

非均匀光学传输系统中自相似脉冲 与畸形脉冲操控的研究

戴朝卿 王悦悦 著



科学出版社

2015 年度浙江省科协“育才工程”资助项目

非均匀光学传输系统中自相似脉冲 与畸形脉冲操控的研究

戴朝卿 王悦悦 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以非均匀光纤中的各种变系数非线性薛定谔方程为模型,利用解析和数值模拟两种互补方法研究了空间衍射、时空耦合、高阶色散和高阶非线性效应对自相似脉冲的振幅、相位、啁啾因子及光波宽度等传输特性的影响,分析了畸形波的湮灭消失、维持、重现、快速激发等操控问题,着重讨论了多自相似脉冲和畸形脉冲的产生及其相互作用问题。对规避和利用畸形脉冲提出了可行性方案,为研究实际非均匀光纤系统中光脉冲的参量调控和动力学控制提供了一定的理论依据,对物质波孤子和等离子体中的孤波等其他物理领域中的动力学研究具有潜在的应用价值,并为高等院校和科研机构的非线性光学、数学物理、凝聚态物理等专业的科研工作者和研究生提供了重要的富有启发性的参考。

本书可作为高等院校和科研机构的光学、数学、物理等专业的研究生和高年级本科生学习非线性科学的教材,也为从事光学、理论物理、数学物理和工程等方面研究的科技工作者提供了一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非均匀光学传输系统中自相似脉冲与畸形脉冲操控的研究/戴朝卿,王悦悦著. —北京:科学出版社,2015.12

ISBN 978-7-03-046961-8

I. ①非… II. ①戴…②王… III. ①通信光学-传输-脉冲-研究 IV. ①O438

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 313746 号

责任编辑:钱 俊 裴 威 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 1 月第一次印刷 印张:8 1/2

字数:171 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自 20 世纪 60 年代激光出现后,高功率超短光脉冲的产生、传输以及与物质之间的相互作用就成为光学领域的重要研究课题。脉冲宽度变得越来越短,激光脉冲的峰值功率变得越来越高。如此短的脉冲宽度不仅在超快物理与化学过程的研究应用等领域有着不可替代的作用,在光致合成、半导体物理、生物学中病变早期诊断、外科医疗和超小型卫星的制造上均显示出独特的优势。在光学领域,超短光脉冲被广泛应用于超高容量的光信息通信及光信息存储、处理等方面。因此,高功率超短光脉冲的研究,不仅在各类超快现象及其规律的深入理解和认识方面有着重要的科学价值,而且在社会实践中也有着广阔的应用前景。

自相似脉冲和畸形脉冲的特性研究是近年来非线性光学研究领域中的热点课题,在光纤通信系统中高功率脉冲的压缩、高能量和高质量脉冲的获取、非线性波导阵列的能量聚集器等方面具有非常重要的应用价值。本书以非均匀光纤和波导中的各种变系数非线性薛定谔方程为模型,利用解析和数值模拟两种互补方法研究了空间衍射、时空耦合、高阶色散和高阶非线性效应对自相似脉冲的振幅、相位、啁啾因子及光波宽度等传输特性的影响,分析了畸形波的湮没、维持、重现、快速激发等操控问题。着重讨论了多自相似脉冲和畸形脉冲的产生及其相互作用问题,对规避和利用畸形脉冲提出了可行性方案,为研究实际非均匀光纤和波导系统中光脉冲的参量调控和动力学控制提供理论依据,并对物质波孤子和等离子体中的孤波等其他物理领域动力学研究具有潜在的应用价值。

全书共 8 章。第 1 章简要介绍了光孤子、自相似孤子和光学畸形波的研究进展。第 2 章介绍了光孤子相关的一些基本概念,如光孤子的分类、包络孤子、色散效应和衍射效应、非线性效应以及脉冲自变陡和孤子自频移现象等。第 3 章给出了本书中用到的理论研究方法,如基于 AKNS 系统的达布变换法、相似约化方法以及分裂步长快速傅里叶变换算法等。第 4~6 章分别介绍了 $1+1$ 维时间、空间孤子型自相似脉冲, $2+1$ 维空间自相似孤子和受调制空间光束以及 $3+1$ 维时空自相似脉冲的操控研究。第 7 章和第 8 章分别介绍了 $1+1$ 维皮秒和飞秒畸形波以及 $2+1$ 维库兹涅佐夫-马孤子和 $3+1$ 维畸形波的参量控制和操控问题。

作者的研究工作得到了张解放教授、朱士群教授的指导,在此特别致谢!

