



“十二五”国家重点出版规划项目

现代激光技术及应用丛书

激光导星技术

张凯 叶一东 王锋 鲁燕华 陈天江 向汝建 田飞 编著

The Technologies of Laser Guide Star



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

激光导星技术

张凯 叶一东 王锋 鲁燕华 陈天江 向汝建 田飞 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了激光导星的原理、技术和应用等方面的研究进展,全书共分为八章。第1章概要地介绍研究背景、大气光学及湍流的基础知识、激光导星的概念与原理;第2章、第3章分别介绍瑞利激光导星和钠激光导星的原理与技术;第4章、第5章重点介绍激光导星中涉及的关键技术,主要包括发射和接收技术、激光导星探测和波面恢复技术;第6章重点分析激光导星的非等晕性;第7章介绍多导星技术;第8章系统地分析导星激光器技术及最新研究进展。

本书可供从事大口径光学成像技术、激光技术、自适应光学技术研究的工程技术人员、高等院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光导星技术/张凯等编著. —北京:国防工业出版社, 2016. 11

(现代激光技术及应用)

ISBN 978-7-118-11188-0

I. ①激… II. ①张… III. ①激光应用—导星

IV. ①TN249 ②P151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 298951 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14¼ 字数 279 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委 员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委 员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于 1960 年诞生在美国,紧接着我国也于 1961 年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是 20 世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划并组织编写了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会。为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会。这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分人是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家。编辑委员会成员以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012 年 2 月 23 日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整,组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为“十二五”国家重点出

版规划项目和国家出版基金项目。丛书本身具有鲜明特色:①丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;②丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;③丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;④丛书作者均来自国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平,特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周炳琨

2015年3月

深空天文观测、空间目标监测、地空激光远距离传输等应用中,需采用大口径光学望远镜实现对空间目标的光学成像或采用大口径光学系统进行激光发射和远距离高性能传输。地基大口径望远镜对空间目标成像时,光束需通过全程大气传输,大气湍流效应将会引起大口径光学成像系统成像质量的严重退化,这是制约成像系统目标探测和成像能力的主要瓶颈。采用自适应光学系统对大气湍流引起的光学波面畸变进行实时校正是实现高分辨率光学观测和高质量激光传输的重要手段。

自适应光学系统需实时探测成像或激光传输路径上大气湍流引起的光学波面畸变,通过实时高速数据处理系统后,采用快速倾斜镜(FSM)和变形反射镜(DM)实时补偿动态变化的光学波面畸变,从而提升大口径光学系统的成像质量和激光远距离传输后光束的聚焦能力。自适应光学校正系统实现高精度波面校正的前提是具备能准确反映传输路径上光学畸变信息的导星光源(或信标源)。导星光源的基本要求是具有较小的空间尺寸、满足波面探测的光亮度,并与成像光束(或激光发射光束)方向一致(即满足等晕条件)。天文成像中,较亮的空间目标成像可采用目标自身发光作为导星光源,当成像目标光强不能满足导星探测要求时,可选取成像目标附近的满足等晕角要求的亮星作为导星源,但满足以上两种校正成像条件的自然星天空覆盖度非常低,在可见光到近红外波段,满足导星条件的自然星的天空覆盖度平均概率在0.1%左右。

采用激光导星是实现全天空覆盖成像校正的有效手段,激光导星技术是指采用发射望远镜主动发射一束激光,通过大气后向瑞利散射或距地面100km高度附近钠原子层共振后向散射作为导星光源,为自适应光学系统实时校正提供大气传输光学畸变信息。

近年来,激光导星技术在大型光学系统中的应用取得了快速的进展,目前,

全世界口径大于 3m 的近 40 座大型光学系统中大多采用自适应光学系统提高光学成像质量、改善激光传输特性。导星技术在提高自适应校正的空间覆盖率、提高望远镜的成像质量和适应能力等方面发挥了重要的作用。

本书由中国工程物理研究院应用电子学研究所张凯、叶一东、王锋、鲁燕华、陈天江、向汝建、田飞共同编著。其中,第 1 章由张凯、向汝建编写,第 2 章主要由叶一东编写,第 3 章主要由王锋编写,第 4 章主要由陈天江、田飞编写,第 5 章主要由向汝建、张凯编写,第 6 章主要由王锋编写,第 7 章主要由叶一东编写,第 8 章主要由鲁燕华编写。书稿的编写得到了中国电子科技集团第十一研究所周寿桓院士的精心指导,中国工程物理研究院应用电子学研究所相关技术人员给予了大力的帮助,在此表示衷心的感谢。

