

图书在版编目—建议数据

无线光通信 / 柯熙政 柯程虎 吴加丽 著. —澳门:

澳门科学出版社, 2026.08

ISBN 978-99996-49-89-6

I. ①无… II. ①柯…②柯…③吴… III. ①大气光通信 (自由空间光通信 / 无线光通信 FSO)

IV. ① TN929.12

依据《中国图书馆分类法》提供分类参考数据。

无线光通信

柯熙政 柯程虎 吴加丽 著

ISBN 978-99996-49-89-6

责任编辑: 彭 俊

责任校对: 何幸宜

装帧设计: 何幸祉

出版发行: 澳门科学出版社

地 址: 澳门南湾大马路恒昌大厦 11 楼 F 座

网 址: <https://www.mospbs.com>, <https://moaj.mospbs.com>

总 机: +853-62961666

印装公司: 澳門翰林出版集團有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印 张: 32.5

字 数: 775 千字 印 数: 1~3000

版 次: 2026 年 08 月第 1 版

印 次: 2026 年 08 月第 1 次印刷

如有缺损质量问题, 请联系本社销售中心。

版权所有, 违者必究

Макао Сайентифик Пабlishерс

Адрес: 11-й этаж, блок, здание Хэнчан, авеню Наньвань, Макао, 999078, Китай

Веб-сайт: www.mospbs.com / moaj.mospbs.com

Для получения дополнительной информации обращайтесь по адресу book@mospbs.com

Данное издание защищено авторским правом. Если иное не предусмотрено законодательными исключениями или положениями соответствующих коллективных лицензионных соглашений, любое воспроизведение любого фрагмента данного издания строго запрещено без письменного разрешения компании Macao Scientific Company.

Подробную информацию о процессе издательской деятельности издательства Macao Scientific Publishers можно найти на нашем официальном сайте <https://www.mospbs.com/>

Авторское право © Macao Scientific Publishers. Все права защищены.

Беспроводная оптическая связь

Твердый переплет

Количество слов: 775 372 слова

Первое издание: август 2026 г.

Издательство: Macao Scientific Publishers (MOSP)

Печать: Издательская группа Ханьлинь, Макао, Китай

Дата печати: август 2026 г.

ISBN 978-99996-49-89-6



При наличии проблем с качеством книги обращайтесь по адресу book@mospbs.com.

БИОГРАФИЯ АВТОРА



Xizheng Ke

Академик Xizheng Ke — известный специалист в области беспроводной оптической связи, иностранный академик Российской академии естественных наук, выдающийся педагог провинции Шэньси, член-корреспондент Китайского института электроники, заместитель директора Ключевой государственной лаборатории интеллектуальных совместных сетей военного и гражданского назначения провинции Шэньси, эксперт по оценке государственных научно-технических наград, а также член предметной оценочной комиссии Третьего совета по академическим степеням провинции Шэньси. Более двадцати лет он активно проводит научные исследования в своей области, упорно продвигается вперед и самоотверженно трудится на педагогическом поприще, неизменно следуя своей профессиональной миссии. С 2001 года он получил 20 провинциальных и ведомственных научно-технических наград, имеет более 50 официально утверждённых национальных изобретательских патентов. Его монография «Беспроводная оптическая связь» издана и распространена на китайском, японском, арабском, португальском и других языках. Всего учёным опубликовано более 30 монографий в издательствах «Наука» и Springer, а также свыше 500 научных статей. Он является членом редакционных советов более десяти научных журналов, включая «Журнал электроники Китая», и занимает общественные должности в более десяти академических сообществах, в том числе в Китайском институте электроники. Академик Кэ Сичжэн пользуется высокой репутацией в научном сообществе электронной и информационной техники Китая.