本书的出版得到了国家自然科学基金(项目编号:11375007 和 11404289)、浙江省科协“育才工程”以及浙江农林大学“青年拔尖人才”培育计划的资助。

感谢李录教授、钟卫平教授、郑春龙教授、张盛教授、刘文军博士、秦振云博士、

吕兴博士、徐四六博士、来炯静博士及其他学术同行们与我们的学术研讨、交流。

由于作者水平有限,本书不妥之处在所难免,敬请各位同行和读者给予批评和指正,同时欢迎交流与本书相关的学术问题,电子邮箱:dcq424@126.com。

作 者

2015年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光孤子的研究进展	1
1.2 自相似孤子的研究进展	4
1.3 光学畸形波的研究进展	7
第 2 章 光孤子相关的一些基本概念	10
2.1 光孤子的分类	10
2.1.1 时间光孤子	10
2.1.2 空间光孤子	11
2.1.3 时空光孤子	12
2.2 包络孤子	13
2.3 色散效应	14
2.4 非线性效应	16
2.4.1 克尔非线性效应	16
2.4.2 饱和非线性效应	18
2.4.3 热光非线性效应	18
2.4.4 重取向非线性效应	18
2.4.5 光折变非线性效应	19
2.5 脉冲自变陡和孤子自频移现象	19
2.5.1 脉冲自变陡现象	19
2.5.2 孤子自频移现象	19
第 3 章 理论研究方法	21
3.1 基于 AKNS 系统的达布变换法	21
3.2 相似约化方法	24
3.2.1 基于定态非线性薛定谔方程的约化方法	24
3.2.2 基于标准方程的约化方法	25
3.3 分裂步长快速傅里叶变换算法	26
3.4 稳定性分析	28
3.4.1 本征值方法	29
3.4.2 直接数值模拟	29

3.5 小结	30
第4章 1+1 维自相似脉冲的操控研究	31
4.1 1+1 维时间自相似孤子	32
4.1.1 理论模型及时间自相似孤子解	32
4.1.2 光纤中自相似脉冲传输特性及操控	37
4.2 1+1 维空间自相似孤子	40
4.2.1 理论模型及空间自相似孤子解	41
4.2.2 光学波导中自相似脉冲传输特性及操控	43
4.3 小结	46
第5章 2+1 维空间自相似子的操控研究	47
5.1 2+1 维空间自相似孤子	47
5.1.1 理论模型及空间自相似孤子解	47
5.1.2 空间自相似脉冲传输特性及操控	50
5.2 2+1 维非均匀三次-五次非线性介质中的局域孤子	55
5.2.1 理论模型及局域孤子解	55
5.2.2 局域孤子动力学及稳定性分析	56
5.3 小结	60
第6章 3+1 维时空自相似脉冲的操控研究	61
6.1 时空自相似孤子	61
6.1.1 时空自相似孤子解	61
6.1.2 时空自相似脉冲传输特性及操控	65
6.2 三次-五次非线性介质中的时空自相似孤子	69
6.2.1 时空自相似孤子解	69
6.2.2 时空自相似脉冲传输特性及操控	71
6.3 小结	74
第7章 1+1 维畸形波的操控研究	75
7.1 1+1 维皮秒畸形波	75
7.1.1 理论模型及畸形波解	75
7.1.2 皮秒畸形波传输特性及操控	78
7.2 1+1 维飞秒畸形波	83
7.2.1 理论模型及畸形波解	83
7.2.2 飞秒畸形波操控及隧穿效应	85
7.3 小结	91
第8章 高维畸形波的操控研究	92
8.1 2+1 维库兹涅佐夫-马孤子	92

8.1.1 理论模型及库兹涅佐夫-马孤子解	92
8.1.2 叠加的库兹涅佐夫-马孤子传输特性及操控	96
8.2 3+1 维畸形波	101
8.2.1 理论模型及畸形波解	101
8.2.2 高维畸形波传输特性及操控	103
8.3 小结	112
参考文献	113
结束语	126