作者

2016 年 6 月

第1章 概论

1.1 研究背景	001
1.2 大气光学及大气湍流特性	002
1.3 大气传输对天文成像、激光传输的影响	007
1.4 自适应光学原理	009
1.5 激光导星原理	010
1.5.1 瑞利导星	011
1.5.2 钠导星	012
参考文献	013

第2章 瑞利激光导星

2.1 大气层和光散射	015
2.1.1 大气层高度分布和成分	015
2.1.2 大气对光的弹性散射	021
2.1.3 瑞利散射	023
2.2 瑞利激光导星系统的设计	027
2.3 瑞利激光导星的波长选择和回光强度	029
2.4 瑞利激光导星的试验和应用	032
参考文献	033

第3章 钠激光导星

3.1 散逸层钠原子特征	034
3.1.1 钠层的分布及组成	035
3.1.2 钠层丰度及高度的变化	037
3.1.3 钠原子的光谱特性	039
3.2 钠激光导星饱和特性	043
3.2.1 钠激光导星饱和原因	043

3.2.2 钠层的饱和辐射功率密度	044
3.2.3 导星激光与钠层的相互作用	047
3.3 钠激光导星亮度特性	049
3.3.1 钠激光导星亮度随导星激光发射参数的变化	049
3.3.2 钠激光导星系统对激光导星光源的要求	055
3.4 钠激光导星研究进展和应用	060
参考文献	062

第4章 激光导星的发射与接收

4.1 导星尺度	064
4.1.1 光斑扩展效应	064
4.1.2 光斑拉长效应	066
4.2 回光强度及信噪比	069
4.2.1 光学效率	069
4.2.2 背景噪声	071
4.3 脉冲导星的重复频率	073
4.4 导星信号探测	075
4.4.1 暗弱导星目标	075
4.4.2 导星信号传感器	076
4.4.3 距离选通技术	081
4.4.4 窄带滤波技术	087
4.5 发射与接收工作方式	092
4.5.1 共孔径发射与接收	092
4.5.2 分孔径发射与接收	098
4.6 激光导星在天文中的应用	100
4.6.1 星火望远镜	101
4.6.2 MMT 望远镜	103
4.6.3 凯克望远镜	105
4.6.4 双目望远镜	106
参考文献	108

第5章 激光导星探测和波面恢复

5.1 激光导星在自适应光学系统中的应用	110
5.1.1 波前传感器	111

5.1.2	波前校正器	113
5.1.3	闭环控制器	115
5.1.4	自适应光学系统的人造导星	116
5.2	基于 HS 波面探测器的导星波面探测及波面重构	117
5.2.1	HS 波前传感器波面重构方法	117
5.2.2	人造导星 HS - WFS 子孔径扩展光斑的波面处理	120
5.3	基于强度分布测量的波面恢复	127
5.3.1	曲率波前传感技术	128
5.3.2	基于相位反演的波前测量技术	131
5.3.3	解光强分布传输方程重构相位法	133
5.3.4	直接相位反演法	135
5.4	LGS 导星波面探测及波面重构新方法	136
5.4.1	自参干涉法	136
5.4.2	双棱镜阵列法	138
	参考文献	143

第 6 章 激光导星非等晕性

6.1	大气的等晕特性	146
6.2	激光导星等晕性物理分析	147
6.2.1	激光导星聚焦非等晕误差	148
6.2.2	激光导星尺度问题	152
6.2.3	激光导星角度偏离与非等晕误差	155
6.3	激光导星等晕性要求	158
6.3.1	激光导星参数与等晕性	158
6.3.2	角度非等晕与偏置	159
6.3.3	单导星的覆盖范围	161
	参考文献	162

第 7 章 多导星技术

7.1	多导星技术概述	164
7.2	湍流分层	165
7.2.1	大气的等晕性	165
7.2.2	均匀分层模型	167
7.2.3	非均匀分层模型	168

7.3	校正镜的单元数	170
7.4	多导星波前探测	170
7.5	大气层析自适应光学	172
7.5.1	大气层析的原理	172
7.5.2	大气层析三维波前重建	172
7.6	分层探测自适应光学	174
7.7	地表层自适应光学	175
7.8	多导星技术应用	176
	参考文献	177

第8章 导星激光器技术

8.1	瑞利导星激光器	179
8.1.1	腔内倍频绿光激光器	179
8.1.2	腔外倍频绿光激光器	181
8.2	钠导星激光器	183
8.2.1	染料钠导星激光器	183
8.2.2	全固体钠导星激光器	185
8.2.3	光纤钠导星激光器	194
8.2.4	其他钠导星激光器	196
	参考文献	198