БИОГРАФИЯ АВТОРА



Chenghu Ke

Мужчина, член Коммунистической партии Китая, доктор наук, доцент, научный руководитель магистрантов. Член Правления и заместитель генерального секретаря Шэньсийского общества источников питания, член Шэньсийского оптического общества, эксперт экспертного совета Китайского общества содействия международному экономическому и техническому сотрудничеству. Руководитель Академической рабочей станции по беспроводной оптической связи и технологиям построения сетей и руководитель научной группы Сианьского университета искусств и наук. Участвовал в реализации ряда проектов Национального фонда естественных наук Китая. Является руководителем одного проекта Фундаментальной программы естественнонаучных исследований провинции Шэньси, одного проекта фундаментальных исследований математики и физики провинции Шэньси, одного научно-технического проекта города Сиань, а также ряда научно-исследовательских работ по заказам предприятий. Лауреат двух премий за научно-технические достижения провинции Шэньси и одной премии за научно-технические достижения высших учебных заведений провинции Шэньси. Опубликовал 29 научных статей в журналах, включая «Наука Китая», из них 18 статей индексируются в базах SCI/EI. Автор и соавтор 6 монографий и учебных пособий, изданных издательством «Наука» и другими издательствами. Руководил 3 проектами программы инновационных студенческих работ провинциального уровня и выше. Под его руководством студенты завоевали десятки наград на дисциплинарных конкурсах категорий А/В, в том числе одну бронзовую награду национального уровня на Международном конкурсе инновационных проектов студентов Китая.

БИОГРАФИЯ АВТОРА



Jiali Wu

Женщина, ханьской национальности, член Коммунистической партии Китая. Родилась в марте 1994 года в Синпине провинции Шэньси. В 2023 году окончила Сианьский политехнический университет, получила докторскую степень по инженерным наукам. В настоящее время работает преподавателем в Сианьском университете искусств и наук, является членом Шэньсийского оптического общества. Основные научные направления: распространение и компенсация оптических пучков, адаптивная оптика. Она является руководителем одного специального научно-технического проекта города Сиань по программе Сианьского университета искусств и наук, участником одного проекта Национального фонда естественных наук Китая, одного ключевого проекта производственной цепочки провинции Шэньси и двух научно-исследовательских проектов по заказу предприятий. Автор опубликовала 15 научных статей, из которых 13 индексируются в базах SCI/EI. Является соавтором одной научной монографии, опубликованной издательством «Наука». Имеет 4 официально утверждённых национальных изобретательских патента и 2 зарегистрированных права на компьютерное программное обеспечение. Под её руководством студенты-бакалавры получили первую премию Северо-Западного региона на XVIII Всероссийском конкурсе студенческих инновационных проектов iCAN, а также золотую премию провинции Шэньси на Международном конкурсе студенческих инновационных проектов Китая (2024). Автор удостоена двух первых премий научно-технических наград Ассоциации оптоэлектронных технологий провинции Гуандун и одной награды «Лампа Алладина» за лучшую технологию на 26-й Гуанчжоуской международной выставке осветительной техники.

СОДЕРЖАНИЕ

Заголовок	Страницы
Глава 1 Система беспроводной оптической связи	
1.1 Модель беспроводной оптической связи	1
1.2 Оптический источник света	4
1.3 Отклик полупроводниковых лазеров и фотодетекторов	12
1.4 Поверхностный плазмон	26
1.5 Обнаружение сигналов	30
1.6 Оптическое усиление усилитель	44
1.7 Технология связи свободного пространства с оптическим волокном	40
1.8 Оптические антенны и телескопы	45
1.9 Итоги и перспективы	53
1.10 Контрольные вопросы к главе 1	54
Глава 2 Когерентная оптическая связь	
2.1 Основные принципы когерентной оптической связи	64
2.2 Когерентная модуляция и демодуляция	73
2.3 Факторы, влияющие на чувствительность детектирования	82
2.4 Пространственно-фазовые условия оптического гетеродинного детектирования	84
2.5 Коррекция искажений волнового фронта адаптивной оптикой	91
2.6 Итоги и перспективы	105
2.7 Контрольные вопросы к главе 2	106
2.8 Упражнения 2	106
Глава 3 Модуляция, демодуляция и кодирование	
3.1 Технология модуляции	113
3.2 Технология внешней модуляции	116
3.3 Обратная модуляция	128
3.4 Класс импульсно-позиционной модуляции	136
3.5 Прямая модуляция источника света	146
3.6 Интенсивностная модуляция поднесущей	155
3.7 Ортогональное частотно-мультиплексирование	163