第 1 章 绪 论

1.1 光孤子的研究进展

孤子(soliton,也称孤立子)是一种能保持其形状和特性不变而在时空中传播的特殊孤波(solitary wave),是非线性效应和色散作用巧妙平衡的结果,是非线性系统的特殊相干(或拟序)结构,具有相互作用后保持其波形和速度不变的特点。孤子在相互碰撞和长时间传播中能保持稳定,它是具有明显粒子性的一种波动,是一种新型的物质存在形态。因此,孤子被认为是具有波-粒双重性的最好客体或物质形态。

在物理学中,孤子被认为具有以下特点:①能量比较集中于狭小的区域;②两个孤子相互作用时出现弹性散射现象,即波形和波速能恢复到最初。这就是说,从物理本质上讲,孤子是由非线性场所激发的、能量不弥散的、形态上稳定的准粒子。并且,物理上也不区分“孤子”和“孤波”两个名词。

孤子这种物质形态广泛存在于自然界,如在木星的红斑旋涡、用隧道电子显微镜成像方法发现的晶体中的电荷密度波、在小尺度湍流环境中长期存在的有序大尺度组织、神经元轴突上传递的冲动电信号、大气中的台风、激光在介质中的自聚焦、晶体中的位错、超导体中的磁通量等自然现象中都存在这种物质形态。此外,社会经济系统中也广泛存在着由非线性相互作用机制产生的孤子。这种孤子无论其现象还是本质都可能启发我们更好地理解某些社会经济现象,如社会财富、社会权利等的稳定集中,某些社会意识等的长时间稳定传播。

自 1834 年罗素(Russell)^[1]首次在浅水波中观察到孤子现象以来,孤子的概念和应用已经拓展到物理学的各个领域并延伸到生物、化学、通信甚至社会学等领域。但是,最能体现孤子多样性的领域是光学系统。根据光波传播过程中与非线性相平衡的是色散、衍射还是同时包括色散、衍射,可以将光孤子大体上分为时间光孤子、空间光孤子和时空光孤子(光弹)^[2,3]。下面主要介绍时间光孤子的研究进展。

激光器的发展为超短光脉冲的出现提供了条件,若这些超短光脉冲能维持其形状稳定传播,则它们被称为光孤子。自 20 世纪 70 年代以来,时间光孤子在通信领域的理论与实验研究方面都有飞速的发展。人们对超短的皮秒、飞秒量级孤子脉冲在光纤中的传输有了深入的研究。1973 年,Hasegawa 和 Tappert^[4,5]首先提出了“光孤子”的概念,并从理论上证明了任何无损光纤中的光脉冲在传输过程中

都能形变为孤子后稳定传输。光纤中的孤子是光纤色散与非线性相互作用的产物,服从非线性薛定谔方程(NLSE),受光纤的色散效应和非线性自相位调制效应的支配。但由于当时没有合适的光纤及相应的孤子源,这一理论长期没有被证实。直到1980年,美国贝尔(Bell)实验室的 Mollenauer 等^[6]首先从实验中观测到了光纤中的亮孤子,Hasegawa 等的论断才得到实验的证实。时隔7年,Emplit 等^[7]运用振幅和相位滤波技术观察到了暗孤子。随后 Krokell 等^[8,9]分别在实验中观察到了黑孤子和灰孤子。由于光孤子传输时不改变其波形、速度,于是人们提出用光纤中的孤子作为传递信息的载体的新的光纤通信方案,即光纤孤子通信或简称孤子通信。1981年初,Hasegawa 和 Kodama^[10]发表了单模光纤中用光孤子传输信号的著名文章,随后又提出利用光放大补偿损耗,构成全光的孤子通信系统。从此拉开了时间光孤子通信理论与实验研究的序幕。

在理论研究方面,1973年 Hasegawa 和 Tappert^[4,5]提出了“光孤子”概念后,人们建立了许多研究皮秒时间光孤子传输的理论方法,如逆散射方法^[11]、广田(Hirota)双线性方法^[12]、达布(Darboux)变换方法^[13]、变分法^[14]等,获得了多种孤子解来描述皮秒时间光孤子传输。随着超短光脉冲技术的飞速发展,飞秒量级的光脉冲的传输特性已日益成为研究的热点课题之一。关于飞秒光脉冲在光纤中的传输研究,三阶色散、自陡峭及自频移等效应已不可忽略。早在1987年 Kodama 等^[15]就已利用多重尺度法导出了飞秒光脉冲在光纤中的传输演化方程——高阶非线性薛定谔方程(HNLSE)。之后,人们建立了研究飞秒光孤子的各种解析及数值方法,如逆散射方法^[16]、直接代数法^[17]、广田直接法^[18]、Bäcklund 变换法^[19]、守恒定律法^[20]、达布变换法^[21]等。随着人们对长距离、大容量光通信的迫切要求,更强更短的孤子脉冲在光纤中的传输演化情况也越来越受到人们的关注,描述孤子传输的高阶模型——四阶色散三次-五次方非线性薛定谔方程应运而生,人们对其进行了解析和数值模拟等方面^[22-25]的研究。