1.1 研究背景

深空天文观测、空间目标监测、地空激光远距离传输等应用中,需采用大口径光学望远镜实现对空间目标的光学成像或采用大口径光学系统进行激光发射和远距离高性能传输。地基大口径望远镜对空间目标成像时,光束需通过全程大气传输,大气湍流效应将会引起大口径光学成像系统成像质量的严重退化,这是制约成像系统目标探测和成像能力的主要瓶颈。采用自适应光学系统对大气湍流引起的光学波面畸变进行实时校正是实现高分辨率光学观测和高质量激光传输的重要手段。

自适应光学系统实时探测成像路径上大气湍流引起的光学畸变,通过实时高速数据处理系统后,采用变形反射镜实时补偿动态变化的光学畸变,从而提升大口径光学系统的成像质量。高质量的导星(也称信标)是满足光学波前实时探测要求,实现自适应闭环校正的前提。自适应光学校正系统需获取能反映传输路径上光学畸变信息的导星光源,导星光源的基本要求是具有足够小的尺度(点光源)、足够的亮度和等晕条件。天文成像中,较亮的空间目标成像可采用目标自身发光作为导星光源,当成像目标光强不能满足导星探测要求时,可选取成像目标附近的满足等晕角要求的亮星作为导星源,但满足以上两种校正成像条件的自然星天空覆盖度非常低,在可见光到近红外波段,满足导星条件的自然星的天空覆盖度平均概率在0.1%左右。

采用激光导星是实现全天空覆盖自适应光学成像的有效手段,激光导星技术是指采用发射望远镜主动发射一束激光,通过大气后向瑞利散射或距地面100km钠原子层共振后向散射作为导星光源,为自适应光学系统实时校正提供大气传输光学畸变信息。

1985年,福伊(Foy)等提出了人造导星的概念^[1];1987年,汤普森(Thompson)等实验证明了特定波段的激光在100km大气稀薄钠原子层散射产生激光导星的可行性;1990—2010年,美国以大口径光学成像系统天文成像和激光全程大

气传输的军事应用为背景,开展了较为系统的钠导星技术试验。目前,全世界口径大于 3m 的近 40 座大型光学系统中大多采用自适应光学系统提高光学成像质量、改善激光传输特性。近年来,激光导星技术在大型光学系统中的应用取得了快速进展,在提高自适应校正的空间覆盖率、提高望远镜的成像质量和适应能力等方面发挥了重要的作用。

1.2 大气光学及大气湍流特性

大气光学性质主要取决于大气成分、气溶胶分布和大气流动等特性,大气对在其中传输的光束产生的效应可以分为线性效应和非线性效应。大气光学线性效应包括气体分子、气溶胶对光束的散射和吸收、大气湍流对光束造成的抖动和对光斑造成的扩展等。其中,大气在空间和时间上的分布不均匀性和局部密度涨落,就是通常所指的大气湍流,大气湍流的不均匀性将导致大气折射率在空间、时间上表现出随机起伏的结构特征,这种时空起伏结构的存在严重地影响了大气光学特性的均匀性、各向同性以及时间演化过程。当气候、气象条件发生变化时,特别是在辐射活动较强的太阳光照条件下,这种结构最易演变为局部动态扰动,正因如此,研究大气光学特性、大气湍流等问题时通常都只能采用数学统计方法,特别是随机函数理论和随机场理论等。

大气运动存在层流与湍流两种基本形态。层流是一种宏观尺寸的运动,是有序、确定的流体运动。湍流则是一种随机变化的运动,在宏观尺度上表现为无序、非确定性的流体运动。层流与湍流之间没有绝对的界限。1883 年,雷纳德首先对流体湍流特性进行了系统性研究,通过研究黏性流体在管道内的运动规律发现,当流速较小时流线光滑,流体处于层流状态,当流速超过一定值后,整个流体就会出现无规则运动,即湍流状态。雷纳德采用相似性原理,采用无量纲数(即雷诺数)表征流体这一状态,雷诺数定义如下^[2,3]:

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体密度(kg/m^3);

L ——特征尺度(m);

v ——流速(m/s);

η ——流体黏滞系数($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。

雷诺数表征了流体动能和耗散能的比值。当雷诺数处于临界值附近时,湍流的特征与初始条件有关;当 $Re > Re_{cr}$ 时,流体的运动表现出随机、无规则特性,这种情况下,只能采用统计特征来描述流体的运动。通常认为,当大气雷诺数小于 2000 时为层流,大于 3000 时主要表现为湍流。

