поля после его широкомасштабной трансформации, с помощью уравнений:

$$E_{out}(r,t) = \kappa[r', t, \Theta(r',t)]\frac{E_{in}\{r', t - t_G[\Theta(r',t)]\}}{\sqrt{\sigma_x\sigma_y}}; \tag{9}$$

$$x' = M_y\left[(x-\delta_x)\cos\frac{(\Delta)}{\sigma_x} + (y-\delta_y)\sin\frac{(\Delta)}{\sigma_y}\right]; \quad y' = M_x\left[(y-\delta_y)\cos\frac{(\Delta)}{\sigma_y} - (x-\delta_x)\sin\frac{(\Delta)}{\sigma_x}\right]; \tag{10}$$

где $M_x = 1$ когда зеркального отображения от прямой, параллельной оси Ox, не происходит; $M_x = \breve{}1$ в противном случае. Аналогично, $M_y = 1$ при отсутствии зеркального отображения от прямой, параллельной оси Oy; $M_y = \breve{}1$ в противном случае. $\Theta(r', t)$ – угол между вектором напряжённости $E(r', t)$ статического электрического поля и осью Ox. $t_G[\Theta(r', t)]$ – время распространения статического электрического поля в преобразовывающем статическое электрическое поле линейном элементе G. $\kappa[r', t, \Theta(r', t)]$ – коэффициент потерь по амплитуде.

Прохождение в керровской оптической среде *нелинейного кольцевого интерферометра* лазерного светового пучка показано для случая поворота этого пучка на 120° элементом G, производящем преобразование статического электрического поля в плоскости xOy.

4. Защита информации с помощью детерминированного хаоса

Изучение особенностей процессов генерации хаотических колебаний, управления ими и их синхронизации [10] обнаружило целый ряд их уникальных характеристик. Благодаря этим свойствам хаотические колебания формируют уникальную группу явлений, которые могут быть использованы для создания современных систем связи – передачи и приёма информации:

1. Высокая пластичность хаотических колебаний – способность реализовать различные типы электромагнитных колебаний с широким спектром в одной и той же динамической нелинейной параметрической системе; при этом выбор режима хаотических колебаний осуществляется путём варьирования параметров этой системы;
2. Значение *энтропии Колмогорова–Синая* является положительным: этим хаотические сигналы отличаются от последовательностей псевдослучайных чисел, полученных с помощью генератора ПСЧ; хаотические колебания не являются периодическими во времени.
3. Возможность передачи по конфиденциальному (секретному) каналу связи нескольких *информационных сообщений* с помощью одного и того же носителя хаотических сигналов;
4. *Широкополосность*: информационная ёмкость хаотических сигналов намного выше, чем узкополосных сигналов. Это означает, что хаотические сигналы могут переносить гораздо больший объём полезной информации, не требуя преобразования спектральных характеристик. Свойство широкополосности обеспечивает гораздо большую скорость передачи данных, большую устойчивость работы системы связи и большую энергетическую эффективность;
5. Если спектр информационного сигнала будет сокрыт в спектре хаотического сигнала, то хаотические сигналы можно применять для секретной (конфиденциальной) связи.

Динамическая нелинейная параметрическая система со сложным поведением. Исходя из положений синергетики, чтобы в динамической нелинейной параметрической системе возник режим детерминированного хаоса, нужно, чтобы у неё имелось *не менее полутора* степеней свободы [11]. Генераторы хаотических колебаний конструируются как разновидности автогенераторов с несколькими степенями свободы за счёт включения в них нелинейных элементов с управляемыми параметрами. Несмотря на то, что для генерации хаотических колебаний вполне достаточно, чтобы система имела хотя бы *полторы степени* свободы, это не предел. На рубеже XX и XXI веков источники динамического хаоса были диверсифицированы, далеко выходя за эти рамки. Так, в работе [12] показано, что если в генераторе хаотических колебаний имеется хотя бы *две с половиной* степени свободы, то в таком устройстве для передачи хаотического сигнала можно добиться *полосового спектра.* Для уменьшения деформаций сигнала в приёмо-передающем тракте, определяемых ограниченной шириной самой полосы пропускания тракта, полосовой спектр является преимуществом.

Результаты изучения свойств нелинейных параметрических генераторов показывают, что хаотическая динамика в них обусловлена присутствием в фазовом пространстве системы *однородного гиперболического аттрактора*, что говорит о её структурной устойчивости.

Это значит, что характеристики хаотических режимов системы нечувствительны к изменениям её параметров. Такое свойство гиперболического аттрактора носит название *грубости*, а хаос – *грубым.* Грубость нелинейной динамической системы оказывается ценным преимуществом в задачах построения систем конфиденциальной (секретной) связи с использованием *хаотических режимов* работы НПГ [13–15]. *Значения параметров* системы играют роль *ключей шифрования.* В динамической нелинейной параметрической системе возможны как *регулярные*, так и *хаотические* колебания. Вероятность появления режимов детерминированных хаотических колебаний в подобной системе обусловлена тем фактом, что при определённых наборах параметров в области малых значений напряжения V динамика тока I колебательного контура может оказаться локально неустойчивой относительно возмущения

начальных условий, вызванных накачкой лазера.

На рисунках 3 – 6 показаны фазовые портреты аттракторов в характерных точках плоскости параметров. Области хаоса показаны светлыми линиями.

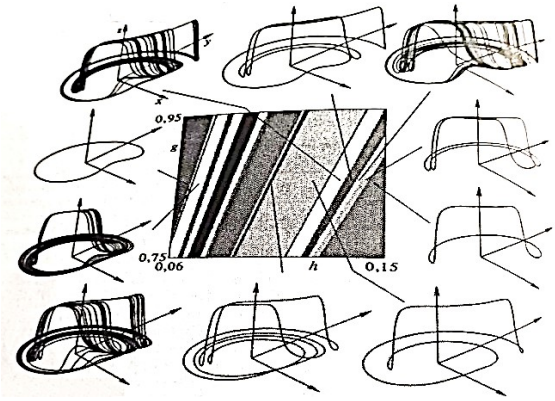


Рисунок 3 – «Фазовые портреты аттракторов для НПГ на плоскости параметров, на карте динамических режимов работы системы» [13]

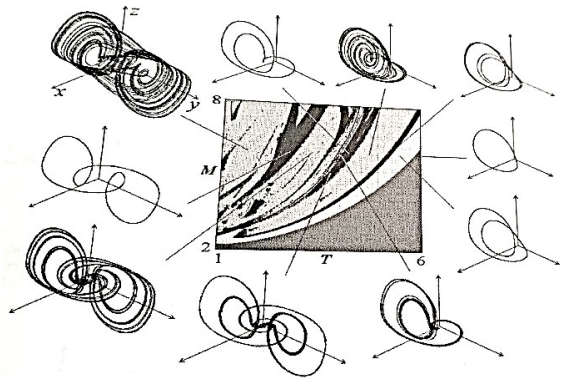


Рисунок 4 – «Фазовые портреты аттракторов для НПГ на плоскости параметров, на карте динамических режимов работы системы» [13]

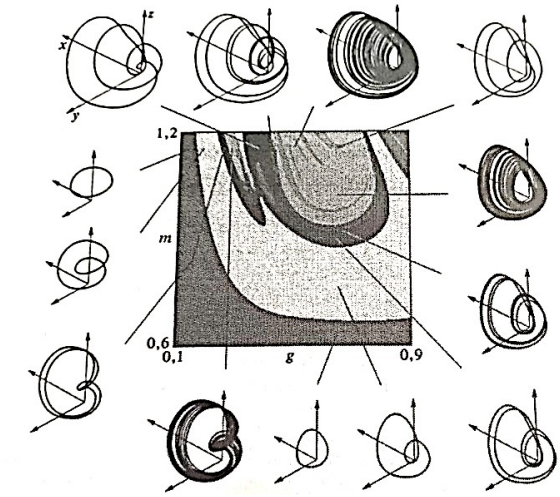


Рисунок 5 – «Фазовые портреты аттракторов колебаний нелинейного параметрического генератора на плоскости параметров, в характерных точках карты динамических режимов работы системы» [14]

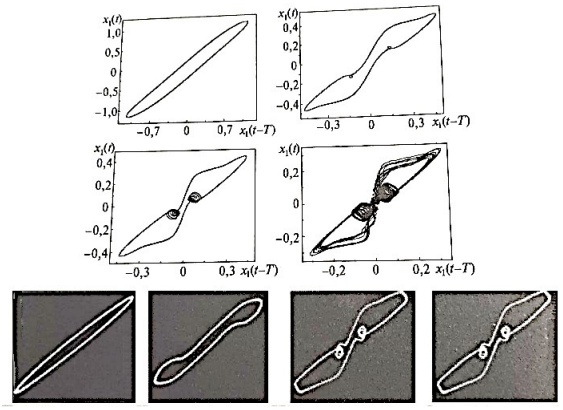


Рисунок 6 – «Фазовые портреты режимов колебаний в нелинейном параметрическом генераторе, в процессе перехода от периодического движения к хаотическому режиму, в автоколебательной системе (вверху – моделирование, внизу – лабораторный эксперимент)» [14]

С конца XX века разрабатываются принципы действия и конструкции устройств, учитывающих свойства и особенности детерминированного хаоса, предназначенных для решения задач защиты конфиденциальной (секретной) информации в *радио- и микроволновом диапазоне*. Однако *в оптическом диапазоне* скрытая передача информации с использованием динамического хаоса изучена менее всего, и ввиду высокой актуальности представляет особый интерес. В современной научно-технической литературе работ, посвящённых разработке систем хаотической связи *оптического диапазона*, очень мало, хотя конструкции устройств, работающих в радио- и микроволновом диапазоне, представлены достаточно широко. Вместе с тем, сама возможность создания *оптических хаотических систем связи* нового поколения существует и подтверждена экспериментально. Так, во многих исследованиях [10, 13–15] сообщается о разработках подобных устройств для линий связи протяженностью до 50 км. Исследованы основные характеристики *нелинейного параметрического генератора света* – динамической системы хаотической связи, включающей твердотельный лазер с модуляцией потерь, в котором применен принцип *обратных отображений* на плоскости пары (двух) точек из межпиковых интервалов предшествующих и последующих сигналов, а также максимумов интенсивности. С помощью численного эксперимента исследована возможность *шифрования сообщений* на выходе, в передатчике хаотической системы связи, а затем – их *дешифрования* на другом конце линии связи, в приёмнике, с применением такого же твердотельного лазера.

Исследование корреляций и взаимозависимостей между наибольшими величинами интенсивности сигнала и межпиковыми промежутками между ними показывает, что метод шифрования / дешифрования конфиденциальных сообщений вполне работоспособен [10]. Здесь используется альтернативный способ для шифрования / дешифрования сообщений посредством управления уровнем *накачки лазера* в схеме передатчика и регулирования *многочастотной модуляции поглощения* – изменения параметров высокочастотного несущего сигнала под воздействием низкочастотного информационного сигнала.

Схемы информационного канала связи оптического диапазона на базе двух лазеров с периодической накачкой активной среды, работающих синхронно в хаотическом режиме, представлены в работах [11, 12]. При воздействии *инжекции* (ввода неравновесных носителей заряда в активную область лазера) хаотического излучения, модулированного сигналом внешней накачки, электродинамика лазерной системы зависит от сформированности инверсной населённости в кристалле рабочей среды лазера [13]. Продемонстрирована принципиальная выполнимость задачи получения полезной информации из передаваемого по каналу связи хаотического сигнала, обоснована возможность получения приемлемой ширины его спектра.

Подтверждено на уровне теории, что нелинейный параметрический генератор хаотических колебаний, активируемый сигналом инжекции, исходящим от такого же генератора хаотических колебаний, и формирующий лазерное излучение, принципиально может успешно функционировать при небольшом частотном сдвиге, и после этого продолжать действовать уже в другом режиме синхронизации [14].

Обнаружена взаимосвязь между усреднёнными характеристиками *электрического, магнитного* и *светового полей* лазерной системы, причём мгновенные значения полей лазера можно интерпретировать как динамические переменные. Показано, что аттрактор подобной динамической системы формируется вблизи точки, обусловленной средними значениями характеристик полей со сравнительно малым разбросом фазовых траекторий в её окрестности.

Рассмотрена проблема влияния регулярных возмущений, присутствующих в хаотическом сигнале ведущего генератора, на синхронный сигнал. Подобный сигнал формируется в том случае, когда система, состоящая из ведущего и ведомого параметрических генераторов нелинейных хаотических колебаний, порождающих передаваемый сигнал, представляет собой устройство, работающее как двухсекционный (двухконтурный) лазер.

В работе [4] на уровне эксперимента было показано, что синхронизированные диодные лазеры с внешней обратной связью способны реализовывать хаотическое шифрование / дешифрование передаваемых сообщений, для чего необходимо, чтобы интенсивность сигнала превышала некое пороговое значение, определяемое условиями функционирования системы.

В статье [7] обоснована возможность дешифрования данных на выходе хаотического полупроводникового одномодового лазера с внешним резонатором.

Рекомендована схема шифрования / дешифрования сообщений, в которой задействовано переключение хаотических режимов. При корректном шифровании и дешифровании данных приём и передача сигнала может происходить с частотой, не большей частоты релаксации эмиттера, со скоростью до 3 Гбит/с при возможности её значительного увеличения [8].

Выполнена симуляция операций, происходящих в оптической системе лазера в процессе скрытой передачи данных, действующей на базе двух нелинейных кольцевых интерферометров с четырьмя зеркалами – видов НПГ детерминированных хаотических колебаний (рис. 7).