自从 Bogatyrev 等^[26]在实验上实现了光纤中双曲型衰减的群速度色散(GVD)控制,并进一步在孤子通信中实现了色散管理光孤子和孤子脉冲串^[27]后,对光孤子管理与控制的研究就成为一个新的而且重要的课题,理论上对色散管理光孤子的研究也日益成为热点课题。人们对色散管理光孤子的模型——变系数非线性薛定谔方程从各种不同的角度进行了研究,如色散管理和振幅管理^[28]、达布变换^[29]和 Lax 对^[30]等。文献[31]研究了色散管理光孤子的物理与数学性质。我国山西大学的周国生教授研究组利用达布变换和数值方法研究了皮秒^[32,33]、飞秒^[29]色散管理光孤子的控制问题。对高阶变系数非线性薛定谔方程的研究也引起了人们的充分注意^[34,35]。为了更加全面地理解超短脉冲在光纤中的传输特性,许志勇等^[36]讨论了非零边界条件下高阶非线性薛定谔方程的解的调制不稳定性 and 连续波背景下的孤子传播。如果进一步考虑光纤介质所引起的其他效应,如损

耗、群速度色散、偏振模色散以及其他非线性相互作用,描述光脉冲传播的方程将变得更加复杂。此外,随着系统传输速率的提高,脉冲频谱进一步展宽,系统更易受光放大器自发辐射噪声的影响,由此导致的 Gordon-Haus 效应(幅度抖动和定时抖动)更加严重。这些都导致非线性薛定谔方程被扩展为其他各类高阶变系数非线性薛定谔方程^[37,38]。

在实验与应用方面,1980 年贝尔实验室的 Mollenauer 等用实验方法在光纤中观察到了孤子脉冲^[6],如图 1-1 所示。此后,光孤子应用领域取得了巨大进展。1981 年,Hasegawa 和 Kodama^[10]提出将光纤中的孤子作为信息载体用于通信,构建一种新的光纤通信方案,称为光孤子通信。1983 年,Hasegawa 提出利用光纤本身的拉曼(Raman)增益补偿的思想。1988 年,Mollenauer 和 Smish 根据这一思想,首次成功进行了全光长距离(4000km 以上)孤子传输实验^[39]。这一实验成为光孤子通信的里程碑。

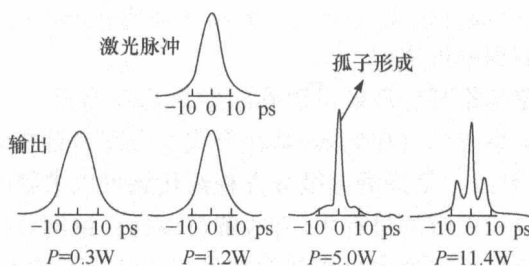


图 1-1 Mollenauer 等首次实验观察的孤子形成^[6]

自 20 世纪 90 年代以来,日本、美国、英国等相继出现了以半导体激光器(LD)作光源与泵浦源的实验系统,用掺铒光纤放大代替拉曼放大,拉开了光孤子走向实用化的序幕,许多发达国家已开始建立自己的光孤子通信网。1991 年,美国电报电话公司(AT&T)和贝尔实验室实现了 $3 \times 27\text{km}$ 环路上以伪随机码 2.5Gbit/s 做了 14000km 的无误码的传输^[40],并做了 $2 \times 2\text{Gbit/s}$ 的波分复用系统的 9000km 的实验^[41]。日本电报电话公司(NTT)则以直路用 20Gbit/s 的脉冲列传输了 350km,用 10Gbit/s 的脉冲传输了 1000km,还实现了 100 万千米超长距离传输,并突破了 Gordon-Haus 效应对孤子传输距离的限制^[42]。同时,Nakazawa 等采用同步幅度调制与频阈滤波相结合的系统组成方案,采用 10Gbit/s 的脉冲,实现了 10^6 的孤子稳定的传输。

