

# 光纤量子通信理论基础

Fundamental Theories of  
Optical Fiber Soliton Communications

人民邮电出版社



光纤孤子通信理论基础  
Fundamental Theories of  
Optical Fiber Soliton Communications

杨祥林 著  
温扬敬

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤孤子通信理论基础/杨祥林,温扬敬著. -北京:  
国防工业出版社,2000.1

ISBN 7-118-02100-8

I.光… II.①杨…②温… III.光纤通信  
IV.TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14305 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9 3/8 235 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:18.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

## 前 言

孤子概念是 20 世纪非线性科学的重要发现,其起源可追溯到 1834 年英国海军工程师 scott Russel 观察到的河面隆起的水峰的保形运动,这种奇特的现象曾令他惊叹不已,并写下了一段优美的文字记载,从此揭开了人类对自然界中大量存在的色散非线性或耗散非线性系统研究的序幕。今天人们广泛谈论的光孤子,其概念产生于 1973 年,当时刚完成等离子体中孤子形电子回旋波研究的 Hasegawa 进入贝尔实验室研究光纤通信理论,在解决由光纤色散引起的光波通信的困难中,借助非线性效应,认证了光纤中非线性包络波与电子回旋波间的相似性,建立了描述光纤中包络波的非线性薛定谔方程,并与 Tappert 一起从理论上证明,任何无损光纤中的光脉冲在传输过程中自己能形变为孤子后稳定传输。这一发现立即诱发了一种遐想,将光孤子作为一种信息载体用于高速通信。应用是科学进步最强大的推动力,光孤子在显示出其潜在的应用价值后,立即引起人们巨大的兴趣,由此掀起了光纤孤子通信研究的热潮,并最终发展成为第五代光纤通信。

光纤孤子通信涉及孤子的产生、传输演化、放大整形与传输控制等基本问题。从光纤孤子通信发展历史看,自 1973 年到 1980 年可看作前两个问题的理论准备时期,该时期中 Hasegawa 与 Tappert 发表的“色散光纤中非线性光孤子脉冲的稳定传输”文章,从理论上揭示了光纤中光孤子的形成机制与传输演化规律,表明光纤负色散区能支撑亮孤子,正色散区能支撑暗孤子。1980 年, Mollenauer 等用人工方法观察了光纤中孤子的形成机制与演化规律,这两件事证明光纤孤子的存在并不是一种臆测或信念,而是一种科学理论与客观实际,是孤子概念与理论研究的一个新的里程碑。

1981年初,Hasegawa与Kodama发表了“单模光纤中用光孤子传输信号”的著名文章,正式揭开了光纤孤子通信研究的序幕。接着又发表了“光纤中孤子放大与整形”的系列文章,提出用喇曼增益补偿光纤损耗,实现孤子长距离传输的构想,并于1989年实现了6000km孤子稳定传输。为了推动光孤子传输研究向实用化方向发展,80年代中期开始研究具有实用前景的孤子能量补偿放大器方案,在此期间出现了两件事:1986年Gordon和Haus的研究指出,采用孤子能量补偿放大器后,其噪声会对光波产生频率调制,导致孤子随机走离,限制孤子传输系统速率与距离,称为G-H限制;而1987年Payne与DeSurvire各自独立地利用掺铒光纤成功地实现了1.55 $\mu\text{m}$ 光信号放大。这两件互相矛盾的事引导人们向两个方向展开研究。Nakazawa与Iwatsuki等立即采用掺铒光纤放大器作为孤子能量补偿放大器进行各种传输实验研究,Gordon与Mollenauer等研究采用集中式光纤放大器级联孤子系统稳定传输的幅值条件,提出了著名的平均孤子模型,Hasegawa与Kodama则采用推广的李变换法研究含损耗与周期放大器的扰动非线性薛定谔方程的孤子解,提出了著名的导引中心孤子概念。在这个概念的指导下,Mollenauer于1991年实现了5Gb/s,6000km孤子传输。由于光纤放大器的问世,1991年前后,采用光放大器级联的普通线性传输系统已将5Gb/s光信号传输9000km,超过了孤子系统的极限传输能力。新技术挑战立即把光孤子通信理论的研究推向了新的阶段,借鉴动态系统自组织概念的启示,Haus与Kodama等分别独立地提出采用频域滤波和具有过增益的级联放大系统组成方案,克服了G-H效应对孤子传输距离的限制,并立即由Mollenauer等进行了试验,使孤子稳定传输距离超过了10000km。与此同时,Nakazawa等采用同步幅度调制与频域滤波相结合的系统组成方案,实现了10Gb/s,10<sup>6</sup>km的孤子稳定传输,在所有光纤通信传输方案中,就速率和距离而言,光孤子传输已到了最高水平。在理论上,70年代初期研究了标准非线性薛定谔方程的可积性,认证了无损耗光纤中光脉冲在传输过程中自己能形变为孤子后稳定传



