

引用本文:李征,廖志文,梁静远,等.大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望[J].光通信技术,2023,47(3):9-17.

大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望

李征¹,廖志文¹,梁静远¹,王瑞¹,宋鹏²,王惠琴³,赵黎⁴,柯熙政^{1,5*}

(1.西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048;2.西安工程大学 电子信息学院,西安 710048;3.兰州理工大学 计算机与通信学院,兰州 730050;4.西安工业大学 电子信息工程学院,西安 710021;5.陕西省智能协同网络军民共建重点实验室,西安 710048)

摘要:为了克服大气湍流效应对无线光通信系统性能的影响,必须建立能准确描述大气折射率起伏的湍流模型。总结了国内外学者在大气湍流模型方面的研究进展,对不同大气湍流模型的理论建立进行深入分析并对比了其适用范围,同时介绍了在实际大气湍流中实验测量所建立的大气信道模型,最后对大气湍流模型的发展趋势进行了展望。

关键词:无线光通信;大气湍流效应;大气湍流模型;Kolmogorov 谱;大气信道模型

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)03-0009-09

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and prospects of atmospheric turbulence model and atmospheric channel model

LI Zheng¹, LIAO Zhiwen¹, LIANG Jingyuan¹,

WANG Rui¹, SONG Peng², WANG Huiqin³, ZHAO Li⁴, KE Xizheng^{1,5*}

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Electronic Information, Xi'an University of Engineering, Xi'an 710048, China; 3. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. School of Electronic Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China; 5. Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to overcome the influence of atmospheric turbulence effect on the performance of wireless optical communication system, it is necessary to establish a turbulence model which can accurately describe the fluctuations of atmospheric refractive index. This paper summarizes the research progress of atmospheric turbulence models at home and abroad, analyzes the theoretical establishment of different atmospheric turbulence models in depth and compares their application ranges. At the same time, the channel model of atmospheric established in the actual atmospheric turbulence measurement is introduced. Finally, the development trend of atmospheric turbulence model is forecasted.

Key words: wireless optical communication, atmospheric turbulence effect, atmospheric turbulence model, Kolmogorov spectrum, atmospheric channel model

收稿日期:2022-10-06。

基金项目:西安市科技创新引导项目(NO.201805030YD8CG14(12))资助;陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)资助;陕西省教育厅科研计划项目(NO.18JK0341)资助。

作者简介:李征(1979—),女,汉族,九三学社社员,硕士,讲师,现为西安理工大学讲师,主要研究方向为现代通信技术,主持和参与了科研项目20余项。

作者简介:柯熙政(1962—),男,博士,二级教授,陕西省教学名师,中国电子学会会士,出版专著10部,主要研究方向为无线激光通信理论与技术、先进导航理论与技术。



0 引言

在过去几十年中,信息和通信技术迅速发展,无线光通信(WOC)为实现超高速和大容量通信链路提供了可行的解决方案,是解决巨大带宽需求和“最后一千米瓶颈”问题的最有效途径之一^[1]。

WOC 部署面临的最大挑战是如何解决大气湍流效应对光通信的影响。在 WOC 链路中,由大气折射率随机起伏所产生的湍流会导致接收端光信号出现不同程度的振幅闪烁、相干衰减、光束扩展及漂移等大气湍流效应,这极大地限制了 WOC 的实际应用。因此,如何合理描述大气湍流的折射率起伏规律已成为

李征,廖志文,梁静远,等:大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望

研究大气湍流效应的问题关键。

为了完善实际大气湍流的理论分析,学者们陆续提出了多种大气湍流功率谱函数^[2]。目前,关于大气湍流折射率功率谱模型(下文简称大气湍流模型)的研究大部分是建立在大气湍流满足局部均匀各向同性的基础上(Kolmogorov 湍流统计理论),但近年来大量的观测实验均表明,实际大部分大气湍流都趋近于各向异性状态^[3]。因此,建立更准确的大气湍流模型是未来研究湍流统计特性的基础。本文重点介绍国内外学者在大气湍流模型方面的研究进展及在大气湍流中实验测量所建立的大气信道模型。

1 大气湍流模型研究进展

1.1 国外研究进展

1941年,KOLMOGOROV A N^[4]在发表的著名 Kolmogorov 湍流理论中首次正式提出大气湍流模型的概念并建立了 Kolmogorov 谱模型。随后,各国研究人员开始对大气湍流功率谱开展了大量的研究工作并陆续建立了不同的大气湍流模型。国外研究进展如表 1 所示。