3.8	Пространственно-временное кодирование	171
3.9	Неортогональный множественный доступ	177
3.10	Связь с мультиплексированием орбитального углового момента	180
3.11	Канальное кодирование	185
3.12	Итоги и перспективы	190
3.12	Вопросы для размышления 3	191
3.12	Упражнения 3	192
Глава 4 Атмосферный канал, оценивание канала и эквализация канала		
4.1	Эффект атмосферного затухания	198
4.2	Атмосферная модель турбулентности	205
4.3	Разнесенный прием	221
4.4	Оценивание канала	223
4.5	Эквализация канала	225
4.6	Влияние атмосферной турбулентности на коэффициент битовых ошибок	230
4.7	Границы пропускной способности канала	233
4.8	Влияние турбулентности на распространение света	239
4.9	Итоги и перспективы	245
4.10	Вопросы для размышления 4	245
4.11	Упражнения 4	246
Глава 5 Связь с использованием белых LED и организация сети		
5.1	Принцип свечения LED	259
5.2	Модель фоновых оптического шума системы видимой оптической связи в среде Интернета транспортных средств	266
5.3	Модель мультипликативного шума системы видимой оптической связи	269
5.4	Оптимизация размещения источников света	273
5.5	Indoor канал видимой оптической связи	271
5.6	Приемник и технология детектирования	276
5.7	Восходящая линия связи в системе связи в видимом диапазоне	280
5.8	Технология позиционирования на основе связи в видимом диапазоне	282
5.9	Внутренняя гибридная система связи VLC/RF	284
5.10	Гетерогенная сеть видимого света	292
5.11	Гибридная ретрансляционная система связи OWC/RF-THz	297
5.12	Комбинируемая навигация: позиционирование по видимому свету + инерциальная навигация	301
5.13	Межплатная беспроводная оптическая связь	304

5.14	Итоги и перспективы	310
5.15	Контрольные вопросы к главе 5	310
5.16	Упражнения 5	310
Глава 6 Подводная оптическая связь		
6.1	Обзор	319
6.2	Система подводной лазерной связи	321
6.3	Лазерная связь с подводными лодками	323
6.4	Приемная антенна сложного глаза	327
6.5	Стабилизация тока на передающей стороне	335
6.6	Характеристики передачи света в морской воде	340
6.7	Непрямая передача	347
6.8	Влияние подводной турбулентности на характеристики передачи лазера	357
6.9	Итоги и перспективы	369
6.10	Контрольные вопросы к главе 6	370
6.11	Упражнения 6	370
Глава 7 Ультрафиолетовая связь		
7.1	Ультрафиолетовое излучение и его характеристики канала	374
7.2	Характеристики ультрафиолетовой передачи вне прямой видимости	380
7.3	Сеть связи вне прямой видимости в солнечно-слепом ультрафиолетовом диапазоне	384
7.4	Модель фоновых шумов ультрафиолетового излучения	388
7.5	Модель потерь на трассе ультрафиолетовой связи	401
7.6	Итоги и перспективы	412
7.7	Контрольные вопросы к главе 7	413
7.8	Упражнения 7	413
Глава 8 Технологии захвата, наведения и сопровождения		
8.1	Система АРТ	416
8.2	Автоматический захват	420
8.3	Автоматическое сопровождение	430
8.4	Быстрое совмещение несоосных оптических осей передающей и приемной сторон	434
8.5	Влияние ошибки наведения на характеристики связи	439
8.6	Итоги и перспективы	443
8.7	Контрольные вопросы к главе 8	443
8.8	Упражнения к главе 8	444

Глава 9	Передача частично когерентного света	
9.1	Основные параметры пучка	447
9.2	Взаимная когерентная функция	449
9.3	Расширение, дрейф и флуктуации интенсивности пучка	452
9.4	Частично когерентная модель света	455
9.5	Распространение пучка в атмосферной турбулентности	460
9.6	Детектирование частично когерентного света	478
9.7	Итоги и перспективы	482
9.8	Контрольные вопросы к главе 9	482
9.9	Упражнения 9	483
Глава 10	Будущее коммуникационных технологий	
10.1	Рентгеновская космическая связь	489
10.2	Связь с мультиплексированием орбитального углового момента	497
10.3	Нейтринная связь	509
10.4	Связь с использованием гравитационных волн	512
10.5	Терагерцевая связь	517
10.6	Итоги и перспективы	526
10.7	Контрольные вопросы к главе 10	526
10.8	Упражнения 10	527