输;20 年后的 90 年代初,研究了扰动非线性薛定谔方程的可控性,认证了受扰光纤系统中光脉冲可通过外部机构与光纤本身的非线性特性加以控制,实现孤子稳定传输。这些观点至今仍在推动着光纤孤子通信研究的发展。

国内目前已有两本论述光孤子理论的著作,但涉及光纤孤子通信系统的理论内容很少。国外论述孤子理论的书很多,而专门论述光纤孤子通信理论的著作不多,但其中有四本书与光孤子通信有关,一本是 Hasegawa 写的《光纤中的孤子》,主要讨论光孤子的形成机制,篇幅较小,属简介性书籍;第二本是 Agrawal 写的《非线性光纤光学》,主要讨论光纤中的非线性传输理论基础及非线性特性的一些应用;第三本是 Taylor 等写的《光孤子理论与实验》,主要讨论非线性光纤中与孤子传输相关的各种专题,由多人汇编而成,缺乏系统性和必要的深度;第四本是《光通信中的孤子》,是 Hasegawa 的研究专著,对光纤中孤子形成机制与理论基础作了系统的论述,对孤子整形与传输控制及其他一些相关问题亦进行了一定讨论,内容覆盖范围较广,是目前光孤子理论及应用方面较有影响的著作。

由于近年来光纤孤子通信理论与实验研究发展很快,这几本书并不能完全反映光纤孤子通信的研究现状,又鉴于光纤孤子通信的突出优点及其在未来光纤通信发展中的重要地位,而且国内目前尚无专门论述光纤孤子通信理论的著作,因此本书将把 10 余年来我们在光纤孤子通信理论研究的结果与国内外已发表的论著文献结合起来,并加以系统化,力图反映光纤孤子通信的主要问题与研究现状,希望本书的出版能对我国光纤孤子通信的理论与应用研究有所促进。

本书共十三章。第一章介绍光纤孤子的基本概念与光纤孤子通信系统的基本组成,作为预备知识。第二、三章分别介绍研究光纤孤子传输问题的两种主要数学方法。第四章介绍光孤子间的相互作用机制及其抑制方法。第五、六章分别讨论光纤孤子通信系统的两个重要部件——光孤子源与光纤放大器的理论及性能,这

是孤子通信的物质基础。第七章介绍光纤孤子通信系统的传输方案。第八章介绍光纤孤子通信系统容量的限制因素。第九~十二章分别对光孤子通信系统的四类传输控制方案及其稳定性进行分析。由于实验工作对理论研究的支撑和重要推动作用,最后,第十三章介绍光纤孤子通信实验系统及其结果。其中第一、六、七、九、十、十一、十二、十三、十四章由杨祥林撰著,第二、三、四、五、八章由温扬敬撰著,全书由杨祥林统编。

作者对叶培大教授、刘盛纲教授给予的支持深表谢意。赵阳、王发强博士及邱亮硕士等在本项研究和本书撰著、修改、制图、打字等过程中做了许多工作,在此特表谢意。

国家自然科学基金会、军事电子预研基金会、国家通信 863 专家组、江苏省科委、东南大学与南京邮电学院对作者从事的光纤孤子通信项目的研究与本书的撰写给予了大力支持,在此深表谢意。

最后,我们要特别感谢国防科技图书出版基金评审委员会的专家教授,本书的出版与他们的大力支持是分不开的。

应该看到,我们对光纤孤子通信理论基础的论述还不完善,许多问题尚需进一步探讨,作者恳切期望得到读者的批评与指正。

作 者  
于南京邮电学院

# 目 录

<b>第一章 光纤孤子的基本概念</b> .....	1
1.1 光纤中的孤子 .....	1
1.2 光纤的线性特性 .....	2
1.2.1 光纤损耗 .....	2
1.2.2 光纤色散 .....	2
1.2.3 模态双折射 .....	5
1.3 光纤的非线性特性 .....	5
1.4 光纤中光波的包络方程 .....	7
1.5 非线性薛定谔方程的解及其性质 .....	10
1.6 光纤孤子传输系统技术参数 .....	13
1.7 光纤孤子传输系统的构成 .....	15
参考文献 .....	16
<b>第二章 光纤孤子传输方程的逆散射分析</b> .....	18
2.1 逆散射方法的基本思路 .....	18
2.2 Lax 理论与 AKNS 方案 .....	20
2.3 直接散射问题(本征值问题) .....	23
2.3.1 二分量系统的解与散射数据的特性 .....	24
2.3.2 二分量系统的解与散射数据的确定 .....	26
2.4 散射数据随 $Z$ 的演化 .....	28
2.5 逆散射变换 .....	30
2.5.1 Marchenko 逆散射方程 .....	30
2.5.2 Zakharov - Shabat 逆散射方程 .....	33
2.6 孤子解的构造 .....	35
2.6.1 无反射势和 $N$ 孤子解 .....	36