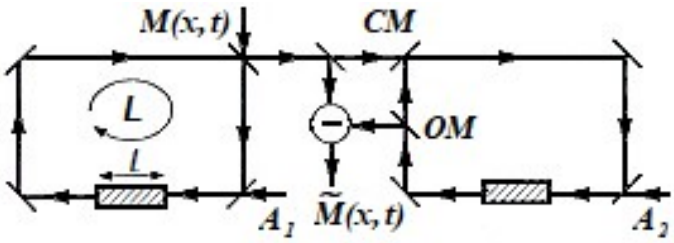


Рисунок 7 – «Оптическая система трансляции пространственно-временного сигнала с применением детерминированного хаоса, где $M(x,t)$ и $\tilde{M}(x,t)$ – шифруемое и дешифруемое сообщения; *CM* и *OM* – зеркала, обеспечивающие связь и вывод лазерного излучения; L – оптическая длина интерферометров; l – длина нелинейного элемента; *A1* и *A2* – амплитуды плоских световых волн, поступающих в резонаторы» [4]

В схеме, показанной на рисунке 7, функционирование дешифратора происходит в режиме *активной синхронизации*. В рассмотренной схеме учитывается дифракция (отклонение волн от прямолиней-

ного распространения) световых волн. В качестве нелинейной среды здесь выступает *насыщающийся поглотитель* – оптический элемент со свойством переменного поглощения электромагнитного излучения с учётом мощности падающего пучка света.

Глубина *пространственной модуляции* – это отношение амплитуды модуляции сигнала к амплитуде несущей электромагнитной волны. В данном случае это отношение амплитуды информационного сигнала к амплитуде лазерного излучения, и оно составляет величину в 0,005 ед. Реализована имитационная модель передачи изображения статической картинки. При значении коэффициента связи, равном 0,7, после дешифрования картинка получается достаточно отчётливой, но в исходный вид она воссоздаётся с отдельными искажениями и деформациями. Проанализировано воздействие алгоритма синхронизации, проведена оценка эффективности функционирования системы хаотической связи по методу сравнения с ошибкой дешифрования, которые привели к вполне приемлемым результатам. Слабой стороной подобной системы связи (рисунок 7) является требование выполнения условия когерентности излучения всех трёх световых пучков: A_1, A_2 и $M(x,t)$, и *малой глубины* пространственной модуляции. Ошибка дешифрования сообщения не равна нулю, т.е. происходит искажение сигнала.

Предложены [12] две схемы передачи данных на базе разновидности нелинейных параметрических генераторов – нелинейных кольцевых резонаторов. В первой из них для ввода информационного сигнала используется метод нелинейного подмешивания (рисунок 8), во второй – выполняется модуляция параметра нелинейного параметрического генератора хаотических колебаний, т.е. осуществляется *внутрирезонаторная модуляция оптического* поля. В случае дешифрования полученного сигнала применяется хаотический отклик. Схема подобна изображённой на рисунке 7 в том случае, если зеркало *OM* (Output Mirror) вывода излучения выполнить полностью отражающим, а зеркало *CM* (Communication Mirror) убрать.

Чтобы оценить эффективность процесса шифрования / дешифрования сообщения, требуется вычислить величину взаимной передачи данных между исходным и полученным сообщениями. Для определения эффективности дешифрования сигнала следует вычислить величину взаимной информативности сигнала между исходным и дешифрованным сообщением. Можно сделать вывод, что ввод сообщений методом нелинейного подмешивания при шифровании более эффективен, тогда как при дешифровании более предпочтительным является метод модуляции ключевого параметра нелинейного параметрического генератора хаотических колебаний – *внутрирезонаторная модуляция оптического* поля.

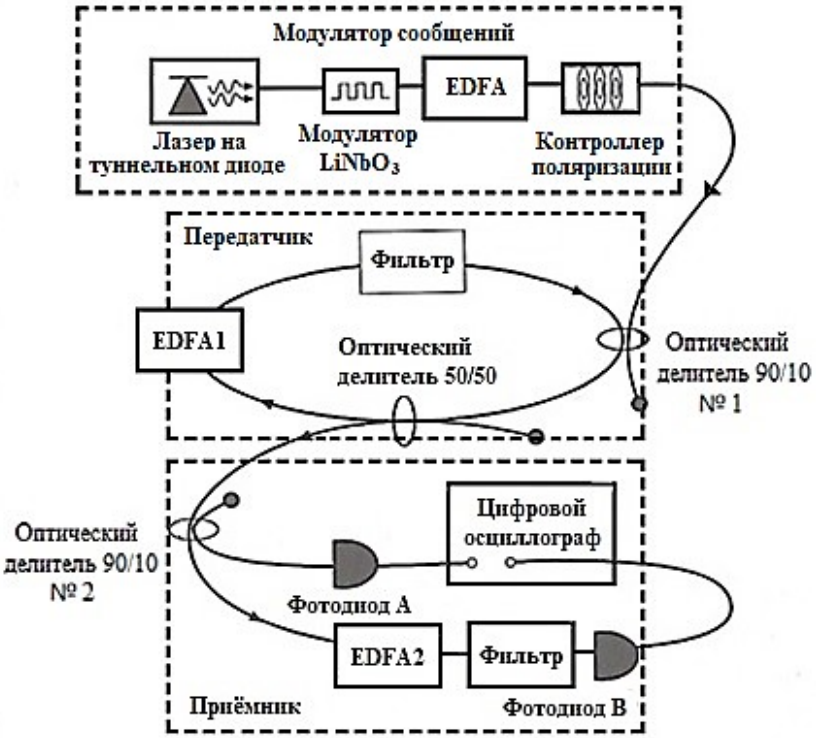


Рисунок 8 – «Система хаотической связи с применением метода нелинейного подмешивания информационного сигнала, где EDFA – эрбиевый лазер» [12]

За последнее десятилетие многими исследователями предложены модели хаотических систем связи, выполненных на основе кольцевых волоконно-оптических лазеров. Разработки прошли испытания

и доказали работоспособность. К ним относятся: волоконно-оптическая кольцевая хаотическая синхронная система связи с нелинейным подмешиванием сигнала (рисунок 8); хаотическая система связи с управлением параметрами передающей системы (рисунок 9); двухконтурная оптическая хаотическая система связи, построенная на базе оптоволоконного кольцевого лазера с управлением параметрами передающей системы (рисунок 10).

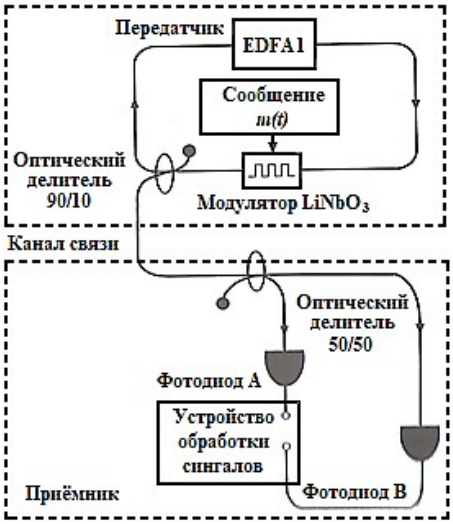


Рисунок 9 – «Схема хаотической связи с управлением параметрами передающей системы» [12]

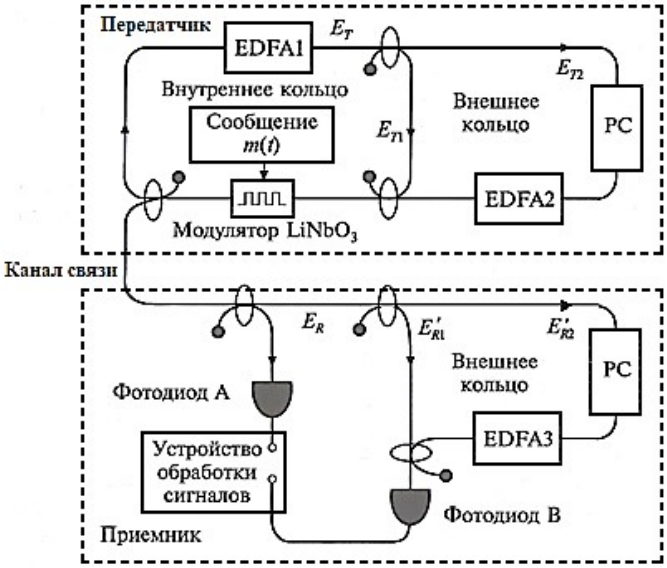


Рисунок 10 – «Оптическая двухконтурная хаотическая система связи с управлением параметрами передающей системы на базе оптоволоконного кольцевого лазера» [12]

Повышение скрытности передаваемых сообщений. Для генерирования динамических режимов хаотических колебаний предложено использовать разновидность нелинейного параметрического генератора света – оптоволоконный кольцевой лазер, легированный эрбием (Erbium Doped Fiber Ring Laser, EDFRL). Эрбиевые оптоволоконные лазеры с диодной накачкой излучают на длинах волн, где потери в волокне минимальны: 1,53. . . 1,55 мкм.

Чтобы повысить *скрытность передачи* стеганографических сообщений в хаотических системах связи, применяя нелинейное подмешивание *скрытого сигнала* в передаваемое сообщение, требуется модифицировать схему шифрования / дешифрования, добавив второй контур в передатчик и приёмник конфиденциальной (секретной) линии связи.

При использовании системы для шифрования / дешифрования конфиденциальных (секретных) сообщений, *с увеличением числа параметров* нелинейной параметрической системы, от которых зависит функционирование её динамических режимов генерации хаотических сигналов, повышается и количество её *криптографических ключей* [13–15].

Расчёты подтверждают, что понижение значения расстройки времени запаздывания между контурами передачи и приёма сигнала хаотической системы связи влечёт за собой *сокращение числа искажений и деформаций дешифруемых сообщений*. Это демонстрирует на практике важность *идентичности (совпадения) характеристик компонентов шифратора* и *дешифратора* в режиме синхронизации, влияющей на качество дешифрования сообщений.

5. Факторы воздействия на параметры системы трансляции сигнала

В системах связи, транслирующих сигналы, качество передачи данных зависит от многих аспектов. При рассмотрении хаотических систем связи с полной синхронизацией динамических систем (взаимосвязанных с помощью хаотических сигналов) следует назвать факторы, влияющие на появление погрешностей, деформаций и искажений, и других ошибок, возникающих при передаче сигнала по каналу связи. Это различного рода отклонения в характеристиках параметров компонентов приёмника и передатчика, которые появляются из-за несовпадения идеальных и реальных характеристик элементов системы обработки и передачи сигналов. Сюда относятся: скачкообразность амплитудно-частотных характеристик, а также шумы, помехи, искажения, деформации и искривления формы электромагнитной волны сигнала в канале связи, вызванные нелинейностью, и многие другие причины.

Исследуем воздействие перечисленных выше аспектов на качество передаваемого сигнала и на синхронный хаотический отклик, получаемый на выходе приёмника.

Несовпадение характеристик элементов канала связи. В процессе функционирования оборудования нередко обнаруживается неидентичность параметров компонентов, входящих в состав как приёмника, так и передатчика, что влечёт за собой *проблему рассинхронизации* сигнала на выходе приёмника. Неодинаковость параметров приёмо-передающей аппаратуры может вызвать проблему *перемежаемости сигнала*, когда довольно продолжительные периоды нормальной работы нелинейного устройства прерываются внезапным возникновением быстрых хаотических импульсов – турбулентными фазами. Процесс порождает возникновение сигнала *рассинхронизации* амплитуды, причём такое рассогласование соответствует значению отклонения (неидентичности) параметра на выходе приёмника. Кроме того, фиксируются скачкообразные импульсы амплитуды сигнала – всплески, значительные по величине, сравнимые с амплитудой хаотических колебаний, получаемой на входе приёмника.

При возрастании величины ошибки неидентичности характеристики частота резких спонтанных скачков амплитуды существенно увеличивается, что приводит к стремительному возрастанию мощности сигнала *рассинхронизации (шума)* η, получаемому на выходе приёмника.

Это несовпадение параметров – неидентичность параметров элементов – количественно характеризуют значения абсолютной Δr_i и относительной δr_i величины *неидентичности* $i-$й характеристики приёмника и передатчика, которые определяются выражениями:

$$\Delta r_i = r_{i,2} - r_{i,1}; \;\; \delta r_i = \frac{r_{i,2} - r_{i,1}}{r_{i,1}}; \tag{11}$$

где $r_{i,1}$ и $r_{i,2}$ – значения $i-$го параметра передатчика и приёмника.

Отсутствие равномерности (нерегулярность) амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), измеряемых в канале связи и в служебной приёмо-передающей аппаратуре, влечёт за собой появление добавочной фильтрации и преобразование спектральных свойств, присущих хаотическому сигналу. Как правило, этот процесс инициируется присутствием RC-цепи *фильтра нижних частот (ФНЧ)*, расположенного между выходом генератора хаотических колебаний (передатчика, порождающего несущий информацию хаотический сигнал), и входом устройства в приёмнике, где формируется хаотический отклик.

В схемах передачи информации, применяющих хаотические сигналы, фильтры нижних частот, согласованные по частоте среза с длинами хаотических импульсов, пропускают сигналы, формируемые после их перемножения в каждой из ветвей цепи. Роль ФНЧ в системе трансляции сигнала заключается в отделении *полезных компонентов* сигнала от *помех*. Как известно [16], ФНЧ эффективно *пропускает* частотный спектр хаотического сигнала *ниже* частоты среза и *подавляет* частоты сигнала *выше* частоты этого среза, причём степень подавления частот в полосе заграждения (подавления) частот зависит от вида фильтра.