色散管理目前被认为是集各种技术于一体的优化方案,已受到国际上的广泛关注。利用这种优化方案,在 2003 年 11 月日本电气股份有限公司(NEC)的研究人员报道了每信道 42.7Gbit/s 的 64 路波分复用,总量达 2.56Tbit/s 传输距离为 6000km 的色散管理通信实验^[43]。在 2004 年 2 月,美国光纤通信会议(OFC)上,

除日本外,法国报道了实现 $32 \times 43 \text{ Gbit/s}$ 传输 $27 \times 100 \text{ km}$ 的实验,美国也做出了 40 Gbit/s 的实验系统。2011 年日本研发的一种七芯光纤传输速度高达 109 Tbit/s , 传输距离达 16.8 km 。2012 年日本电气股份有限公司的研究人员报道了在单模光纤上所传输的数据速度达到了 21.7 Tbit/s , 这种新的传输技术的好处是原有的光纤网络基础设施不需要任何变化就可实现光孤子传输。这些研究表明,对光孤子通信的研究已日趋完善并逐渐向商用化方向发展。

1.2 自相似孤子的研究进展

自相似(self-similar)是一类非常普遍的自然现象,如原子核爆炸中的热波传播、弹性固体中的断裂形成以及湍流中标度性质等^[44]。它在复杂非线性系统中的应用可以给出关于内在动态的许多信息。在初始条件的影响缓慢减弱且系统仍远离极限状态时,开始出现自相似特性^[44]。利用对称约化的方法可以得到很多描述物理问题的偏微分方程的近似解^[45]。

空间自相似现象是指某种现象可以在时空域再现自己。一般来说,数学上通过对称约化可以寻求系统的自相似解,其在形式上表现为自相似变量的连续函数。利用自相似性,人们可以把复杂的偏微分方程约化到可以求解的常微分方程,进而简化研究。在寻求自相似解的过程中,有些解可以通过量纲分析得到,有些解却不能。这些不能由量纲分析得到的自相似解在形式上表现为系统的中间渐近,它们的形成与系统的初始条件无关。显然,这种自相似解更符合描述大部分物理系统,也更容易吸引人们的研究兴趣。

一直以来,自相似特性在物理学及其他学科领域,如流体动力学、凝聚态物理、等离子物理、量子场论和生物物理学等领域,也有着广泛的研究和应用。最早从事光学中自相似现象研究的是 Sunghyuck 等^[46],他们在 Hill 光栅的生长中取得进展,而后 Menyuk 等^[47]在受激拉曼(Raman)散射(SRS)中取得进展,Tanya 等^[48]在自写波导中也发现了自相似演化,Marin 等^[49]在光波塌陷中也发现了光波的自相似和分形特性。

虽然早在 1981 年,Ablowitz 和 Segur^[50]就指出自相似解和孤子解都存在于非线性薛定谔方程中,但自相似性在非线性光纤光学中的研究近年才开始引起关注。光纤中的自相似脉冲,早期主要指的是在光纤中的群速度色散、自相位调制(SPM)和增益效应的共同作用下,能够产生能量被显著放大、具有很强线性啁啾,而且其时域和频域特征相似于抛物线形状的渐近脉冲(因此被称为抛物型脉冲)。与一般光孤子相比,自相似脉冲有三个显著特点:①自相似特性只由入射脉冲的能量和光纤参数决定,而与初始脉冲的形状无关,入射脉冲能量都可以全部转化在输出的自相似脉冲之中;②自相似脉冲在高功率传播时,其形状不改变,具有抵御光

波分裂的能力;③自相似脉冲具有严格的线性啁啾,易于进行高效的脉冲压缩,获得高功率、无基座的近似变换极限的飞秒量级光脉冲。

在国外,很多学者对光纤中的自相似脉冲进行了理论和实验的研究。Anderson 等^[51]给出了关于抛物线形短脉冲在具有正群速度色散和强的非线性光纤中的自相似传输的理论描述。Kruglov 等也对非线性光纤中自相似脉冲进行研究并取得了系列成果^[52-55]。Fermann 和 Kruglov 等^[52]利用频分光栅(FROG)脉冲特征化技术首次在 3.6m 长并有 30dB 增益的掺镱光学放大器中观察到抛物形光脉冲的产生及其自相似演化,如图 1-2(a)所示。他们指出,过量非线性和正常色散相互作用从而形成抛物形自相似脉冲,这种形成只与初始脉冲能量有关,不依赖于初始脉冲形状和宽度,且在脉冲宽度范围内具有严格线性啁啾。在此实验中他们还验证了 Anderson 等有关抛物自相似子在正常色散光纤传播的理论预言^[51],如图 1-2(b)所示。