1.2 国内研究进展

随着大气湍流光学特性研究的不断发展,国内学者从不同地区、不同气象条件、不同下垫面等方面开

表 1 国外研究进展

年份	作者	研究进展	文献
1941	KOLMOGOROV A N	建立 Kolmogorov 谱模型	文献[4]
1948	KARMAN V T	建立 Von Karman 谱模型	文献[5]
1961	TATARSKI V I	建立 Tatarski 谱模型	文献[6]
1963	KARMAN V T	建立修正 Von Karman 谱模型	文献[7]
1968	BUSCH N E 等人	证实了一维速度谱遵循 $-5/3$ 幂律	文献[8]
1972	KAIMAL J C 等人	证实了近地面环境下 Kolmogorov 谱的有效性	文献[9]
1974	GREENWOOD D P 等人	建立 Greenwood-Tarazano 谱模型	文献[10]
1977	CHAMPAGNE F H	发现了功率谱在近高波数区呈现突起状况	文献[11]
1978	HILL R J	建立 Hill 谱模型	文献[12]
1986	MANNING R M	验证了大气湍流场的各向异性	文献[13]
1990	KRAICHNAN R H	对惯性范围内存在的 Kolmogorov 谱给出了有效的标度参数	文献[14]
1992	ANDREWS L C	建立 Andrews 谱模型	文献[15]
1995	BELAND R R	推导了非 Kolmogorov 湍流的结构函数	文献[16]
1995	ANTOSHKIN L V 等人	开展了地面大气层湍流谱各向异性的研究	文献[17]
1998	STRIBLING B E 等人	推导了指数结构函数与功率谱之间的关系	文献[18]
2004	LIPATAK C	将 Tatarski 谱的结构函数扩展到较小的幂律值	文献[19]
2007	TOSELLI I 等人	提出一种利用传输光束横向位移的相关函数来估计大气湍流外部尺度的方法	文献[20]
2008	ZILBERMAN A 等人	提出一个随空间高度变化的湍流谱模型	文献[21]
2008	TOSELLI I 等人	建立了非 Kolmogorov 湍流功率谱模型	文献[22]
2010	ZILBERMAN A 等人	对比分析 Kolmogorov 和非 Kolmogorov 湍流对激光通信链路的影响	文献[23]
2014	TOSELLI I	分析了大气湍流涡旋在垂直和水平方向上的非对称性	文献[24]
2018	HELIN T 等人	针对准确定位非 Kolmogorov 功率谱密度下的局部扰动,提出了 3 种数值重构方法	文献[25]
2021	SANTOS F L D 等人	通过模拟实验确定了影响耗散频率的湍流场特性	文献[26]
2021	GOLDMAN I 等人	推导了可压缩湍流的惯性范围功率谱	文献[27]
2021	IWANO K 等人	证明了湍流耗散率对数的平均值随着空间高度的降低而增大	文献[28]

李征,廖志文,梁静远,等:大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望

展了大量关于大气湍流功率谱的实验测量并进行理论分析,进一步完善了大气湍流模型理论,为后续有关大气湍流的研究奠定了夯实的基础。国内研究进展如表 2 所示。

2 大气湍流模型

在不同的湍流环境下,大气湍流模型有所不同。为更加深入地研究大气湍流中的光传输特性,学者们已陆续提出多种适用于不同条件下的大气折射率功率谱模型,如表 3 所示。从最初的假定湍流外尺度 $L_0 \rightarrow \infty$ 、内尺度 $l_0=0$ 的 Kolmogorov 谱,发展到能体现内

外尺度特征的 Von Karman 谱与较为精确的物理分析谱模型 Hill 谱,以及当前最符合实际大气特性的 Non-Kolmogorov 谱等^[56-57]。

2.1 Kolmogorov 谱

1941 年,KOLMOGOROV A N^[4]通过在足够大的雷诺数和足够小的尺度下对均匀湍流中的平衡状态提出 3 个假设,并由此建立了经典湍流理论的基础。第一个假设:小尺度湍流运动在统计上是各向同性的;第二个假设:小尺度湍流运动的统计具有由能量耗散率 ϵ 和运动粘度 ν 唯一确定的普遍形式,这个刻度范围也被称为通用平衡范围;第三个假设:大尺度湍流运动统