Авторы имеют в виду схему *некогерентного приёма* хаотических сигналов, в которой присутствует фильтр нижних частот. В такой схеме использование ФНЧ позволяет *улучшать* соотношение

сигнал / шум в сигнальном тракте, *подавлять* высокочастотные помехи в цепях питания и сигнальных цепях, что нужно для обеспечения электромагнитной совместимости аппаратуры, и *блокировать* высокочастотные гармонические излучения передающих устройств, способных взаимодействовать с более низкочастотным полезным сигналом, и тем самым создавать помехи устройствам приёма хаотических сигналов. Кроме того, введение ФНЧ в канал связи приводит к значительному *усложнению динамики системы хаотической связи*. Этот эффект целесообразно учитывать при построении систем передачи информации, использующих хаотические сигналы в качестве несущих [17].

При исследовании проблем влияния неравномерности амплитудно-частотных характеристик на качество синхронного хаотического отклика и рассмотрении возникающих *эффектов синхронизации* генераторов хаотических колебаний в канале связи в присутствии фильтра нижних частот принимается допущение, что параметры элементов передатчика и приёмника практически совпадают, а неравномерность в показателях АЧХ появляется из-за присутствия упомянутого ФНЧ, что оказывает определённое влияние на качество синхронного хаотического отклика. Преобразования хаотического сигнала фильтром нижних частот описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T\frac{dx}{dt} + x = y, \tag{12}$$

где x – сигнал на входе приёмника, y – сигнал на выходе передатчика; T – постоянная времени, которая устанавливает частоту среза f функционирования фильтра нижних частот, $f = T^{-1}$.

Сопоставление величины частоты f среза (полосы пропускания) фильтра и значения верхнего предела полосы частот F передаваемого сигнала и его спектра мощности на выходе передатчика. Такое соотношение определяет *оценку качества* синхронного отклика – экспертизу эффективности процесса синхронизации хаотических сигналов в системах связи.

Если $f \gg F$, то присутствие фильтра не мешает работе передатчика и приёмника. Если значения f и F являются сравнимыми, то это снижает надёжность хаотической синхронизации и уменьшает оценку её качества. В том случае, если значение f увеличивается, то величина относительной мощности нежелательных фазовых или частотных отклонений передаваемого сигнала-шума рассинхронизации (фазового шума, или джиттера) η на выходе приёмника будет уменьшаться, а соотношение сигнал / шум – только возрастать.

Рассмотренные закономерности показаны на рисунке 11. Здесь соотношение между мощностью информационного и хаотического сигналов при передаче данных равно $\mu = 1$.

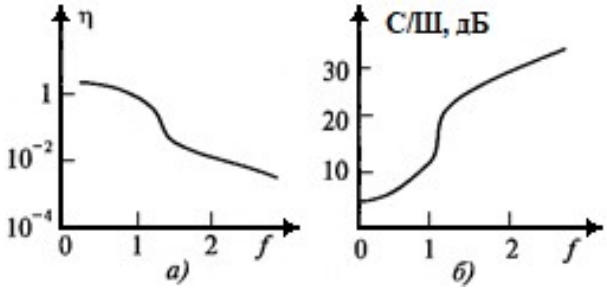


Рисунок 11 – «Проявление нерегулярности кривых АЧХ канала связи в графиках:
а) относительной мощности шума рассинхронизации η от частоты f отсечки ФНЧ;
б) соотношения сигнал/шум (при $\mu = 1$) от частоты f отсечки ФНЧ» [13]

В аналоговых системах связи вычисляется соотношение сигнал/шум, в цифровых системах – отношение величины энергии E_b к значению плотности мощности шума N_0:

$$\frac{\text{С}}{\text{Ш}} = 10\ \log\frac{E_b}{N_0}\ \text{ дБ},$$

где N_0 – спектральная плотность мощности шума, представляющая собой отношение мощности шума P_n в канале связи к ширине полосы пропускания канала Δf, определяемая выражением $N_0 = P_n/\Delta f$; E_b – энергия сигнала для одного бита передаваемых данных, задаётся как $E_b = P_s\Delta t$, где P_s – мощность сигнала при отсутствии шума, Δt – время передачи одного бита.

Искажения в канале связи, вызванные нелинейностью. Воздействие аберраций в канале связи на соотношение сигнал/шум рассмотрено на примере кубической нелинейности:

$$x = y\left(1 - \alpha y^2\right),$$

где y – сигнал на выходе передатчика, а x – сигнал на входе приёмника.

Тогда меру нелинейных искажений в канале связи можно количественно описать как

$$ND = 10 \log \frac{P_x}{P_y}, \quad \text{дБ},$$

где фигурирует *мощность сигнала*: P_x – на выходе передатчика, P_y – на входе приёмника.

Упомянутый выше параметр α *кубических нелинейных искажений* изменяется в пределах от 10^{-3}, что отвечает *степени искажений*, вызванных нелинейностью, равной 1 % от амплитуды информационного сигнала на выходе передатчика системы, до $3 \cdot 10^{-2}$ (30 %).

На рисунке 12 приведена графическая зависимость соотношения *сигнал/шум*, при $\mu = 1$, выходного сигнала приёмника от уровня нелинейных искажений в канале связи.

Очевидно, что кривые подчиняются той же закономерности, что и в случае искривления АЧХ. Предельно возможное соотношение *сигнал/шум* не превышает 35...40 дБ.

Воздействие шума (внешних помех, вызывающих искажение сигнала) в канале связи на работу системы связи обнаруживается в тех случаях, когда в канале связи уровень мощности фоновых шумов достаточно высок, например, в волоконно-оптических линиях связи, при беспроводной передаче информации в оптических каналах связи и др. [12]. Вид мешающего воздействия – *аддитивный шум* в канале передачи информации с нормальным распределением (например, белый гауссовский шум, присутствующий в канале связи) характеризуется одинаковой на всех частотах, т.е. равномерной спектральной плотностью мощности, нормально распределёнными временными значениями и *суммарным способом* воздействия на сигнал. Его влияние на качество информационного сигнала и синхронного хаотического отклика на выходе приёмника изучено с помощью численных экспериментов. При этом полоса частот шума локализована соответствующей полосой пропускания ФНЧ, через который проходит шум, мощность которого определяется на выходе фильтра [13–15].

На рисунке 13 показаны графические зависимости соотношения *сигнал/шум* при $\mu = 1$ от пороговой частоты шума – граничной частоты среза f для его уровней –40 дБ, –50 дБ, –60 дБ. Присутствие шума в полосе частот несущего сигнала уменьшает соотношение *сигнал/шум* на выходе приёмника (на 13...15 дБ) относительно того же соотношения, зафиксированного в канале связи на входе приёмника. Такой же результат регистрируется в случае различных величин мощности шума и объясняется потерями качества при извлечении информационного сигнала из его соединения (смеси) с хаотическим сигналом. На рисунке 13 присутствие зоны неопределённости 2, заштрихованной серым цветом, объясняется конечной длиной выборок по времени и неравномерностью всплесков рассинхронизации сигнала.

Сопоставление схем скрытой передачи данных. Особое внимание уделяется новым оригинальным разработкам, перспективным принципам и схемам, полезным для создания динамических систем защиты информации с использованием детерминированного хаоса.

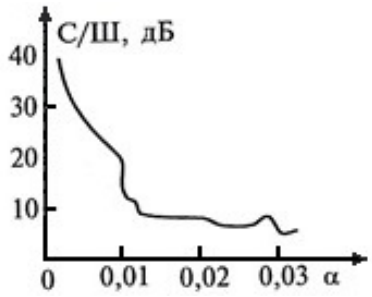


Рисунок 12 – «Соотношение сигнал / шум на выходе схемы приёмника в случае присутствия в канале связи кубических нелинейных искажений, где α –параметр кубических искажений» [13–15]

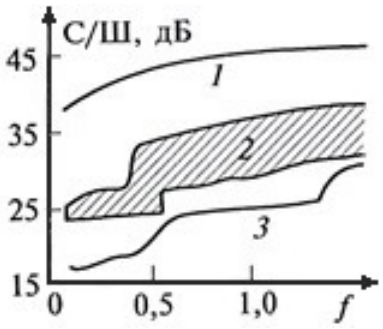


Рисунок 13 – «Соотношение сигнал / шум выходного сигнала приёмника при наличии аддитивного шума, где f – его предельная частота. Линиям 1, 2 и 3 отвечают уровни шума –60 дБ, –50 дБ и –40 дБ» [13–15]

Известно, что одни методы скрытой передачи данных могут применяться только для передачи цифровых сигналов, другие – для передачи и цифровых, и аналоговых сигналов. Универсальные в этом отношении системы связи представляют особый интерес, и здесь преимущество получают системы с применением синхронного хаотического отклика сигнала в приёмнике и нелинейного подмешивания информационного сигнала в передатчике.

Обсудим влияние дестабилизирующих факторов на качество работы системы связи.

В таблице 1 сопоставлены характеристики различных систем передачи данных, использующих динамический хаос, как цифровых, так и аналоговых [11, 14]:

Таблица 1 – Сопоставление значений критических уровней возмущающих факторов, влияющих на характеристики различных хаотических систем передачи данных

Тип системы связи	С/Ш$_C$, дБ	δr_C, %	ND_C, дБ
Хаотическая маскировка информационного сигнала	56,48	0,30	1,03
Переключение хаотических режимов передачи данных	30,76	2,0	23,3
Нелинейное подмешивание информационного сигнала	64,97	0,3	0,26
Модулирование управляющих параметров системы связи	30,76	2,0	23,3
Схема на основе режима фазовой синхронизации сигнала	32,40	0,8	10,7
Схема на основе режима обобщённой синхронизации сигнала	39,52	1,0	7,75
Схема на базе режима обобщённой и полной синхронизации	39,24	0,5	4,83
Схема со сложным хаотическим информационным сигналом	61,17	0,2	2,63
Сверхустойчивая к шумам схема передачи данных	–10,01	2,0	27,2

Приведённые в таблице 1 количественные данные получены средствами симуляции работы систем связи, содержащих в качестве источника хаоса одну из эталонных систем нелинейной хаотической динамики – систему Рёсслера.

В таблице 1 систематизированы критические уровни возмущающих факторов, где приняты следующие обозначения: С/Ш$_C$ – критическое соотношение энергии одного бита информации к значению спектральной мощности плотности шума С/Ш, когда схема передачи данных теряет работоспособность, т.е. при этом уже невозможно восстановить исходный информационный сигнал $s(t)$ из сигнала, полученного в приёмнике $s'(t)$; δr_C – величина неидентичности параметров и характеристик приёмника и передатчика δr, при котором система хаотической связи утрачивает работоспособность; ND_C – уровень искажений, вызванных нелинейностью ND, при котором система ещё не утратила работоспособность.

Данные из таблицы 1 подтверждают высокую чувствительность систем хаотической связи на основе принципа *полной синхронизации* к последствиям, появляющимся из-за несовпадения характеристик компонентов передатчика и приёмника, а также к искажениям и деформациям в канале связи, вызванных нелинейностью.

Повышенная чувствительность представляет собой *негативную сторону* аппаратуры хаотических систем передачи информационного сигнала, но у них есть и положительная сторона, которая заключается в значительном *увеличении числа криптографических* ключей, готовых к применению в конфиденциальной (секретной) связи.

Схема, построенная на основе принципа *обобщённой синхронизации*, демонстрирует немного меньшие показатели чувствительности к искажениям и деформациям сигнала, а также критического соотношения *сигнал/шум*. В такой системе хаотической связи не требуется полного совпадения управляющих параметров для компонентов передатчика и приёмника. Однако её отрицательной стороной является факт существования достаточно длительных переходных процессов, что уменьшает и ограничивает скорость передачи данных. Кроме того, в такой схеме применяются только цифровые сигналы, в отличие от аналоговых сигналов.

В схеме, работающей в режиме *фазовой синхронизации* (в котором происходит процесс установления и поддержания колебаний двух и более связанных колебательных контуров, причём их частоты близки друг другу в определённом соотношении), чувствительность к искажениям сигнала в канале связи и критическое соотношение *сигнал/шум* оказываются ещё меньшими. В такой схеме не обязательно полное совпадение параметров генераторов хаотических колебаний со стороны передатчика и приёмника, однако она предназначена для передачи только цифрового сигнала и не работает с аналоговым, обладает слишком большой сложностью и требует использования дополнительных генераторов динамического хаоса.

Разнообразие систем и принципов конфиденциальной (секретной) связи позволяет сформировать классификацию существующих систем хаотической связи (рисунок 14).

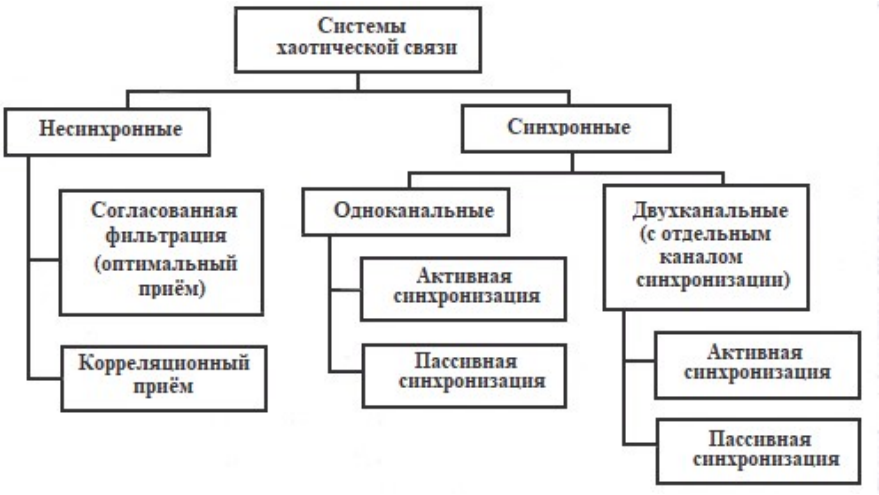


Рисунок 14 – Классификация систем связи с применением динамического хаоса

Заключение

Развитие нелинейно-динамической криптографии формируется с 1990-х годов как новое научное направление и в настоящее время обладает несомненной актуальностью. На современном этапе развития методов защиты информации необходима их диверсификация, которая привела к развитию наряду с классической доквантовой криптографией её новых отраслей, таких как квантовая и постквантовая криптография. Достойное место здесь призвана занять и *динамическая, нелинейная параметрическая криптография*, в области которой широко применяется явление детерминированного хаоса. В этой области уже сегодня существует несколько типов систем связи, способных обеспечить конфиденциальность (секретность) передачи сообщений с использованием стеганографических и радиофизических методов защиты информации. Если в XX веке подобные системы хаотической связи использовались, в основном, в радиочастотном диапазоне, то в XXI веке их возможности намного расширились.