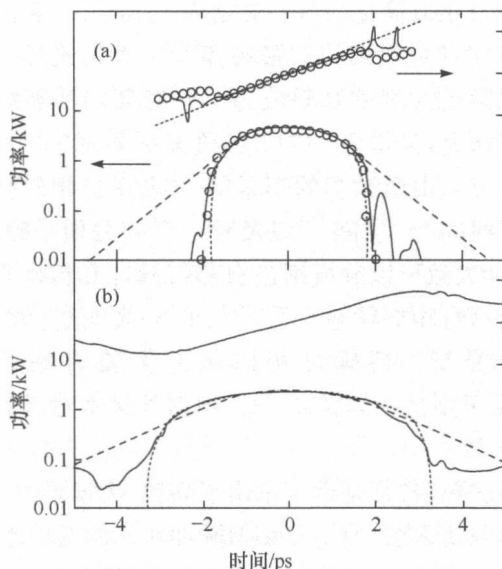


图 1-2 抛物形光脉冲的功率和啁啾^[52]

(a) 3.6m 长并有 30dB 增益的掺镱光学放大器中实验结果(实线)与基于非线性薛定谔方程的数值模拟(圈线)、渐近抛物脉冲(短虚线)及 sech^2 脉冲(长虚线)的对比; (b) 在 2m 的单模光纤传播后的实验结果(实线)与渐近抛物脉冲(短虚线)及 sech^2 脉冲(长虚线)的对比

Billet 等^[56]也通过实验验证了 Kruglov 等的理论分析结论。Kibler 等^[57]产生了梳状色散渐减光纤中抛物线形短脉冲。Finot 等^[58]利用 Raman 光纤放大器代替普通的掺稀土元素光纤放大器来进行自相似脉冲的研究。Chang 等^[59]研究了受激 Raman 散射和增益带宽决定的自相似脉冲放大。Ilday^[60]和 Nielsen 等^[61]对

自相似脉冲在光纤谐振腔中产生的可行性作了理论和实验上的研究。Finot 等^[62]用全光器件对自相似脉冲在光纤通信系统中的应用进行了数值模拟和实验研究。Ponomarenko 等研究了非线性光学介质^[63]和非线性波导中^[64]的自相似孤子脉冲,还讨论了非线性光学放大器中啁啾和非啁啾相似子之间的相互作用^[65]。Dudley 等^[66]综述了超快非线性光学中的自相似现象,Finot 等^[67]也对抛物线形自相似脉冲的产生和应用方面进行了综述。最近,Hirooka 等^[68]利用皮秒光脉冲阵列产生了亮、暗抛物线形自相似脉冲。

同国外学者的研究相比,国内学者对自相似脉冲的研究相对较少。华中科技大学的陈世华等^[69]在 2005 年从解析和数值模拟两个方面研究了光纤自相似脉冲的演化特性,并在他的博士论文^[70]里全面总结了自相似脉冲的研究情况。冯杰等给出了常系数金兹堡-朗道方程自相似脉冲演化的解析解^[71]和色散渐减光纤中金兹堡-朗道方程的自相似脉冲演化的解析解^[72]。涂成厚等^[73]研究了正常色散光纤放大器中超短脉冲的自相似演化条件。雷霆等^[74]给出了高能量无分裂超短脉冲自相似传输的理论研究和数值模拟。张巧芬^[75,76]也对光纤中自相似脉冲传输特性进行了研究。浙江师范大学的张解放等^[77,78]对高功率超短自相似激光的产生及其相互作用进行了研究,吴雷等^[79]对非线性光学系统中四种类型的自相似子的动力学特性进行了研究。山西大学的李录等^[80]也在自相似脉冲的研究中取得了进展。我们也研究了时间^[81]、空间^[82]以及时空^[83]自相似子的动力学特性。