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технология беспроводной оптической связи, использующая свет как носитель информации, обладает преимуществами высокой пропускной способности, малой задержкой, высокой скоростью передачи данных и широким спектральным диапазоном. В зависимости от типа оптического канала передачи беспроводная оптическая связь подразделяется на ультрафиолетовую оптическую связь, видимую оптическую связь и подводную оптическую связь. Однако среда канала оказывает значительное влияние на распространение оптического сигнала, поэтому вопросы подавления и компенсации воздействия среды канала на распространение лазерного излучения постоянно являются ключевым направлением исследований в области беспроводной оптической связи.

Книга состоит из десяти глав, в которых подробно изложены основы беспроводной оптической связи. Рассматриваются принципы беспроводной оптической связи, кодирование и модуляция оптических сигналов, характеристики передачи в различных типах оптических каналов, технология захвата, наведения и слежения; также детально описаны принципы распространения частично когерентного света и перспективные технологии связи будущего.

Данная книга является результатом научной работы автора в период его работы почетным профессором Сианьского университета искусств и наук, а также итогом исследований, выполненных в Академической рабочей станции по беспроводной оптической связи и технологиям построения сетей города Сиань при Сианьском университете искусств и наук. Автор выражает благодарность Сианьскому университету искусств и наук за предоставленные условия и поддержку, обеспечившие успешное издание книги.

Исследования, представленные в книге, выполнены при поддержке проекта Национального фонда естественных наук Китая (№ 61377080), Ключевого инновационного проекта промышленности провинции Шэньси (2017 ZDCXL-GY-06-01), Проекта фундаментальных исследований естественных наук провинции Шэньси (2024JC-YBMS-562) и Проекта фундаментальных исследований математики и физики провинции Шэньси (23JSQ024). Автор приносит искреннюю благодарность.

Автор благодарит авторов литературных источников, упомянутых в списке литературы, а также исследователей, работы которых не включены в библиографию. Их труды дали автору глубокое вдохновение.

В связи с ограниченностью знаний автора в тексте книги неизбежно могут встретиться упущения и неточности. Автор просит читателей высказывать критические замечания и предложения.

Система беспроводной оптической связи

Оптическая связь - это способ связи, в котором оптическая волна используется в качестве несущей. Оптическая связь может осуществляться как с волноводом, так и без волновода. Волоконно-оптическая связь - это передача света по волноводу (оптическому волокну). Беспроводная оптическая связь не требует волновода: свет передается в свободном пространстве. Беспроводная оптическая связь, то есть оптическая связь в свободном пространстве (free-space optical, FSO), сочетает преимущества волоконно-оптической и микроволновой связи: обладает большой пропускной способностью, не требует прокладки оптического волокна и не нуждается в лицензии на спектр. В данной главе рассматриваются модель и основные понятия системы беспроводной оптической связи.

1.1 Модель беспроводной оптической связи

Терминал беспроводной оптической связи состоит из оптической антенны (телескопа), лазерного приемопередатчика, блока обработки сигналов, автоматической системы наведения и сопровождения и других частей. В качестве источника света передатчика используется лазерный диод (laser diode, LD, также называемый полупроводниковым лазером) или LED (Light-Emitting Diode, LED, светодиод), а в приемнике главным образом применяются PIN или APD (avalanche photo diode, лавинный фотодиод). Модель беспроводной оптической связи показана на Рис. 1.1.

2019

历史机遇 · 打造交流合作基地

Historic Opportunity · Build Communication And Cooperation Bases

· 粤港澳大湾区 · 发展规划纲要

解读2019年新发布《粤港澳大湾区发展规划纲要》

★★★★

大湾区规划 · Introduction

《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确了澳门“一个中心、一个平台、一个基地”的三个定位，即：建设世界旅游休闲中心、中国与葡语国家商贸合作服务平台，**打造以中华文化为主流、多元文化共存的交流合作基地。**

It further clarified the three orientations of "one center, one platform and one base" of Macao, namely, to build a world tourism and leisure center, a business and trade cooperation service platform between China and Portuguese-speaking countries, and to build an exchange and cooperation base with Chinese culture as the mainstream and multicultural coexistence.