表 2 国内研究进展

年份	作者	研究进展	文献
1975	周培源等人	推导了涡旋尺度与涡旋雷诺数的关系式	文献[29]
1978	刘振兴	提出了一个描述大气湍流功率谱特性的无因次量	文献[30]
1984	安应琪	针对均匀各向同性湍流推导了能谱密度的计算公式	文献[31]
1986	宋正方等人	对比分析了 Von Karman 湍流谱与指数谱对光束漂移的影响	文献[32]
1986	吴振森	利用绕射参数 Λ 定义了强起伏极限情况下广义折射率功率谱的相关尺度	文献[33]
1992	王介民	通过实验研究得出地形特征对湍流谱特征的影响较小	文献[34]
1993	XU Y 等人	证实了广州地区近地层中 Kolmogorov 谱的有效性	文献[35]
1998	胡非	推导能谱密度与频率的幂指数函数关系式	文献[36]
1998	曾宗泳等人	实验证实了复杂环境下的功率谱并不符合 Kolmogorov 湍流谱理论	文献[37]
1999	饶瑞中	建立湍流温度场的间歇性模型	文献[38]
2000	饶长辉等人	提出一种分析非 Kolmogorov 湍流相位起伏时空特征的理论方法与一种测量功率谱指数下降因子的方法	文献[39-40]
2005	朱文越等人	提出一种能够同时反演湍流内尺度与折射率结构常数的方法	文献[41]
2005	张逸新	在修正 Von Karman 谱的基础上建立了简化湍流功率谱模型	文献[42]
2006	潘锋等人	通过实验发现实际大气湍流功率谱中的高频幂指数呈现不稳定的随机起伏	文献[43]
2008	何武光等人	建立了近地面大气估算和预测模型	文献[44]
2008	卢盼盼等人	利用归一化谱拟合谱率检验了雪面上局部各项同性的假设	文献[45]
2010	程显海等人	建立了海面大气折射率起伏预报模式的初步构架	文献[46]
2011	陈昊等人	提出了改进的大气吸收模型,并构建反演大气温度廓线的统计矩阵	文献[47]
2011	XUE B 等人	推导了一种包含有限的湍流内部和外部尺度的广义修正大气光谱模型	文献[48]
2014	段梦云等人	分析对比了 Kolmogorov 谱模型、Tatarskii 谱模型及其它谱模型的异同	文献[49]
2016	LI J 等人	推导高超声速湍流折射率起伏的各向异性功率谱	文献[50]
2018	王惠琴等人	研究发现时间频谱的幂律变化主要受大气湍流模型的影响	文献[51]
2018	OBUKHOV A M	利用闪烁法测量了晴、阴、沙尘及雨夹雪天气下的大气折射率结构常数	文献[52]
2019	胡昌琼等人	介绍各类大气湍流特征参数的计算方法,并对桥位处近地层的大气湍流功率谱进行了实验测量	文献[53]
2021	ZHAI C	建立水平链路和卫星链路上具有各向异性倾斜角的非 Kolmogorov 湍流谱	文献[54]
2022	杨斌等人	对青藏地区湍流谱特征和相似性规律开展了实验研究	文献[55]

李征,廖志文,梁静远,等:大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望

表3 大气湍流模型

湍流类型	功率谱类型	功率谱	内尺度的影响	外尺度的影响
Kolmogorov 湍流(幂律值为 11/3)	基础谱	Kolmogorov 谱	不考虑	不考虑
	数学推导谱	Tatarskii 谱	考虑	不考虑
		Von Karman 谱	考虑	考虑
	物理分析谱	Greenwood-	考虑	考虑
		Hill 谱	考虑	考虑
		Andrews 谱	考虑	考虑
Non-Kolmogorov 湍流(幂律值为 3~5)	基础谱	Non-Kolmogorov 谱	不考虑	不考虑
	数学推导谱	广义修正 Non-Kolmogorov 谱	考虑	考虑