大气参数在时间与空间上随机变化,需要用统计方法来描述。湍流会造成大气折射率的随机变化,在大气中传播的光波受此影响,其强度、相位、传输方向等参数都会发生随机变化。

在光学频率范围内,忽略地面水汽对折射率变化的贡献,对于 17km 以下的流层中的空气折射率一般可近似表示为^[4]

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{p}{T} \times 10^{-6} \quad (1-2)$$

式中 p ——大气气压(mbar; 1mbar = 100Pa);

T ——热力学温度(K);

λ ——光束波长(μm)。

大气湍流对光束传输的影响与湍流尺度、强度和光束直径的相对大小密切相关:当湍流尺度显著大于光束直径时,湍流作用后将主要导致光束的整体漂移;当湍流尺度显著小于光束直径时,光束的强度与相位分布均受到湍流的扰动,而在远场表现为光斑的闪烁、相位的起伏、光束的扩展等。

1941 年,科尔莫哥洛夫(Kolmogorov)等针对大气湍流特性,建立了大雷诺数下表征湍流微结构的方法,其描述湍流发展的基本过程如图 1-1 所示。

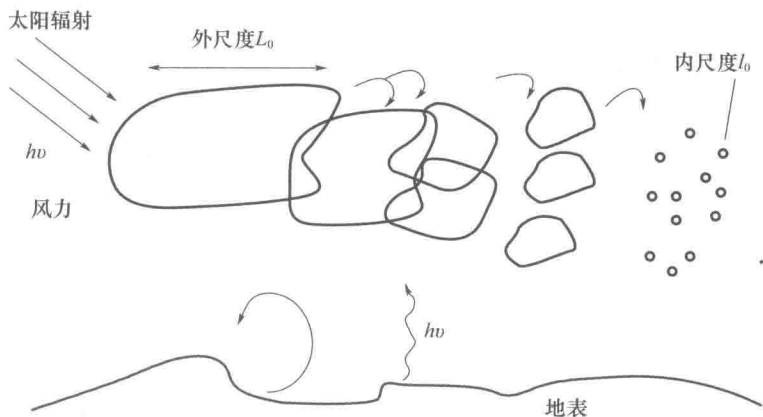


图 1-1 大气湍流发展模型

按照科尔莫哥洛夫理论,湍流平均速度的变化使湍流获得能量,例如,大气对太阳辐射的吸收、近地面平均风速随高度的变化等造成大气平均速度的变化。平均场将能量传输给湍流的尺度称为湍流的外尺度,以 L_0 表示,尺度大于 L_0 的涡旋通常都不是各向同性的。根据雷诺数的定义,尺度大的湍流耗散能小,尺度小的涡旋耗散能大,因此,在大涡旋运动发展过程中,动能逐级传递到尺度更小的涡旋中,直到某一最小尺度涡旋时动能与耗散能相当,这个最小尺度就是湍流的内尺度,以 l_0 表示。

科尔莫哥洛夫研究了空间相距 r 的两点速度差随时间的变化规律,并采用结构函数表征湍流统计特性,只要两点间距 r 在湍流惯性子区间内,对于局部均匀和各项同性涡流,折射率正比于标量距离 r 的 $2/3$ 次方,其变化用折射率结构函数 $D_n(r)$ 表示为^[4]

$$D_n(r) = \langle [n(r_1 + r) - n(r_1)]^2 \rangle = C_n^2(h)r^{2/3} \quad (1-3)$$

式中 $D_n(r)$ ——两个观测点间折射率增量的统计平均均方值;

C_n^2 ——大气湍流折射率结构常数,代表 h 处的平均湍流强度 ($\text{m}^{-2/3}$)。

湍流具有宏观流体运动的特点,大气湍流在总体上并非各项同性,但在给定小区域内可以近似看作均匀各向同性。需要指出的是,结构函数的这种形式仅在 $l_0 \leq r \leq L_0$ 的条件下才成立,而在近地面时 l_0 通常是毫米量级, L_0 是米量级,一般为 $1 \sim 100\text{m}$ 。

计算折射率变化函数必须知道折射率变化与温度和压力变化之间的关系,对式(1-2)求导并取 $\lambda = 0.6 \times 10^{-6} \mu\text{m}$,可得

$$dn = \frac{79p}{T} \left(\frac{dp}{p} - \frac{dT}{T} \right) \times 10^{-6} \quad (1-4)$$