Для реализации этих перспектив в микроволновом, субтерагерцовом, терагерцовом, инфракрасном и оптическом частотных диапазонах (с соответствующими длинами волн) применяются световые пучки с винтовыми дислокациями волнового фронта – оптическими вихрями, которые являются носителями сигнала в оптических системах конфиденциальной (секретной) связи, использующих явление детерминированного хаоса.

Разработка подобных систем защиты конфиденциальной (секретной) информации проводится на компонентной базе различных радиоэлектронных устройств XX века, начиная с нелинейных параметрических генераторов динамического хаоса, которым на смену приходят усовершенствованные специально сконструированные устройства оптической связи. С конца прошлого века исследования направлены на построение устройств защиты информации всё более высокого частотного диапазона, от радиочастотного и микроволнового – и до оптического. Вместе с тем, количество разработок оптических нелинейных параметрических генераторов динамического хаоса и их различных вариантов сегодня явно недостаточно.

Проведённый авторами анализ схемотехнических решений как структурных, так и принципиальных схем устройств защиты конфиденциальной (секретной) информации с помощью хаотической динамики демонстрирует их многообразие, связанное с развитием динамической, нелинейной параметрической криптографии в плане её диверсификации и расширения возможностей. Каждый из существующих на сегодняшний день вариантов систем защиты конфиденциальной (секретной) информации может найти свою *экологическую нишу*, в которой её дальнейшая эволюция перспективных систем защиты станет вполне устойчивой. Создание подобных разработок предполагает, что разрабатываемые нелинейные параметрические генераторы детерминированного хаоса должны обладать специфическими характеристиками. Это означает, что необходимо создание устройств, способных обеспечить высокие требования к их характеристикам, таким как широкий и сплошной спектр генерируемого хаотического сигнала, достаточное количество и необходимый диапазон значений параметров- ключей динамической нелинейной параметрической системы.

В статье показана возможность создания системы секретной (конфиденциальной) связи с применением явлений детерминированного хаоса и оптических вихрей. Обосновано утверждение, что оптический вихрь может служить переносчиком данных в системах сингулярно-оптической, или вихревой связи, и

поставлен вопрос о создании системы передачи данных на основе детектора оптического вихря.

В качестве генератора детерминированного хаоса оптического диапазона предложено использовать одну из многих разновидностей нелинейного параметрического генератора – *нелинейный кольцевой интерферометр* – резонатор, на базе которого можно построить детектор топологического заряда вихря, предназначенный для измерения интенсивности светового пучка и способный работать с субтерагерцовой скоростью.

Предложены математические модели процессов, происходящих в нелинейном кольцевом интерферометре, учитывая связь статического электрического поля с диффузией.

Показаны условия возникновения режима генерирования детерминированных хаотических колебаний в динамической нелинейной параметрической системе. Выяснено, что свойство *грубости* системы является ценным преимуществом при решении задач построения систем секретной (конфиденциальной) связи с использованием хаотического режима работы. Построены фазовые портреты аттракторов для нелинейного параметрического генератора в характерных точках плоскости параметров.

Выполнено сопоставление схем различных вариантов систем хаотической связи на примере кольцевых волоконно-оптических систем на базе эрбиевого лазера. Чтобы повысить скрытность стеганографических сообщений, передаваемых в системе хаотической связи, использующей нелинейное подмешивание скрытого сигнала, рекомендовано модифицировать схему шифрования / дешифрования, введя в передатчике и приёмнике второй контур.

С повышением числа параметров, от которых зависит электродинамика нелинейной параметрической системы при её использовании для шифрования сообщений, возрастает и количество *криптографических ключей*. Как показывают расчёты, если величина *расстройки времени* (т.е. рассогласования между принятым и опорным сигналами, возникающего из-за различий в параметрах передатчика и приёмника) *запаздывания сигнала*, передающегося между контурами передачи и приёма информации системы хаотической связи, уменьшается, то при этом сокращается и количество *искажений*, возникающих в дешифруемом сообщении, что повышает качество функционирования канала связи. Эта величина важна для синхронизации приёмо-передающих устройств в системах связи с широкополосными сигналами.

Проанализировано воздействие, оказываемое на характеристики системы передачи данных *возмущающими факторами*, такими как неидентичность параметров компонентов передатчика и приёмника, нелинейные искажения, шумы и помехи в каналах связи, а также неравномерность и спонтанность амплитудно-частотных характеристик элементов.

После сопоставления различных схем передачи и защиты конфиденциальных данных в системах связи с применением динамического хаоса на основе полученных результатов была построена классификация систем хаотической связи, существующих на сегодняшний день.

Список литературы

[1] Аникин В.М., Голубенцев А.Ф., Изотов Т.Ф. Аналитические модели детерминированного хаоса. Москва: Изд. Физ.-мат. лит. 2007. 328 с. ISBN: 978-5-9221-0879-9 EDN: RYRSFX

[2] Дмитриев А.С. Генерация хаоса. Москва: Изд. Техносфера, 2012. 424 с. ISBN: 978-5-94836-321-9 EDN: WBCPFQ

[3] Хакен Г. Принципы работы головного мозга. Синергетический подход к активности мозга, поведения и когнитивной деятельности. Москва: Изд. ПЕР СЭ. 2001. 351 с. ISBN: 5-9292-0047-5 EDN: TCNYKV

[4] Гуляев Ю.В., Кислов В.Я. Новый класс сигналов для передачи информации - широкополосные хаотические сигналы // Изд. ДАН. 1998. Т. 359. № 6. С. 750 - 754.

[5] Гуляев Ю.В. Оптические вихри обещают скачок пропускной способности Интернета // Computer World. 2013. № 20. 27.08.2013. https://www.osp.ru/cw/2013/20/13036992.

[6] Ященко В.В. Введение в криптологию. СПб.: Изд. Питер. 2001. 289 с.

[7] Аксёнов В.П., Колосов В.В., Тартаковский В.А. и др. Оптические вихри в неоднородных нелинейных средах // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т.12. № 10. С. 952 - 958.

[8] Tyson R.K. Adaptive Optics Progress. Publ. InTech, 2012. doi: 10.5772/46199

[9] Аксёнов В.П., Измайлов И.В., Канев Ф.Ю., Пойзнер Б.Н. Распространение вихревых лазерных пучков в случайно–неоднородной среде // Изв. Вузов Физика. 2010. Т. 53. № 9/3. С. 121–122.

[10] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. Москва: Изд. Физ.-мат. лит. 2002. 252 с.

[11] Кузнецов С.И. Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: от математики к физике // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 2. С. 121-147. EDN: NDAZNZ

[12] Измайлов И.В., Смольский С.М. и др. Защита передаваемых сообщений: от детерминированного хаоса до оптических вихрей. Москва: Горячая линия-Телеком, 2018. 344 с.

[13] Черкесова Л.В., Подгайко О.И. Моделирование нелинейных параметрических зонных систем: монография. Новочеркасск. Южно-Российский государственный технический университет. Изд. ЮРГТУ(НПИ). Известия вузов. Электромеханика. 2006. 244 с.

[14] Черкесова Л.В., Синявский Г.П., Шеин А.Г. Нелинейные параметрические зонные системы в высших зонах неустойчивости электромагнитных колебаний: монография. Ростов н/Д: Южный федеральный университет. Издательский центр ЮФУ, 2014. 436 с.

[15] Черкесова Л.В., Синявский Г.П., Безуглов Д.А. и др. Нелинейная параметрика: перспективы создания радиоэлектронных устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов: монография. Ростов н/Д: Донской государственный технический университет. Изд. центр ДГТУ, 2014. 280 с.

[16] Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Лактюшкин А.М. Амплитудная модуляция и демодуляция хаотических сигналов // Вопросы прикладной физики: Межвуз. научн. сб. / под ред. Ю.В. Гуляева. Саратов: Изд-во Саратовского гос. ун-та. 2004. Вып. 11. С.185-191.

[17] Прохоров А.А., Мчедлова Е.С. Эффекты синхронизации генераторов хаотических колебаний в канале связи в присутствии фильтра нижних частот // "Письма в ЖТФ 2007. Том 33, вып. 4, стр. 66 - 72. EDN: RCUSMF

Ссылка для цитирования:

Черкесова Л.В., Болдырихин Н.В., Сафарьян О.А., Алфёрова И.А. Возможности защиты конфиденциальных сообщений в системах передачи данных с помощью явлений динамического хаоса и оптических вихрей // Современная электродинамика. 2025. Т. 4, № 5(19). С. 04-22. EDN GRGJCW, doi: 10.24412/2949-0553-2025-519-04-22

Citation link:

Cherckesova L.V., Boldyrikhin N.V., Safaryan O.A., Alferova I.A. Possibilities of confidential messages protection in data transmission systems using phenomenon of dynamic chaos and optical vortexes // Modern Electrodynamics. 2025. Vol. 4, No. 5(19). P. 04-22. EDN GRGJCW, doi: 10.24412/2949-0553-2025-519-04-22

УДК 535

Измерение светорассеивающих свойств фторопласта в диапазоне 400 – 800 нм

А.П. Тарасов * [1], Д.А. Рогаткин[1]

[1] *Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского (МОНИКИ), Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 09.10.2025
Одобрена после рецензирования 26.10.2025
Принята к публикации 31.10.2025

Аннотация

Работа посвящена исследованию оптических свойств фторопласта Ф-4 (политетрафторэтилен) как базового светорассеивающего материала для создания твердых оптических фантомов кожи. Методами спектроскопии обратного рассеяния в видимом диапазоне длин волн (400 – 800 нм) исследовано 3 образца фторопласта толщиной 3, 5 и 10 мм. Получены коэффициент полного диффузного отражения и относительный обратно-рассеянный поток, зарегистрированный на различных расстояниях от источника света.

Ключевые слова: оптический фантом, кожа, оптические свойства, фторопласт, политетрафторэтилен, коэффициент отражения

EDN: LBAMHI

doi:10.24412/2949-0553-2025-519-23-27

Measurement of light-scattering properties of fluoroplastic in the range of 400 – 800 nm

A.P. Tarasov*[1], D.A. Rogatkin[1]

[1] *1Moscow Regional Research and Clinical Institute (MONIKI) named after M.F. Vladimirskiy, Moscow, Russia*

* tarasov.ap@phystech.edu

Abstract

The work is devoted to the study of optical properties of fluoroplastic F-4 (polytetrafluoroethylene) as a basic light-scattering material for optical skin phantoms. Three samples of fluoroplastic with thicknesses of 3, 5 and 10 mm were studied using backscattering spectroscopy methods in the visible wavelength range (400–800 nm). The coefficient of total diffuse reflection and the relative backscattered flux recorded at different distances from the light source were obtained.

Key words: optical phantom, skin, optical properties, fluoroplastic, polytetrafluoroethylene, reflectivity coefficient

Введение

Оптические фантомы — это изделия, имитирующие анатомическое строение и оптические свойства (коэффициенты поглощения μ_a и рассеяния μ_s) тканей человека [1, 2]. Если фантомы обладают известными и контролируемыми оптическими свойствами, на их основе возможно создание рабочих имитационных мер – средств измерений, хранящих и воспроизводящих единицы измеряемых величин.

*Автор, ответственный за переписку: Андрей Петрович Тарасов, tarasov.ap@phystech.edu

 ©2025 А.П. Тарасов, Д.А. Рогаткин

Одной из задач при создании тканевых фантомов является поиск подходящих материалов с заданными свойствами. Среди свойств таких материалов можно отметить нетоксичность, химическую стойкость, стабильность оптических свойств во времени, а также в разных условиях окружающих температур и влажности воздуха, дешевизну производства, близость оптических свойств к оптическим свойствам биотканей и т.д.

Практически всем из обозначенных качеств удовлетворяет фторопласт Ф-4 по ГОСТ 10007-80, который часто применяется в исследованиях в нашей лаборатории (см., например, [3–5]). Он обладает светорассеивающими свойствами, близкими аналогичным свойствам обескровленных биотканей. Однако в доступной литературе мало публикаций, посвященных описанию оптических свойств фторопласта Ф-4 применительно к задачам создания оптических фантомов тканей и органов человека и животных [6, 7], а их выводы оказываются противоречивы. Настоящая работа посвящена уточнению оптических свойств этого материала и призвана частично восполнить указанный пробел.

В исследовании использовались методы спектроскопии обратного рассеяния в диапазоне длин волн 400 – 800 нм. В результате получены коэффициент полного диффузного отражения как функция длины волны и относительный обратно-рассеянный поток, зарегистрированный на различных расстояниях от источника света, что актуально для разных оптоволоконных медицинских диагностических систем.

Материалы и методы

В исследовании было использовано 3 образца фторопласта Ф-4 по ГОСТ 10007-80. Образцы представляли собой диски диаметром 5 см и толщиной соответственно 3, 5 и 10 мм.

Измерения коэффициента полного диффузного отражения (в полусферу) проводились при помощи аттестованного и метрологически поверенного спектрофотометра Specord M40 с интегрирующей сферой диффузного отражения на базе ФГБУ ВНИИОФИ (г. Москва, Россия). Для каждого образца было проведено по 5 измерений, после чего данные усреднялись.