至此,自相似脉冲大致可以分成渐进自相似脉冲和精确自相似脉冲两种。渐进自相似脉冲有抛物型自相似脉冲^[51,52,57-59]、厄米-高斯型自相似脉冲^[84]和混合型自相似脉冲^[84]三种类型。精确自相似脉冲主要有精确孤子型自相似脉冲^[53-55,63-65,79-82]和准孤子型自相似脉冲^[85]。国内外学者对精确孤子型多自相似脉冲的操控问题研究较少。

光纤技术的日臻成熟,特别是近年来由于高速、大容量光通信的迅猛发展而对高功率的超短脉冲的急切需求,使得自相似脉冲技术的发展逐步完善,其应用领域得到不断扩大,目前已在自相似脉冲光纤激光器、获得高功率的超短脉冲和光纤通信系统中自相似脉冲序列的产生等方面获得应用^[86]。同时,人们也开始关注光纤放大器和色散渐减光纤中自相似脉冲的形成。孤子和相似子光纤激光也被提出,并且具有抗微扰、降低噪声的优点^[87]。

由于自相似脉冲在光纤通信、非线性光学、超快光学和瞬态光学等领域中具有非常重要的应用前景,所以,近年来引起了国外同行的广泛关注。到目前为止,对自相似光脉冲的理论分析、数值模拟和实验研究,都取得了许多有价值的成果。研究发现,如果采用色散渐减光纤的被动绝热放大对自相似激光脉冲进行放大和压缩同步进行,可以产生光纤通信系统中需要的高功率、高能量和高质量稳定的自相

似超短脉冲序列。例如,一般的孤子光纤激光器产生的脉冲平均功率在 150W 左右(比被动锁模固态激光器的脉冲功率高约一个数量级),脉冲重复频率 10 万 Hz 左右。如果增加脉冲功率,孤子会受到非线性光波破裂而导致输出脉冲严重失真,效率下降。但是,自相似子光纤激光器不会出现这些问题,它可以产生约 1.7MW 的平均功率,重复频率约 75MHz 的超短脉冲(借助后期脉冲压缩),这明显比孤子激光器高出两到三个数量级^[70]。

因此,高功率超短自相似脉冲的研究在超短脉冲产生和高速光纤通信方面有潜在的重要应用。

1.3 光学畸形波的研究进展

畸形波(freak wave, rogue wave, giant wave)首先是在海洋中发现的一种灾害性自然现象,对海上航行的船只和海上结构物破坏性极大^[88]。畸形波的波陡很大,有很大的波峰,平均高度是周围波浪的两三倍甚至许多倍以上。据不完全统计,世界上至少有 200 艘超级轮船在航行中遭遇畸形波,甚至因此失踪。特别是 1995 年袭击北海的“新年波”(“new year” freak wave),是一次最为典型、记录最完整的畸形波,波高达 25.6m,导致北海石油平台严重损坏,从而证实畸形波的存在。关于畸形波的理论研究始于 1965 年,Draper^[89]首次提出畸形波的概念。由于畸形波的发生具有不可预测性,而且海上观测资料不完善,所以对畸形波采用数值模拟方法或实验室物理模拟方法是较为可行的理论研究方法。目前,关于海洋中畸形波的研究已取得了较好的进展^[90-96]。例如,杨冠声等^[93]在分析国外研究成果的基础上介绍了畸形波的几个基本问题。芮光六等^[94]介绍了畸形波的实验室模拟。裴玉国^[95]在实验室水槽中研究了随机波浪在一定坡度地形上产生了畸形波,并指出这种情况下产生畸形波的概率比完全平地地形下产生畸形波的概率要高。胡金鹏等^[96]研究了基于 Benjamin-Feir 不稳定性的畸形波模拟。不考虑波前相互作用的情况下,调制不稳定(由于非线性和色散的相互作用使系统稳态受到调制的现象)或 Benjamin-Feir 不稳定性(又称边带不稳定性,指斯托克斯(Stokes)波对频率与载波的基频稍有差异的波产生的扰动是不稳定的)以及线性时空聚焦(色散和频率调制的空间分布共同作用)^[97]被认为是产生畸形波的两个主要机制。Akhmediev 等理论研究了多种描述畸形波动力学模型的有理数解^[98,99]和 Peregrine 孤子解^[100],被视为畸形波理论研究的重要原型。最近,Chabchoub 等在实验中观察到了畸形波^[101]和呼吸子^[102]并研究了它们的相关特性^[103]。