2.6.2 孤子解构造的具体例子 .....	37
参考文献 .....	42
<b>第三章 光纤孤子传输方程的微扰理论 .....</b>	<b>44</b>
3.1 运动积分与守恒量 .....	45
3.2 孤子系统的哈密顿结构、可积性及稳定性 .....	47
3.2.1 孤子系统的哈密顿结构 .....	47
3.2.2 NLS 方程的可积性 .....	50
3.2.3 孤子解的稳定性 .....	52
3.3 绝热扰动方法 .....	53
3.4 线性扰动方法 .....	57
3.5 拉格朗日方法 .....	59
3.6 扰动逆散射方法 .....	63
参考文献 .....	67
<b>第四章 光孤子间的相互作用 .....</b>	<b>69</b>
4.1 双孤子相互作用的逆散射分析法 .....	70
4.2 双孤子相互作用的准粒子分析方法 .....	75
4.3 孤子相互作用的抑制 .....	81
4.4 多孤子相互作用 .....	87
4.5 波分复用系统中孤子间的相互作用 .....	88
4.5.1 初始交叠效应 .....	89
4.5.2 集总放大系统的孤子碰撞效应 .....	92
4.6 偏振复用系统中的孤子相互作用 .....	96
4.6.1 常双折射效应 .....	97
4.6.2 随机双折射效应 .....	99
4.6.3 偏振复用光纤孤子通信系统 .....	100
参考文献 .....	102
<b>第五章 光孤子源 .....</b>	<b>104</b>
5.1 增益开关半导体激光器 .....	105
5.1.1 张弛振荡效应 .....	106
5.1.2 增益开关原理 .....	107
5.2 增益开关 DFB 半导体激光器的谱窗技术 .....	109

5.2.1 F-P 光学干涉滤波器	110
5.2.2 变换限制脉冲的产生	111
5.3 被动锁模光纤环形孤子激光器	113
5.3.1 被动锁模光纤环形孤子激光器的结构	114
5.3.2 理论分析及参数特性	115
5.4 主动锁模光纤环形孤子激光器	119
5.5 主被动锁模光纤环形孤子激光器	122
参考文献	125
<b>第六章 光孤子放大器</b>	<b>128</b>
6.1 掺铒光纤的光谱特性	128
6.2 掺铒光纤放大器的理论模型与传输放大方程	130
6.3 掺铒光纤放大器的增益与饱和特性	132
6.4 掺铒光纤放大器的噪声系数	134
6.5 掺铒光纤放大器特性的近似分析	138
6.6 分布式掺铒光纤放大器的传输放大特性	140
参考文献	143
<b>第七章 光纤孤子通信系统的传输方案</b>	<b>145</b>
7.1 光孤子的传输状态	145
7.2 光纤孤子通信系统的传输方程	147
7.3 平均孤子传输方案	151
7.3.1 平均孤子的基本思想与加重因子	151
7.3.2 平均孤子传输系统的分析方法——李变换	152
7.3.3 平均孤子传输系统的数值分析	156
7.4 动态孤子传输方案	158
7.4.1 普通单模光纤系统中的孤子传输	158
7.4.2 低色散超高速系统中孤子传输	160
7.5 绝热孤子传输方案	161
参考文献	164
<b>第八章 光纤孤子通信系统中通信容量的限制因素</b>	<b>166</b>
8.1 放大器自发辐射噪声与 Gordon - Haus 限制	166
8.1.1 Gordon - Haus 限制	166