由于自由状态下折射率 n 与压力变化关系不大,可以忽略,因此,折射率变化 dn 主要由温度起伏 dT 产生。根据温度势 Θ 的定义,在某一高度处折射率变化将仅是 $d\Theta$ 的函数:

$$dn = -79p \frac{d\Theta}{T^2} \times 10^{-6} \quad (1-5)$$

通常小尺寸的时空范围内,大气压和水气压的变化较小,而温度变化较大,所引起的大气折射率变化较大,因此温度起伏是引起光束参数变化的主要因素。温度变化可用温度场结构函数表征如下:

$$D_T(r) = \langle [T(r_1 + r) - T(r_1)]^2 \rangle = C_T^2(h)r^{2/3} \quad (1-6)$$

式中 C_T^2 —— h 处的温度结构常数。

大气湍流折射率结构常数与温度结构常数之间的关系为

$$C_n^2(h) = \left[\frac{10^{-6}}{T} \left(\frac{77.6P}{T} + \frac{0.584P}{T\lambda^2} \right) \right]^2 C_T^2 \quad (1-7)$$

大气湍流折射率结构常数 C_n^2 的单位为 $\text{m}^{-2/3}$,其随海拔高度不断变化,存在以下两个特点^[1]:

通常情况下,不同的地域、地貌特征条件下 C_n^2 有一定的区别,近地面处的 C_n^2 典型值处于 $10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ (较强湍流)至 $10^{-18} \text{m}^{-2/3}$ (较弱湍流)之间。

(1) C_n^2 在低空随高度呈现幂级次的降低,总体趋势符合塔塔尔斯基的理论分析,即按 $-2/3$ 次幂减弱。

(2) 在特定高度以上, C_n^2 按负指数规律急剧下降。

由于 C_n^2 代表了大气湍流的强弱与空间分布,国内外对其进行了大量的理论与实验研究,提出了多种湍流模型,简单列举如下。

(1) Hufnagal 湍流模型:

$$C_n^2(h) = 2.72 \times 10^{-16} (3\bar{v}^2(h/10000))^{10} e^{-h/1000} + e^{-h/1500} \quad (1-8)$$

式中 h ——海拔高度(m);

$\bar{v}$ ——风速因子,取值 27m/s。

(2) Hufnagal - Valley (HV) 湍流模型:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (\bar{v}/27)^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + A e^{-h/100} \quad (1-9)$$

式中 A ——常数;

$\bar{v}$ ——风速因子。

A 取值 $1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, $\bar{v}$ 取值 21m/s 时,为 HV-21 模型; A 取值 $3.189 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, $\bar{v}$ 取值 25.7m/s 时,为 HV-25 模型。

(3) 改进型 HV 湍流模型:

$$C_n^2(h) = 8.16 \times 10^{-53} h^{10} e^{-h/1000} + 3.02 \times 10^{-17} e^{-h/1500} + 1.9 \times 10^{-15} e^{-h/100} \quad (1-10)$$

或

$$C_n^2(h) = 8.16 \times 10^{-53} h^{10} e^{-h/1000} + 3.02 \times 10^{-17} e^{-h/1500} + 6.4 \times 10^{-15} e^{-h/100} \quad (1-11)$$

各种湍流模型适用地点、适用范围不一,但能够在一定程度上正确描述特定情况下的湍流的高度分布。

折射率起伏可以用空间功率谱密度 $\Phi_n(K)$ (即科尔莫哥洛夫谱密度)来表示,若 K 为空间波矢, K 为标量空间波数,塔塔尔斯基证明科尔莫哥洛夫谱密度函数(即折射率起伏频谱密度函数)为^[1,5]

$$\Phi_n(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3} \quad (1-12)$$

式中 C_n^2 ——折射率结构常数;

K ——湍流的空间波数, $K_0 = 2\pi/L_0$, $K_m = 5.92/l_0$, $K_0 \ll K \ll K_m$, 其中 l_0 、 L_0 为湍流的内尺度与外尺度。

光在湍流中传播时相位会受到扰动,相位空间结构函数 $D_\varphi(r)$ 和空间相关函数 $R_\varphi(r)$ 之间关系如下^[5]:

$$D_\varphi(r) = \langle R_\varphi(0) - R_\varphi(r) \rangle \quad (1-13)$$

湍流中折射率存在起伏,由此引起的相位漂移为

$$\varphi = 2\pi\lambda^{-1} \int n dz \quad (1-14)$$

利用式