随着对畸形波研究的深入和扩展,畸形波的研究不再局限于海洋领域,畸形波的观念被引入到光学^[104-106]、玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)^[107,108]、等离子物理^[109,110]、

大气物理^[111]等不同领域。Bludov 等^[107]进一步提出了微观领域的物质畸形波概念,认为装载于抛物囚禁和光子晶格中的 BEC 均可能存在物质畸形波。闫振亚等^[108]通过自相似变换得到了 BEC 中高维畸形波的解析解。Moslem^[109]用数值分析方法研究了无碰撞电子-质子等离子体中的朗缪尔畸形波,认为无碰撞电子-质子等离子体中畸形波结构的产生主要依赖于电子和质子的密度和温度以及包络波的群速度。El-Awady^[110]研究了等离子体中非线性离子声波中存在的畸形波,并讨论了畸形波振幅与电子-质子温度比等参数的关系。Stenflo 和 Marklund^[111]提出了大气中存在畸形波的可能性。

在海洋中畸形波被认为是一种危害性的非线性波,而在光波中却可加以利用。目前,国外许多专家和研究机构致力于光畸形波的研究,并取得进展^[104-106,110-118]。Solli 等^[104]首先引入光畸形波的概念,利用波时转换技术基于超连续谱系统对光畸形波现象进行了实验观察和数值模拟,如图 1-3 所示。

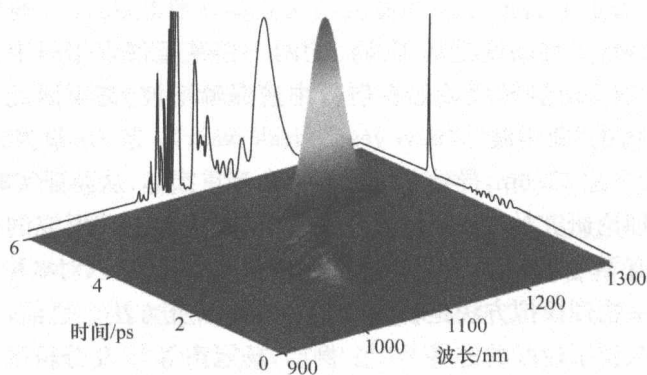


图 1-3 短时傅里叶变换获得的光畸形波的时间-波长图^[104]

Dudley 等^[105]研究了超连续谱系统中实现对光畸形波的控制和治理。Kibler 等^[112]利用随机数值模拟研究了零色散波长光子晶体光纤超连续谱中光畸形波的统计性质。Montina 等^[113]研究了非线性光腔中的非高斯统计和畸形波的形成。Bludov 等^[106]讨论了非线性波导阵列中将畸形波高效压缩光能的设想。尽管 Peregrine 最初在水动力学领域从数学理论上建立了 Peregrine 孤子,这种独特形态的非线性波直到 2010 年才由 Dudley 教授领导的实验小组首先在光学实验中成功实现模拟和观测^[114]。最近,光纤模型中的 Peregrine 孤子亦被发现^[115,116],其尖峰强度可以达到背景波强度的 9 倍,超短脉冲畸形波的概念在光学中得到拓展。Hammani 等^[115]在光纤实验中研究了 Peregrine 孤子的激发条件,证实了其存在性并明确地刻画了其二维局域性,实现了定义 Peregrine 孤子特性的明确特征参量的测量。此外,借助光栅分光计测量冲击波包络的光谱技术,Dudley 研究小组对 Pere-

grine 孤子的频域特性进行分析,发现存在特殊的三角频谱,进而可以对理论上光脉冲聚集畸形波进行预测,并可在实验中得到证实^[5,117]。最近,Hammani 等^[118]对光纤中实现光畸形波实验进行了综述。

相比于国外学者的研究工作,我国学者对畸形波的研究不多,且主要集中在理论研究方面。郭柏灵院士和中国矿业大学的刘青平等^[119]给出了自聚焦非线性薛定谔方程和 Hirota 方程的 N 阶畸形波解的解析表达式。宁波大学的贺劲松等^[120]也对畸形波动力学行为进行了系列研究。中国科学院的刘伍明课题组^[121]讨论了 BEC 中怪波的演化行为。对光畸形波的研究则更少。最近,我们研究了皮秒^[122]和飞秒^[123]畸形波的操控问题。贺劲松等^[124]讨论了掺铒光纤系统中的畸形波传输问题。但对于畸形波的操控问题国内外很少有学者进行研究。