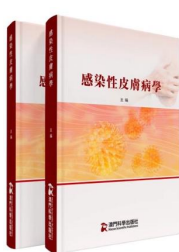


全球发行 · Publishing worldwide



由于国内自费书没有实际销售，出版社不会实际发行，属于非正式出版物，因此国内自费书绝大部分是属于非正式出版物。国际出版即便在没有销售市场的情况下也可以在海外发行上架。世界上其他地方（包括中国）的读者可以通过海外电商平台进行订购和销售。

Since there is no market for self-funded books in mainland China, mainland publishing houses will not actually issue them, so most of self-funded books in the Mainland are informal publications.



- 呼吸系统基本基础与临床 Fundamentals and clinic of respiratory diseases
- 临床肿瘤护理学 Clinical oncology nursing
- 感染性皮肤病学 Infectious dermatology
- 内分泌系统疾病 Endocrine system disease



- 实用小儿内科学 Practical pediatric internal medicine
- 消化系统疾病诊疗学 Diagnosis and treatment of digestive system diseases
- 现代中医诊断学 Modern diagnostics of traditional chinese medicine
- 皮肤修复与再生 Skin repair and regeneration

出版流程 · Publishing Process

出版流程快速简便，在填写基本信息、签订合同并支付费用后，IBPC将原始内容进行校对、排版及封面设计；在经过多次校对后，提交申请国际书号；可根据实际需求进行印刷和馆藏存档，最后上架发行。全程专人沟通指导，以极高性价比的方式出版属于自己的作品。

The publishing process is simple and convenient, after filling in the basic information, signing the contract and paying the fee, IBPC will conduct proofreading, typesetting and cover design. After multiple proofreading, submit the ISBN application. According to the actual needs, we will arrange printing and collection archiving, and finally put on the shelves and issued.

检索服务 · Retrieval Service

IBPC的检索服务可提供出版物国际注册文件及出版物所在地的图书馆检索证明，为作者提供证明文件支撑。同时，优秀图书将推荐至国际数据库中收录，提升出版物的认可度。

IBPC can provide retrieval service including the registration documents and the library search certificate. Meanwhile, excellent books will be recommended for inclusion in authoritative databases to enhance the recognition of publications.

销售协议 · Sales Agreement

作者签订销售合作协议后，IBPC可提供多种上架渠道，包括官网、京东、天猫、亚马逊、当当网等平台，可销售纸质印本与电子图书等形式，并按照合作协议进行利润分成。

After the author signs the sales agreement, IBPC can provide a variety of sales channels, such as the official website, JD & T-mall overseas Purchase, Amazon and other platforms, printed paper and electronic books are available, and the authors share the profits according to the sales agreement.



填写信息
Information Filling



签订合同
Contract Signing



支付费用
Payment



提交书稿
Submitting



内容校对
Proofreading
内容排版
Content Layout
封面设计
Cover Design



申请书号
ISBN Apply



印刷出版
Printing



馆藏存档
Archives



上架发行
Publication

澳门科学出版社 MOSP

“以服务青少年及青年科学才俊为己任，
打造国际性的科学技术交流平台”

正规国际出版，首选澳科出版

- 学术著作/个人作品 - 优质
- 中华“强国文化”输出战略 - 翻译后国际出版
- 数字教材 - 教材出书 & 数字化媒体上线

所有优质内容，均可申请出版减免资助。

所有澳门本土内容，均可申请出版减免资助；

澳门总部

电话：0853-62961666（澳门）

邮件：book@mospbs.com

地址：中国澳门南湾大马路恒昌大厦F座11楼

网址：www.mospbs.com（英文）| moaj.mospbs.com（中文）

**特别提醒：MOSP所有业务均有出版社的正规盖章合同，
若有任何疑问，可联系出版社编辑确认。**