Для определения спектров обратно-рассеянного излучения при различных расстояниях между излучающим и приемным волокнами (SDD) использовался комплекс «Мультиком» [8, 9]. В состав комплекса входят лазеры с разными длинами волн от УФ до красного диапазона спектра, широкополосные ксеноновые источники белого света и спектрометр. Доставка излучения к образцу и регистрация обратно рассеянного от образца излучения происходят с помощью оптических волокон. Калиброванная шкала спектрометра [9, 10] позволяла получать спектральную плотность потока излучения (Вт/нм) диффузно-отраженного (обратно-рассеянного) от образцов излучения. При этом учитывалась спектральная чувствительность CMOS-матрицы спектрометра [11] (рис. 1).

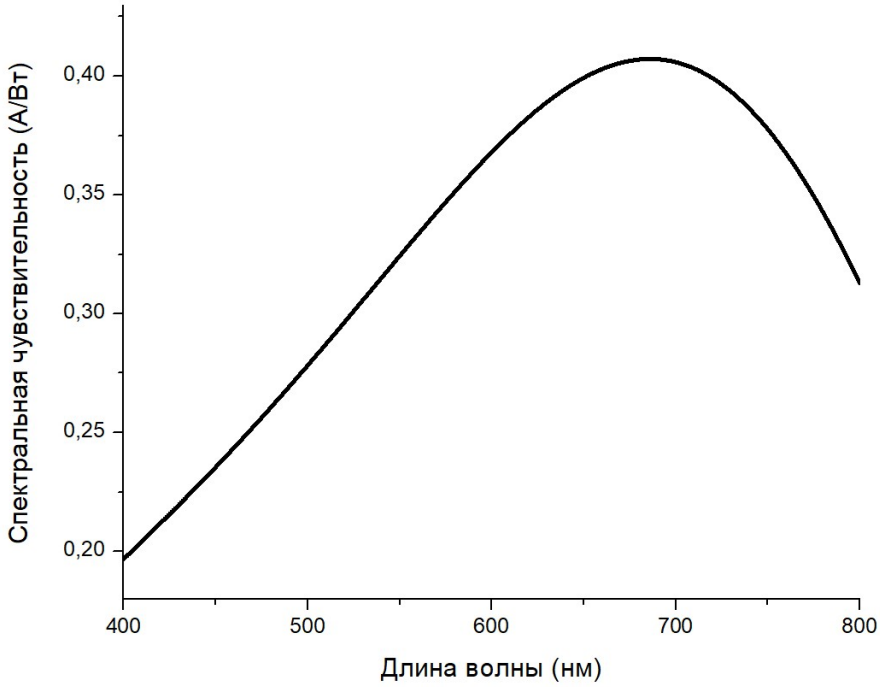


Рисунок 1 – Аппроксимированная полиномом зависимость чувствительности CMOS-матрицы спектрометра от длины волны

Относительный обратно-рассеянный поток F определялся в диапазоне длин волн 400 – 800 нм как отношение спектров обратно-рассеянного излучения, измеренных в единицах спектральной плотности потока излучения (Вт/нм), к спектру падающего на образцы излучения (также в единицах Вт/нм). В качестве источника широкополосного излучения использовалась 100-ваттная ксеноновая лампа. Для облучения образцов и регистрации излучения с их поверхности использовались оптические волокна с диаметром 400 мкм. Значения SDD менялись в диапазоне 8 – 14 мм с шагом 1 мм.

Для определения мощности падающего на образец излучения ксеноновой лампы проводилась его калибровка путем нормировки спектра этого излучения на спектр излучения лазера с длиной волны 515 нм с известной мощностью. В ходе процедуры калибровки, в целом схожей с калибровкой шкалы спектрометра, проведённой в [9, 10] , использовался стандарт отражения Spectralon (Labsphere Ltd., New Hampshire, US). Стандарт характеризуется ламбертовским отражением с коэффициентом отражения 0.75 в широком диапазоне длин волн 250 – 2500 нм. При калибровке стандарт Spectralon располагался на расстоянии 1 м от приемного волокна, а излучающее волокно располагалась вблизи стандарта. На рис. 2 приведено сравнение спектров лазера и широкополосного излучения лампы после калибровки.

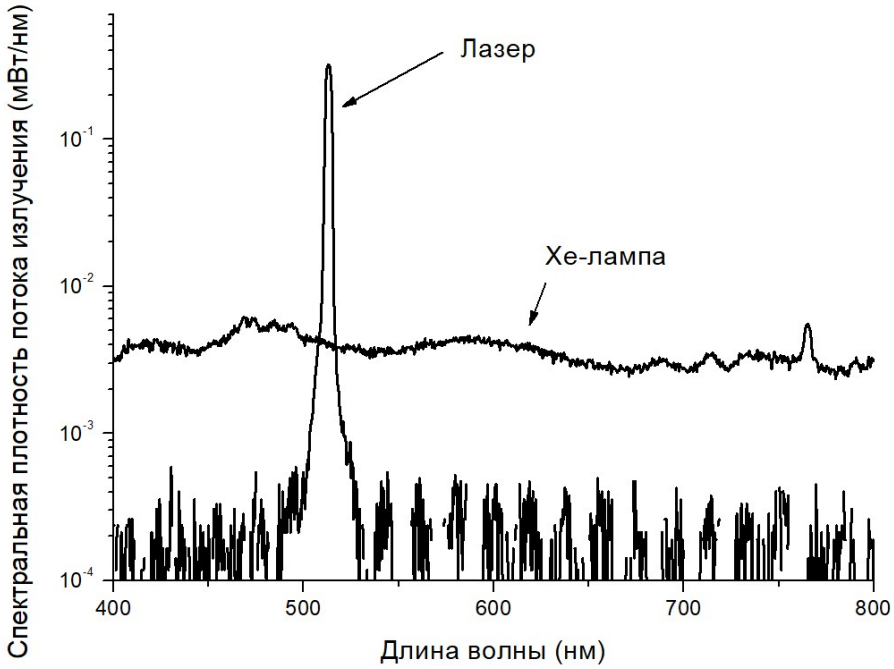


Рисунок 2 – Спектры излучения лазера и ксеноновой лампы

Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены спектры полного диффузного отражения трех образцов. Наибольшим отражением образцы характеризуются в сине-зеленой области, наименьшим – в красной и ближней ИК областях спектра. Образец с наибольшей толщиной закономерно демонстрирует более сильное отражение за счет меньшего пропускания. Также для примера на рис. 3 приведен спектр диффузного отражения кожи предплечья здорового добровольца из [12]. В целом характер зависимости диффузного отражения от длины волны оказывается схож для фторопласта и кожи за исключением области длин волн 500 – 600 нм, где в случае кожи присутствуют полосы поглощения крови. Фторопласт же призван моделировать обескровленную ткань.

На рис. 4а в качестве примера приведены спектры обратно-рассеянного потока F от образца толщиной 10 мм, измеренные экспериментально при различных расстояниях SDD, в видимой области длин волн. Видно, что обратно-рассеянный поток растет с увеличением длины волны. Такое поведение, по-видимому, связано с геометрией эксперимента: «детектор» расположен на расстоянии от «источника». В этом случае до приемного волокна в основном доходит более длинноволновое излучение. Более короткие волны за счет большего рассеяния выходят из образца непосредственно в окрестности области расположения источника. Рис. 4б демонстрирует зависимости F от SDD для некоторых длин волн из рис. 4а в логарифмическом масштабе. Линейность зависимостей F(SDD) на рис. 4б говорит об экспоненциальном характере затухания света в образце при его распространении от источника до

приемника.

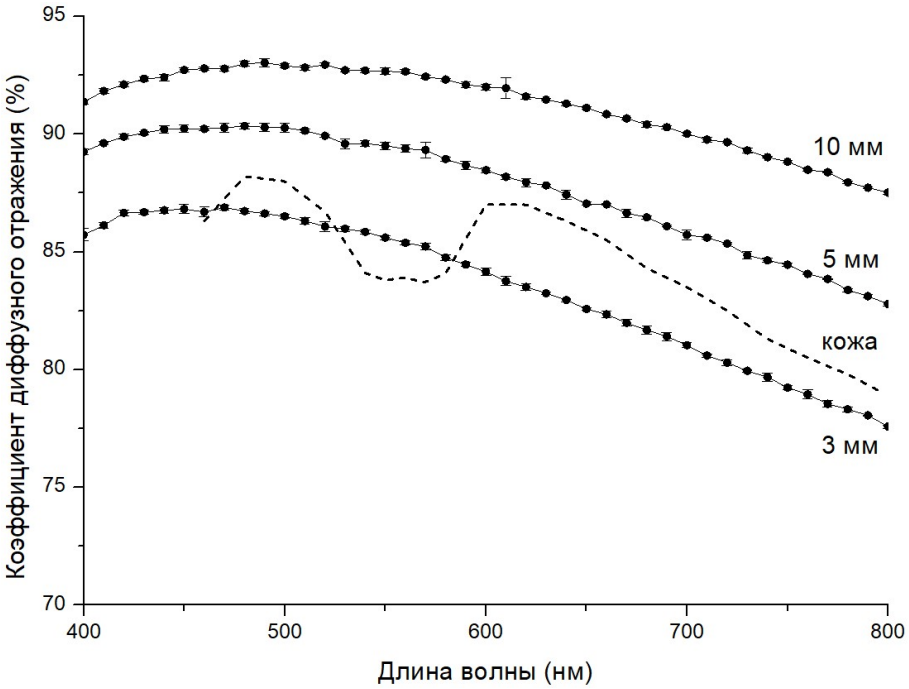


Рисунок 3 – Экспериментально измеренные зависимости коэффициента полного диффузного отражения от длины волны: для трех образцов фторопласта (точки, соединенные сплошной линией) и для кожи из [12] (пунктирная линия)

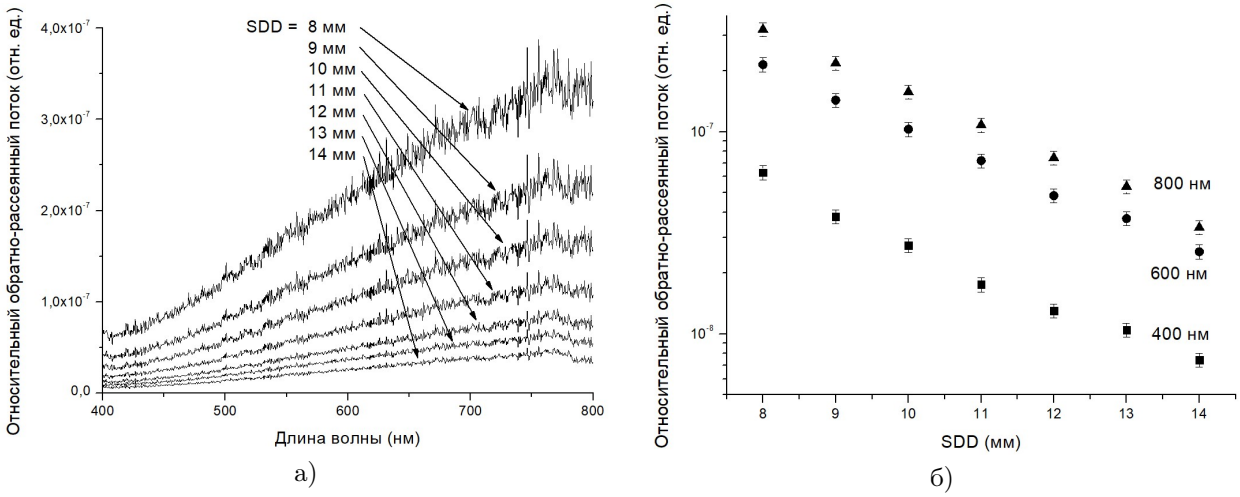


Рис. 4: а) Экспериментально измеренные спектры относительного обратно-рассеянного потока F для образца толщиной 10 мм при различных значениях расстояний источник-детектор (SDD); б) зависимости F от SDD для трех длин волн (400, 600 и 800 нм)

Заключение

Экспериментально исследованы светорассеивающие свойства в диапазоне длин волн 400 – 800 нм фторопласта Ф-4 как материала для оптического фантома кожи. В частности, измерены коэффициент полного диффузного отражения и относительный обратно-рассеянный поток оптического излучения на разных расстояниях между источником света и детектором. Показано сходство оптических свойств Ф-4 и обескровленной кожи, что позволяет обосновать использование материала Ф-4 при создании оптических фантомов кожи для оптических медицинских диагностических технологий.

Список литературы

[1] Тучин В.В. Исследование биотканей методами светорассеяния // УФН. 1997. Т. 167. С. 517-539.

[2] Pogue B. W. Review of tissue simulating phantoms for optical spectroscopy, imaging and dosimetry / B. W. Pogue, M. S. Patterson // Journal of biomedical optics. 2006. Т. 11. №. 4. С. 041102-041102-16. doi: 10.1117/1.2335429, EDN: MHHKBH

[3] Рогаткин Д.А. Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектрофотометрии / Д.А. Рогаткин, А.В. Дунаев, Л.Г. Лапаева // Медицинская техника. №2. 2010. С.31-36. EDN: NYCPHN

[4] Патент на изобретение №2777514 C1 РФ. Устройство для метрологического контроля состояния приборов оптической флоуметрии // Рогаткин Д.А., Лапитан Д.Г.; Заявка №2021131510 от 27.10.2021; опубл. 05.08.2022 Бюл. № 22. 14 с.