8.1.2 长距离光纤孤子通信系统中的参数设计考虑 .....	170
8.2 光源的影响 .....	174
8.2.1 初始波形失配 .....	175
8.2.2 频率啁啾 .....	178
8.2.3 光源噪声 .....	180
8.3 高阶色散与非线性色散 .....	183
8.4 非线性损耗——Raman 自频移 .....	187
8.5 参量随机变化的影响 .....	190
8.5.1 增益随机变化对光纤孤子通信系统的影响 .....	190
8.5.2 光纤随机色散对孤子系统通信容量的影响 .....	192
参考文献 .....	195
<b>第九章 光纤孤子通信系统的频域控制 .....</b>	<b>198</b>
9.1 导频滤波器与频域控制孤子系统的传输演化方程 .....	198
9.2 固定中心频率导频滤波控制系统的孤子定时抖动 .....	201
9.3 滑频滤波控制孤子传输系统的稳定性与时间抖动 .....	204
参考文献 .....	209
<b>第十章 光纤孤子通信系统的时域控制 .....</b>	<b>211</b>
10.1 幅度调制器与时域控制孤子系统的传输演化方程 .....	211
10.2 同步幅度调制控制孤子传输系统中的孤子定时 抖动 .....	214
10.3 同步幅度调制控制孤子传输系统中的孤子相互 作用 .....	218
10.4 同步相位调制控制孤子传输系统中的孤子传输 方程与时间抖动 .....	222
参考文献 .....	225
<b>第十一章 光纤孤子通信系统的非线性增益控制 .....</b>	<b>227</b>
11.1 非线性偏振旋转控制 .....	228
11.2 NPR 控制光纤孤子系统的传输方程 .....	230
11.3 光纤非线性环境控制 .....	232
11.4 NLM 控制光纤孤子系统的传输方程 .....	234

11.5 非线性增益控制光纤孤子系统的稳定性分析 .....	236
参考文献 .....	239
<b>第十二章 光纤孤子通信系统的色散补偿与相位共轭控制</b> ...	<b>240</b>
12.1 色散补偿控制方案 .....	240
12.2 终端正色散补偿控制 .....	241
12.3 周期性分布式色散补偿控制 .....	244
12.4 光纤孤子通信系统的相位共轭控制 .....	246
12.5 周期性相位共轭控制光纤孤子通信系统的 定时抖动 .....	249
参考文献 .....	250
<b>第十三章 光纤孤子传输系统实验</b> .....	<b>253</b>
13.1 长距离无控制光孤子传输系统构成与实验结果 .....	253
13.2 在线频域控制光孤子传输系统构成与实验结果 .....	258
13.3 在线时域控制光孤子传输系统构成与实验结果 .....	261
13.4 色散补偿控制光孤子传输系统 .....	265
参考文献 .....	269
<b>第十四章 结束语</b> .....	<b>273</b>
14.1 总结 .....	273
14.2 进一步研究的问题 .....	276

# Contents

<b>Chapter 1 Basic concepts of optical fiber soliton</b> .....	1
1.1 Solitons in optical fiber .....	1
1.2 Fiber linear properties .....	2
1.2.1 Fiber loss .....	2
1.2.2 Fiber dispersion .....	2
1.2.3 Modal birefringence .....	5
1.3 Fiber nonlinear properties .....	5
1.4 Envelope equation of light wave in fiber .....	7
1.5 Solution of nonlinear Schrodinger (NLS) equation and its properties .....	10
1.6 Technical parameters for soliton transmission system .....	13
1.7 Configuration of optical soliton transmission system .....	15
References .....	16
<b>Chapter 2 Inverse scattering analysis of optical soliton   propagation equation</b> .....	18
2.1 Basic thinking of inverse scattering method .....	18
2.2 Lax theory and AKNS scheme .....	20
2.3 Direct scattering problem .....	23
2.3.1 Solution of two-component scattering system and properties of scattering data .....	24
2.3.2 Solution of two-component system and determination of scattering data .....	26
2.4 Z-evolution of scattering data .....	28
2.5 Inverse scattering transform .....	30



2.5.1	Marchenko inverse scattering equation .....	30
2.5.2	Zakharov-Shabat inverse scattering equation .....	33
2.6	Construction of soliton solutions .....	35
2.6.1	Reflectionless potentials and N-solitons solution .....	36
2.6.2	Examples for construction of soliton solution .....	37
	References .....	42
<b>Chapter 3 Perturbation theory of optical soliton propagation</b>		
	<b>equation .....</b>	<b>44</b>
3.1	Motion integral and conserved quantities .....	45
3.2	Hamiltonian structure, integrability and stability of soliton system .....	47
3.2.1	Hamiltonian structure of soliton system .....	47
3.2.2	Integrability of NLS equation .....	50
3.2.3	Stability of soliton solution .....	52
3.3	Adiabatic perturbation method .....	53
3.4	Linear perturbation method .....	57
3.5	Lagrangian method .....	59
3.6	Perturbed inverse scattering method .....	63
	References .....	67
<b>Chapter 4 Interaction between solitons .....</b>		
<b>69</b>		
4.1	Inverse scattering method for soliton interaction .....	70
4.2	Quasi-particle method for interaction of two-soliton system .....	75
4.3	Suppression of soliton interactions .....	81
4.4	Multi-solitons interactions .....	87
4.5	Interactions of solitons in wavelength division multiplexing system .....	88
4.5.1	Initial overlap effect .....	89
4.5.2	Soliton collisions effect over lumped amplification system .....	92
4.6	Interactions of solitons in polarization division multiplexing system .....	96