[5] Tarasov A. Combined non-invasive optical oximeter and flowmeter with basic metrological equipment / A. Tarasov, D. Lapitan, D. Rogatkin // Photonics. 2022. Т. 9. С. 392. doi: 10.3390/photonics9060392 EDN: KOSABU

[6] Huber N. Pulsed-laser ablation of polytetrafluoroethylene (PTFE) at various wavelengths / N. Huber, J. Heitz, D. Bäuerle // The European physical journal - Applied physics. 2004. Т. 25.1. С. 33-38. doi: 10.1051/epjap:2003083 EDN: LVZFTN

[7] Li, Q. Light scattering of semitransparent sintered polytetrafluoroethylene films / Q. Li, B. J. Lee, Z. M. Zhang, D. W. Allen // Journal of biomedical optics. 2008. Т. 13. С. 054064-054064.

[8] Разницына И. А. Усовершенствованная система для флюоресцентного анализа in vivo в медицине / И. А. Разницына, А. П. Тарасов, Д. А. Рогаткин // Приборы и техника эксперимента. 2020. №. 2. С. 142-148. doi: 10.31857/S0032816220020068 EDN: DAQLMP

[9] Tarasov A. P. Theoretical substantiation of the possibility of performing non-damaging UV diagnostics of biological tissues in vivo / A. P. Tarasov, M. E. Shtyflyuk, D. A. Rogatkin // Photonics. 2023. Т. 10. №. 12. С. 1289. doi: 10.3390/photonics10121289 EDN: PWGTHU

[10] Tarasov A. P. Is the minimal erythema dose achievable at optical spectroscopy of skin in Vivo? / A. P. Tarasov, I. A. Raznitsyna, M. E. Shtyflyuk, D. A. Rogatkin // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). 2023. С. 340-343.

[11] https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s11639-01_kmpd1163e.pdf

[12] Zonios G. Skin melanin, hemoglobin, and light scattering properties can be quantitatively assessed in vivo using diffuse reflectance spectroscopy / G. Zonios, J. Bykowski, N. Kollias // Journal of Investigative Dermatology. 2001. Т. 117. № 6. С. 1452-1457. doi: 10.1046/j.0022-202X.2001.01577.x EDN: BANCXP

Ссылка для цитирования:

Тарасов А.П., Рогаткин Д.А. Измерение светорассеивающих свойств фторопласта в диапазоне 400 – 800 нм // Современная электродинамика. 2025. Т. 4, № 5(19). С. 23-27. EDN LBAMHI, doi: 10.24412/2949-0553-2025-519-23-27

Citation link:

Tarasov A.P., Rogatkin D.A. Measurement of light-scattering properties of fluoroplastic in the range of 400 – 800 nm // Modern Electrodynamics. 2025. Vol. 4, No. 5(19). P. 23-27. EDN LBAMHI, doi: 10.24412/2949-0553-2025-519-23-27

УДК 621.396.965.45

Гибридная оптическая антенна на основе нитрида кремния для пространственного сканирования

С.Д. Мошиченко * [1,2], А.Б. Клещенков[1,2]

[1] *Физический факультет, Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация*
[2] *ООО «НПО СМАРТСЕНС», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Статья поступила в редакцию 09.10.2025
Одобрена после рецензирования 27.10.2025
Принята к публикации 31.10.2025

Аннотация

Оптические интегральные схемы (ОИС) являются перспективными устройствами с достаточно широкой областью применения. ОИС могут выступать в качестве замены светоизлучающих диодов, фотоприемников, преобразователей солнечной энергии, датчиков и т.д. Особого внимания заслуживает использование ОИС в системах пространственного сканирования (лидарах) в качестве замены механических и электромеханических методов сканирования. Оптические антенны (ОА) – структуры в составе ОИС, излучающие за счёт нарушения условия полного внутреннего отражения в оптическом волноводе. ОА с низким контрастом показателя преломления могут обладать большой апертурой, обеспечивающей сужение диаграммы направленности (ДН). Такие ОА часто входят в состав одномерной антенной решётки (АР), направление излучения которой в плоскости апертуры ОА изменяется с помощью длины волны, а в перпендикулярной плоскости – за счет фазового распределения между ОА. В работе рассмотрены несколько известных конструкций ОА и представлены их характеристики. Далее, в работе предложен новый вариант ОА, в основе которой лежит гибридная асимметричная двойная структура из нитрида кремния, проведено сравнение характеристик предложенного варианта с известными конструкциями и показано его преимущество. Результаты моделирования одиночного излучателя ИК диапазона (1.55 мкм) показывают, что предложенная структура имеет коэффициент усиления 30.4 дБи, уровень боковых лепестков -32.3 дБ, ширину главного лепестка 0.2° и 23.9° в продольной и поперечной плоскостях соответственно, а перестройка ДН в продольной плоскости составляет 9.3° при изменении длины волны от 1.5 до 1.6 мкм.

Ключевые слова: оптическая антенна, интегральная оптика, нитрид кремния, оптическая ФАР, пространственное сканирование, лидар

EDN: DWCKPR

doi:10.24412/2949-0553-2025-519-28-35

Hybrid silicon nitride based optical antenna for spatial scanning

S.D. Moshichenko*[1,2], A.B. Kleshenkov[1,2]

[1] *Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation*
[2] *«NPO SMARTSENS» LLC, Rostov-on-Don, Russian Federation*

* moshichenko@sfedu.ru

*Автор, ответственный за переписку: Сергей Дмитриевич Мошиченко, moshichenko@sfedu.ru

 ©2025 С.Д. Мошиченко, А.Б. Клещенков

Abstract

Optical integrated circuits (IC) are promising devices applicable in many areas. Such devices might be used as replacement of photoemitting diodes, photodetectors, solar energy converters, detectors etc. A particular emphasis should be given to spatial scanning where an optical IC replaces mechanical and mechano-electrical scanning methods. Optical antennas (OA) are optical IC structures coupling guided and free-space modes by breaking total internal reflection in optical waveguides. Low refractive index contrast OAs might have large linear aperture narrowing a radiation pattern. Such OAs conclude 1D phased array often, in which a wavelength tunning steers main beam in OA aperture plane, and a phase shift does it in transverse one. In this work, several common OAs designs are reviewed, and their properties are described. Onwards, a new silicon nitride hybrid asymmetric double stripe OA design is proposed. An infrared (1.55 μm) band modelling results presented denote that model proposed has 30.4 dBi directivity, -32.3 dB SLL, 0.2° and 23.9° FWHM in longitudinal and transverse planes respectively, and 9.3° longitudinal field of view (FOV) on 1.5-1.6 μm wavelength tuning.

Key words: optical antenna, integrated optics, silicon nitride, optical phased array, spatial scanning, LIDAR

Введение

Оптические интегральные схемы (ОИС) – активно развивающееся направление в интегральной оптике. Некоторые ОИС могут выступать в качестве компактной замены существующих оптических устройств – светоизлучающих диодов, УФ фотоприемников, преобразователей солнечной энергии, высокочувствительных датчиков и др. Кроме того, ОИС открывают широкие возможности создания новых оптических устройств [1, 2]. Шины данных интегральных схем на основе ОИС [3] работают в оптическом диапазоне частот и обладают гораздо большей пропускной способностью благодаря высокой частоте. Особого внимания заслуживает применение ОИС в системах пространственного сканирования. В частности, в сканирующих лидарах – лазерных дальномерах – применяемых в беспилотных системах, системах контроля на производстве и так далее.

Современные ОИС, как правило, работают в частотных диапазонах оптической связи и являются совместимыми с КМОП-технологией, что упрощает их производство. Однако эти факторы ограничивают выбор материалов ОИС. К таким материалам относятся: кремний (Si), нитрид кремния (Si_3N_4), оксид кремния (SiO_2) и прочие. Оптические антенны (ОА) – излучающие структуры внутри ОИС, зачастую созданные на основе планарного оптического волновода. В ИК диапазоне базовая мода такого волновода - TE [4]. Нарушение полного внутреннего отражения такого волновода нерегулярными элементами (например, вырезами) вызывает излучение во вне, превращая волновод в ОА. В зависимости от геометрии таких неоднородностей в ОА имеют место различные излучающие явления. Вырезы в широкой стенке волновода с периодом, близким к длине волны, являются сильной неоднородностью для локализованной моды, подвергающейся дифракции на их границах. При уменьшении периода до длины, меньшей чем длина волны, в среде возникают свои полосы пропускания и подавления, что используется при создании оптических фильтров [5]. Для получения узкого главного лепестка диаграммы направленности (ДН) короткой высококонтрастной ОА необходима многоэлементная двумерная антенная решётка (АР) [6] с большим числом делителей. Длинные малоконтрастные ОА [7, 8], как правило, используются в параллельных АР, поперечное направление излучения в которых управляется изменением фазового распределения, а продольное (вдоль направления распространению волны) – длиной волны.

Основная часть

Антенна на основе дифракционной решётки (ДР-антенна) является наиболее простой ОА и представляет из себя оптический волновод с периодическими вырезами в широкой стенке. Особую роль в ней играет контраст показателей преломления на границе раздела, оказывающий влияние на скорость затухания локализованной моды вследствие рассеяния. Зачастую выбор определённого материала ограничивает размер апертуры ОА. Так, например, габариты ДР-антенны из кремния ($n = 3.479$, $\Lambda = 1.55$ мкм) редко превышают десятки микрон, тогда как антенны из нитрида кремния ($n = 1.996$, $\Lambda = 1.55$ мкм) могут иметь длину до 1 мм и более. Вырезы в широкой стенке могут быть как на не полную глубину волновода, так и в предельном случае, разделяющими волновод на отдельные элементы. Затухание растет по мере увеличения глубины вырезов и, в пределе, становится максимальным для случая полного разделения волновода на отдельные элементы. Пример типовой слабоконтрастной ДР-антенны из нитрида кремния на основе периодической структуры приведён на рис. 1. Направление распространения волны в этой модели и в других, приведённых далее, совпадает с положительным направлением оси Z. При моделировании ДР-антенны использованы параметры из [1]. Волна подводится

по оптическому волноводу (1) к периодической излучающей структуре (2), находящейся над кремниевой подложкой (3) в окружении покрытия из оксида кремния (4). Учитывается воздушная прослойка (5) вблизи поверхности ОИС. ДН этой и других промоделированных антенн построена в полярной системе координат, оси которой показаны на рис. 2.1. Как видно на рис. 2.2 и рис. 2.3, ДН ДР-антенны имеет большие задние лепестки, направленные в сторону подложки. Для их подавления необходим отражатель. В качестве таких отражателей можно использовать тонкие металлические плёнки [10], полости с металлическим напылением [11], а также диэлектрические зеркала Брэгга [12].

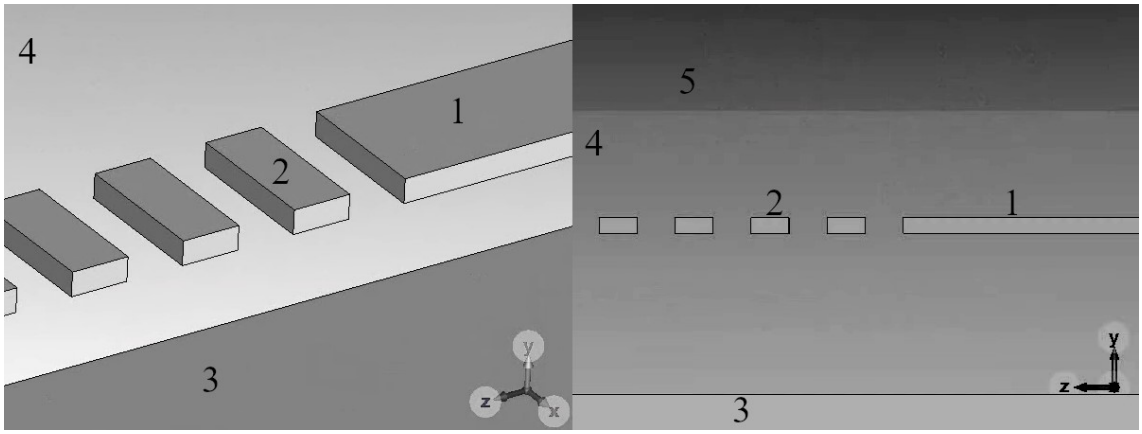
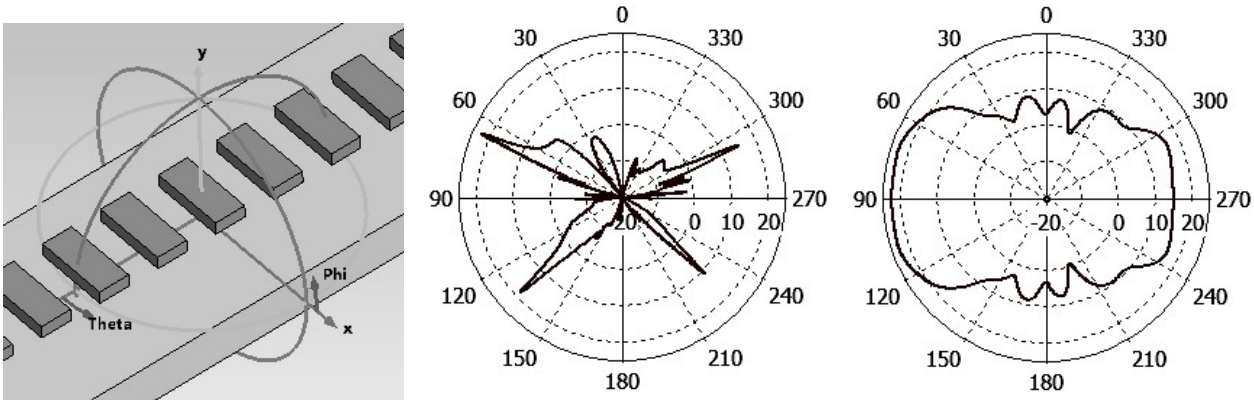


Рисунок 1 – Общий вид ДР-антенны (слева) и её продольный разрез (справа); 1 – оптический волновод, 2 – периодическая излучающая структура, 3 – кремниевая подложка, 4 – покрытие из оксида кремния, 5– воздушная прослойка



1) 2) ДН (дБи), $\varphi = 90°, \theta = 0...360°$ 3) ДН (дБи), $\varphi = 0...360°, \theta = 65.7°$

Рисунок 2 – Антенна на основе ДР из нитрида кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

В некоторых ОА с вырезами в узкой стенке (боковыми вырезами) [13] может возникнуть эффект связанных мод (СМ) [14], являющийся особым режимом распространения локализованной моды. Вырезы в узкой стенке не являются существенным препятствием для этой моды, а дифракция на них ослаблена. Локализованная мода внутри такой антенны и мода в свободном пространстве связаны довольно слабо даже при существенном контрасте показателей преломления. Внешний вид такой ОА приведен на рис. 3. При моделировании СМ антенны использованы параметры из [15].

Излучение антенны с эффектом СМ (СМ-антенны) в основном обусловлено резонансными явлениями, благодаря чему все лепестки ДН, за исключением единственного широкого лепестка, обладают малой шириной в продольной плоскости, как показано на рис. 4. Помимо этого, имеет место боковое излучение в поперечной плоскости, вызванное рассеянием на боковых вырезах, что ухудшает направленность антенны.

Отдельного внимания заслуживают многослойные ОА. Наличие нескольких слоёв открывает широкие возможности контроля над полем локализованной моды. Поле моды такой ОА концентрируется в областях с высоким эффективным показателем преломления (ЭПП). Многослойная ОА объединяет несколько таких слоёв, ЭПП которых может отличаться, причём мода в такой ОА локализуется в слоях, обладающих большим ЭПП. Такой метод локализации применяется в антенне на основе асиммет-

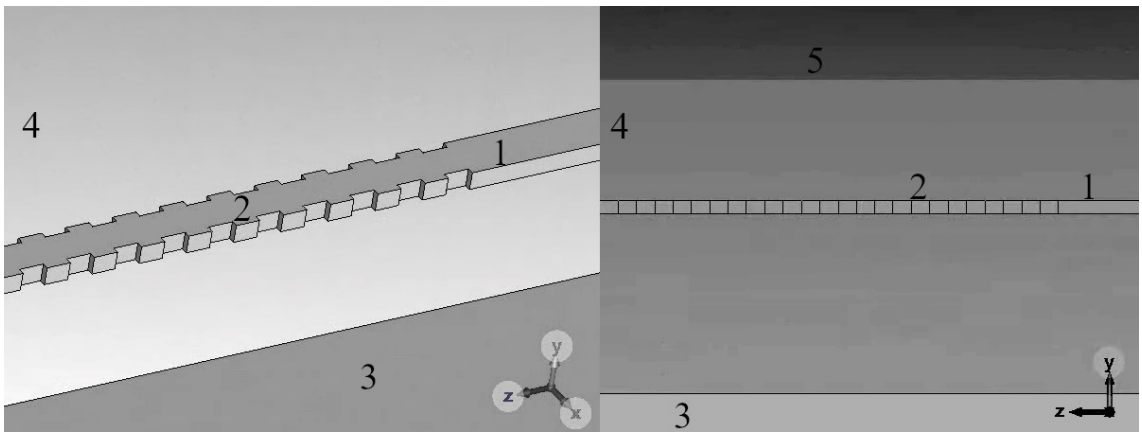
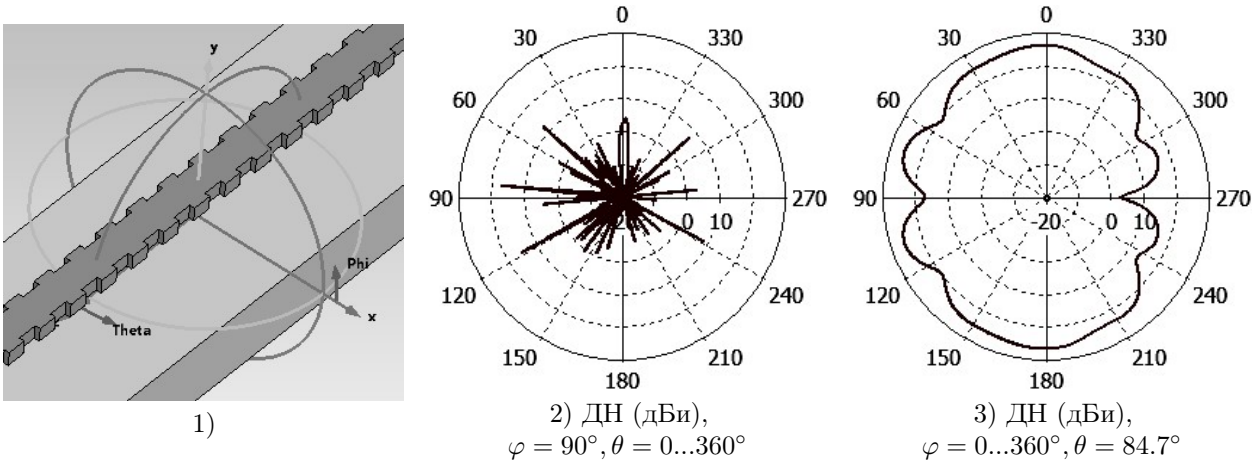


Рисунок 3 – СМ-антенна (слева) и её продольный разрез (справа); 1 – оптический волновод, 2 – периодическая излучающая структура, 3 – кремниевая подложка, 4 – покрытие из оксида кремния, 5 – воздушная прослойка



1) 2) ДН (дБи), $\varphi = 90°, \theta = 0...360°$ 3) ДН (дБи), $\varphi = 0...360°, \theta = 84.7°$

Рисунок 4 – СМ-антенна из кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

ричной двойной структуры (АДС-антенна), состоящей из двух параллельных ДР-антенн, создающих поля, интерферирующие в резонансной полости между ними. В антенне, описанной в [16], решётка с большей толщиной расположена сверху, конструкция такой ОА показана на рис. 5. Повышая таким образом эффективный показатель преломления в верхней области, возможно увеличить интенсивность локализованной моды в верхнем полоске АДС-антенны, что частично ослабляет задние лепестки. ДН АДС-антенны приведена на рис.6. ДР-антенны в ней отделены резонансной полостью с высотой (h) 0.1 мкм. АДС-антенна демонстрирует лучшую направленность по сравнению с обычной ДР-антенной, а также более узкий главный лепесток. Кроме того, для интерференции в резонансной полости АДС-антенны достаточно совпадения периодов обеих антенн, которые её составляют, что позволяет объединять антенны разных типов в рамках одной конструкции, например, ДР- и СМ-антенны.

В этой работе предложен новый тип антенны, представляющий из себя гибридную АДС-антенну из нитрида кремния, работающую в диапазоне 1.55 мкм. Её участок приведён на рис. 7. Она состоит из СМ-антенны (2) и ДР-антенны (3). Периоды обеих антенн подобраны исходя из максимума их суммарного излучения. Оптимальный период ДР- и СМ-антенны был получен путем численного моделирования и составляет ~ 0.775 мкм. Высота верхнего полоска ($h_{\text{вп}}$) составляет 0.175 мкм, нижнего ($h_{\text{нп}}$) – 0.075 мкм, резонансной полости ($h_{\text{рез}}$) – 0.1 мкм, верхнего слоя оксида кремния ($h_{\text{вос}}$) – 2 мкм, нижнего ($h_{\text{нос}}$) – 3 мкм, кремниевой подложки ($h_{\text{под}}$) – 1 мкм. Ширины обоих полосков совпадают и составляют 1.1 мкм. Глубина боковых вырезов верхнего полоска составляет 0.08 мкм. Сдвиг периодов (b) определяет уровень главного лепестка ДН при длине волны 1.55 мкм. Значение сдвига периодов 0.412 мкм получено в рамках численного моделирования.

На рис. 8 приведены ДН гибридной АДС-антенны при $\Lambda = 1.55$ мкм. Ширина главного лепестка в продольной плоскости при этой длине волны составляет 0.1 градус. Во всём диапазоне перестройки главный лепесток имеет ширину до 0.2 градусов в продольной плоскости, при этом в поперечной плоскости его ширина составляет до 23.9 градусов. Антенна обладает коэффициентом усиления 34.9 дБи.

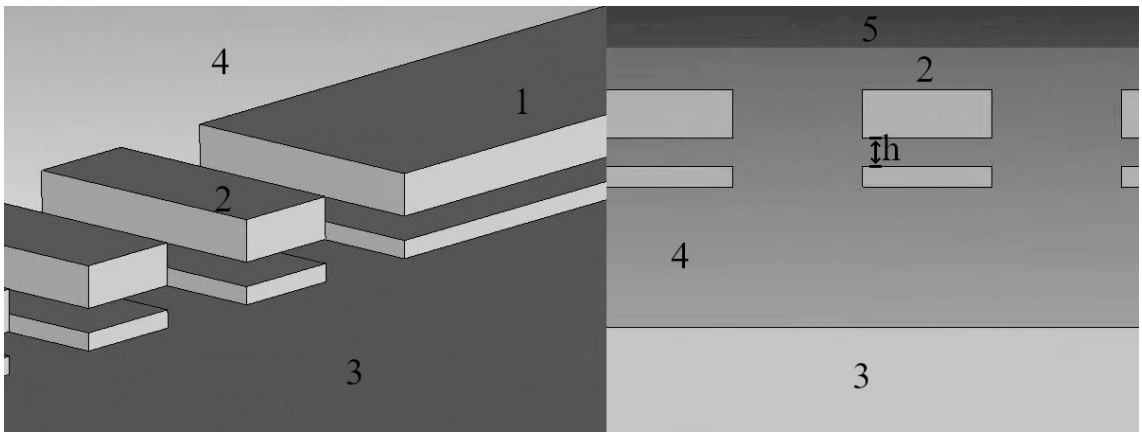
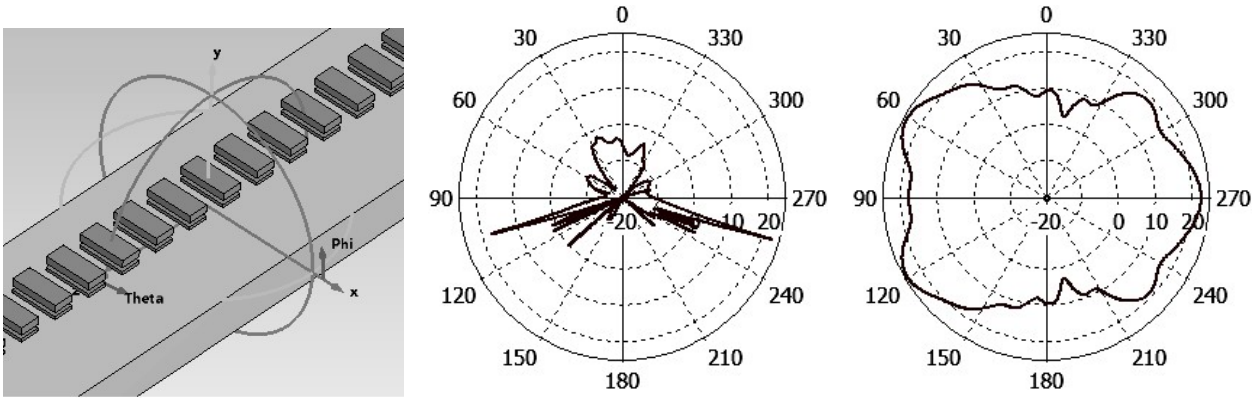


Рисунок 5 – АДС-антенна (слева) и её продольный разрез (справа); 1 – оптический волновод, 2 – периодическая излучающая структура, 3 – кремниевая подложка, 4 – покрытие из оксида кремния, 5 – воздушная прослойка



1) 2) ДН (дБи), $\varphi = 90°, \theta = 0...360°$ 3) ДН (дБи), $\varphi = 0...360°, \theta = 105.8°$

Рисунок 6 – АДС-антенна из нитрида кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

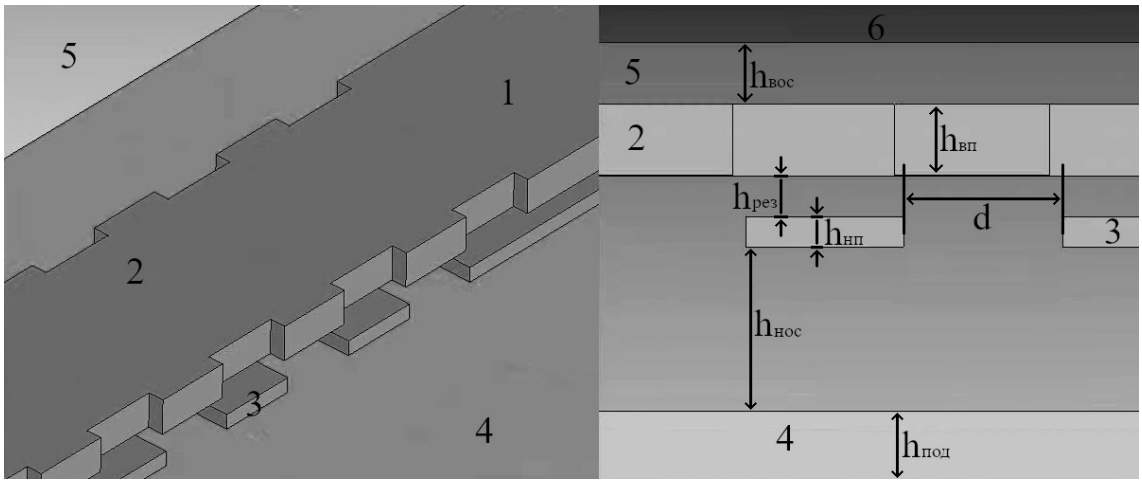
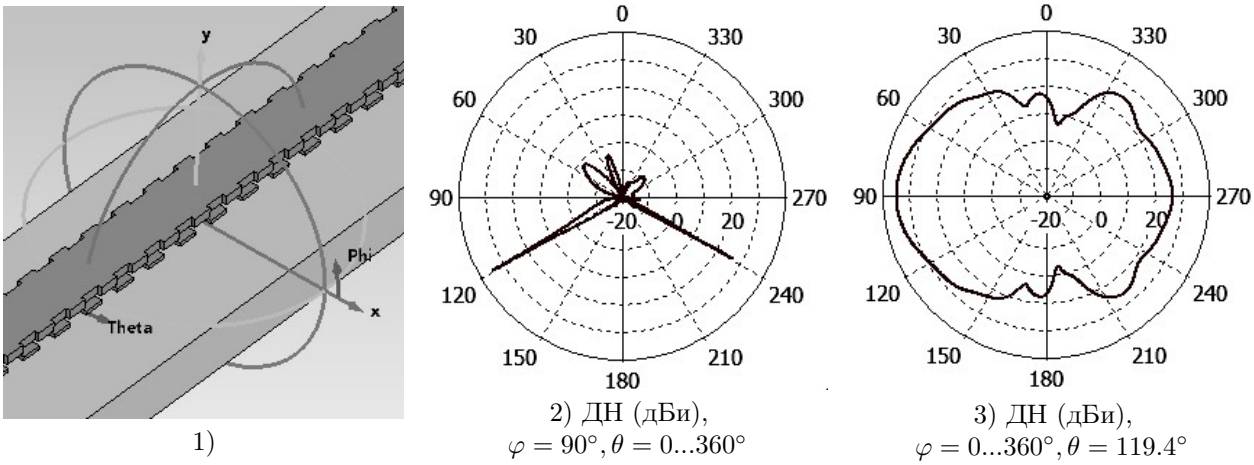


Рисунок 7 – Гибридная АДС-антенна (слева) и иллюстрация её продольного разреза (справа); 1 – оптический волновод, 2 – СМ-антенна, 3 – ДР-антенна, 4 – кремниевая подложка, 5 – прослойка из оксида кремния ($n = 1.46$), 6 – воздушная прослойка

Боковые лепестки, характерные как для ДР и СМ по отдельности, так и для АДС, эффективно подавляются в гибридной структуре, а их относительный уровень не превышает −36 дБ. Присутствуют ярко выраженные задние лепестки, уровень наибольшего из которых составляет −8.7 дБ. Управление направлением максимума ДН в продольной плоскости гибридной АДС-антенны может осуществляться путём перестройки длины волны. Зависимость положения максимума ДН от длины волны приведена на рис. 9.



1) 2) ДН (дБи), $\varphi = 90°, \theta = 0...360°$ 3) ДН (дБи), $\varphi = 0...360°, \theta = 119.4°$

Рисунок 8 – Гибридная АДС-антенна из нитрида кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

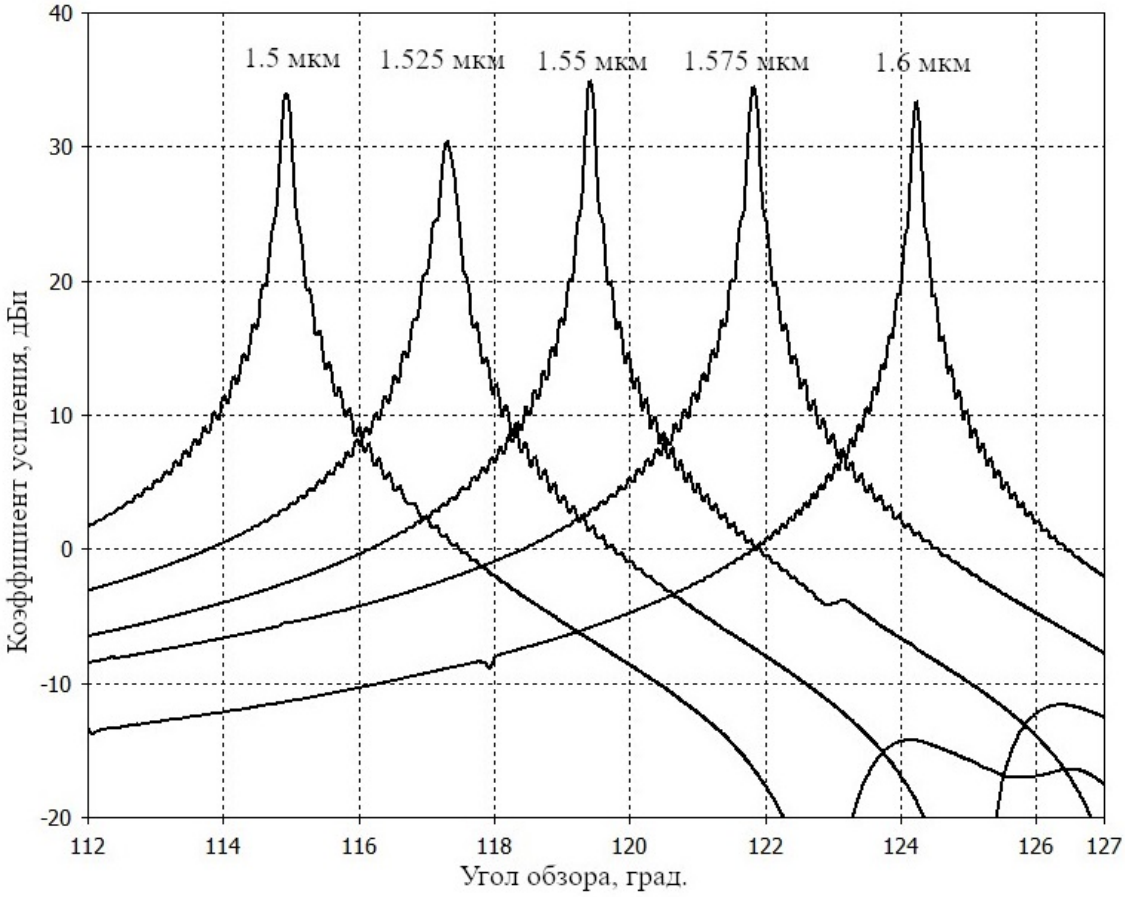


Рисунок 9 – Зависимость направления главного лепестка ДН от длины волны

ДН антенн, приведённые на рис. 2, 4, 6, были получены путём моделирования ОА из указанных работ с соблюдением всех геометрических параметров – периода, сечения, глубины выреза, и т.д. Материалы, задействованные в этих моделях – кремний, оксид кремния и нитрид кремния – параметризировались значениями показателей преломления для диапазона 1.55 мкм из [17–19]. Остальные параметры – учёт воздушной прослойки у поверхности ОИС, толщина кремниевой подложки и прочие совпадают для всех моделей. Сравнительный анализ по результатам моделирования гибридной АДС и других конструкций ОА приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ гибридной АДС-антенны с другими ОА по результатам моделирования в равных условиях

Оптическая антенна	Коэффициент усиления, дБи	Уровень боковых лепестков (без отражения), дБ	Ширина главного лепестка (θ), град.	Ширина главного лепестка (φ), град.	Угол перестройки (θ) (1.5-1.6 мкм), град.
ДР (Si_3N_4)	22.3	-4.2	1.1	41.2	5
АДС (Si_3N_4)	22.4	-20.5	0.4	26.7	7
СМ (Si)	17.2	-2.3	0.2	41.9	39.8
Гибридная АДС (Si_3N_4)	**30.4**	**-32.3**	**0.2**	**23.9**	**9.3**

Заключение

Предложена гибридная АДС-антенна, эффективно сочетающая в себе два различных вида ОА – ДР- и СМ-антенны. Антенна обладает хорошей направленностью за счёт механизма подавления боковых лепестков, а асимметрия позволяет минимизировать задние лепестки благодаря локализации направляемой моды в верхней СМ-антенне с большей высотой, и, как следствие, большим эффективным показателем преломления. В пакете CST создана и численно исследована модель предложенной ОА длиной 1 мм. Результаты моделирования показали, что антенна достигает коэффициента усиления до 34.9 дБи при длине волны 1.55 мкм. Ширина главного лепестка при этом составляет 0.1° в продольной плоскости и 23.9° в поперечной. Перестройка направления главного лепестка в продольной плоскости в диапазоне длин волн от 1.5 до 1.6 мкм составляет 9.3°, при этом неравномерность коэффициента усиления находится в пределах 4.5 дБ. Уровень боковых лепестков не превышает -32.3 дБ во всём диапазоне перестройки. Кроме того, имеет место уширение главного лепестка в продольной плоскости до 0.2°. Рассмотренный подход подавления боковых лепестков может использоваться в схожих конструкциях ОА с малым углом перестройки главного лепестка в продольной плоскости.

Список литературы

[1] Vyhlidka S. et al. All-dielectric diffraction grating for multi-petawatt laser systems // Optics and Measurement Conference 2014. SPIE. 2015. № 9442. С. 395-399. doi: 10.1117/12.2086800 EDN: UFJQSV

[2] Kalinchenko G. et al. High reflective diffraction grating for ultrafast pulse compression // High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology II. SPIE. 2015. № 9513. С. 104-108. doi: 10.1117/12.2185696 EDN: WNUWQL

[3] Krishnamoorthy A. V. et al. From chip to cloud: Optical interconnects in engineered systems // Journal of Lightwave Technology. 2017. Т. 35. №. 15. С. 3103-3115.

[4] Marchetti R., Lacava C., Carroll L., Gradkowski K., Minzioni P. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips // Photonics Research. 2019. № 2(7). С. 201-239. doi: 10.1364/PRJ.7.000201 EDN: YDLBYX

[5] Norton S., Erdogan T., Morris G. Coupled-mode theory of resonant-grating filters // Journal of the Optical Society of America A. 1997. № 3(14). С. 629-639.

[6] Taillaert D., Van Laere F., Ayre M., Bogaerts W., Van Thourhout D., Bienstman P., Baets R. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. № 8(45). С. 6071. doi: 10.1143/JJAP.45.6071 EDN: LNIGID

[7] Sun J., Timurdogan E., Yaacobi A., Hosseini E., Watts M. Large-scale nanophotonic phased array // Nature. 2013. № 7431 (493). С. 195-199.

[8] Im C., Bhandari B., Lee K., Kim S., Oh M., Lee S. Silicon nitride optical phased array based on a grating antenna enabling wavelength-tuned beam steering // Optics express. 2020. № 3(28). С. 3270. doi: 10.1364/oe.383304 EDN: TVVOWJ

[9] Liu Y., Zhang C., DeSantis D., Hu D., Meissner T., Notaros J., Klamkin J. High-resolution arrayed waveguide grating-assisted passive optical phased array for 2D beam steering // Optics Express. 2025. № 4(33). С. 7714-7722. doi: 10.1364/oe.549588 EDN: HUIGQM

[10] Van Laere F. et al. Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides. Journal of lightwave technology. 2007. T. 25. N. 1. C. 151-156.

[11] Zaoui WS, Kunze A, Vogel W, Berroth M. CMOS-compatible polarization splitting grating couplers with a backside metal mirror. IEEE Photonics Technology Letters. 2013. T. 25. N. 14. C. 1395-1397.

[12] Selvaraja S. K. et al. Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit. Conference on Lasers and Electro-Optics // Optica Publishing Group. - 2009.

[13] Xu H., Shi Y. Diffraction engineering for silicon waveguide grating antenna by harnessing bound state in the continuum // Nanophotonics. 2020. № 6(9). C. 1439-1446. doi: 10.1515/nanoph-2020-0018 EDN: VUAFSB

[14] Melik-Gaykazyan E., Koshelev K., Choi J., Kruk S., Bogdanov A., Park H., Kivshar Y. From Fano to quasi-BIC resonances in individual dielectric nanoantennas // Nano Letters. 2021. № 4(21). C. 1765-1771. doi: 10.1021/acs.nanolett.0c04660 EDN: MYQNJW

[15] DeSantis D., Mazur B., Notaros M., Notaros J. Multi-beam solid-state LiDAR using star-coupler-based optical phased arrays // Optics Express. 2024. №32(21). C. 36656-36673.doi: 10.1364/oe.537489 EDN: MLGWMM

[16] Prousalidi T., Syriopoulos G., Kyriazi E., Botter R., Zervos C., Poulopoulos G., Apostolopoulos D. Flat Emission Silicon Nitride Grating Couplers for Lidar Optical Antennas // MDPI Photonics. 2025. № 3(12). C. 214. doi: 10.3390/photonics12030214 EDN: GGSCFF

[17] Franta D. et al. Temperature-dependent dispersion model of float zone crystalline silicon // Applied Surface Science. 2017. № 421. C. 405-419.

[18] Tan C. Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy // Journal of Non-Crystalline Solids. 1998. № 1-2 (223). C. 158-163. doi: 10.1016/S0022-3093(97)00438-9

[19] Luke K. et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si3N4 microresonator // Optics letters. 2015. № 21(40). C. 4823-4826. doi: 10.1364/OL.40.004823

Ссылка для цитирования:

Мошиченко С.Д., Клещенков А.Б. Гибридная оптическая антенна на основе нитрида кремния для пространственного сканирования // Современная электродинамика. 2025. Т. 4, № 5(19). С. 28-35. EDN DWCKPR, doi: 10.24412/2949-0553-2025-519-28-35

Citation link:

Moshichenko S.D., Kleshenkov A.B. Hybrid silicon nitride based optical antenna for spatial scanning // Modern Electrodynamics. 2025. Vol. 4, No. 5(19). P. 28-35. EDN DWCKPR, doi: 10.24412/2949-0553-2025-519-28-35