计具有唯一由 ε 确定的通用形式,且与 v 无关。同时满足这 3 个假设的湍流被称为 Kolmogorov 湍流^[4]。

基于 Kolmogorov 湍流理论的研究成果,可根据空间波数 κ 的不同大小将湍流分为输入区、惯性区和耗散区(见文献[58]图 8)。 $\kappa < 2\pi/L_0$ 的区域为输入区,在此区域内功率谱密度 $\Phi_{n,\kappa}(\kappa)$ 通常是各向异性的; $2\pi/l_0 > \kappa > 2\pi/L_0$ 的区域为惯性区,此时 $\Phi_{n,\kappa}(\kappa)$ 的形状由制约着大湍流旋涡破碎为小旋涡的物理定律来决定。当 κ 继续增大到 $\kappa > 2\pi/l_0$ 时,湍流区间便进入了耗散区,在耗散区内湍流能量的耗散远超过了所产生的动能,因此进入耗散区时, $\Phi_{n,\kappa}(\kappa)$ 下降的速度明显变快。

当标量距离 R 小于 L_0 时,KOLMOGOROV A N^[4]指出湍流是局部统计均匀且各向同性的。在惯性子区内,折射率结构函数 $D_n(R)$ 与 $R^{2/3}$ 成正比,其表达式为

$$D_n(R) = C_n^2 R^{2/3} \quad (1)$$

其中, C_n^2 为大气折射率结构常数,单位为 $m^{-2/3}$ 。

$\Phi_{n,\kappa}(\kappa)$ 与 $D_n(R)$ 的关系为

$$\Phi_{n,\kappa}(\kappa) = \frac{1}{4\pi^2 \kappa} \int_0^\infty \frac{\sin(\kappa R)}{\kappa R} \frac{d}{dR} \left[R^2 \frac{d}{dR} D_n(R) \right] \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)便可得到著名的 Kolmogorov 谱^[4]为

$$\Phi_{n,\kappa}(\kappa) = \frac{\Gamma(a+1)}{4\pi^2} \sin[(a-1)\pi/2] C_n^2 \kappa^{-a-2} = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} \quad (3)$$

其中, a 为不同湍流功率谱模型参数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $1/L_0 \leq \kappa \leq 1/l_0$ 。

2.2 Tatarskii 谱

Kolmogorov 谱的惯性区尺度仅适用较小的湍流尺度。而在实际大气湍流中,由于湍流尺度受大气条件、离地面的高度、地形结构等影响,湍流尺度并没有通用值。TATARSKII V I^[6]通过引入湍流内尺度参数($\kappa_m = 5.92/l_0$)得到了频谱函数 $\exp(\kappa^2/\kappa_m^2)$ 。为了方便数学描述, MANNING R M^[13]在进行湍流风速起伏研究时建立了新的功率谱, KRAICHNAN R H^[14]对该功率谱进行了改进并应用于大气折射率起伏研究,建立了 Tatarskii 谱,其表达式为

$$\Phi_{n,T}(\kappa) = 0.33 C_n^2 \kappa^{-11/3} \exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_m^2}\right) \quad (4)$$

其中, $\kappa > 1/L_0$, $\kappa_m = 5.92/l_0$, Tatarskii 谱的适用区域仅扩展到了耗散区。由于式(3)和式(4)对 Kolmogorov 谱、Tatarskii 谱模型的定义域都存在 $\kappa=0$ 奇点($L_0 \rightarrow \infty$),只有处于惯性区或在耗散区域之外时, Tatarskii 谱才是各向同性的。

2.3 Von Karman 谱

Kolmogorov 谱和 Tatarskii 谱只在惯性区或耗散区域之外($\kappa > 1/L_0$)才是均匀、各向同性的;当 $\kappa < 1/L_0$ 时, $\Phi_{n,\kappa}(\kappa)$ 通常被认为是非均匀的,其形式未知^[9]。于是, Von Karman 谱将 Kolmogorov 谱、Tatarskii 谱加以改进,将 κ 的范围扩展为 $0 \sim \infty$,使其在 $\kappa < 1/L_0$ 范围内也是均匀和各向同性的,因此该谱可以包含所有波束范围。当 $\kappa=0$ 时, Von Karman 谱的 $D_n(R)$ 与 $B_n(R)$ (协方差函数)同时存在,可以解决 Kolmogorov 谱和 Tatarskii 谱无法积分奇点的问题。 Von Karman 谱表达式^[5]为

$$\Phi_{n,v}(\kappa) = 0.33 C_n^2 \left(\kappa^2 + \kappa_0^2 \right)^{-11/6} \quad (5)$$

其中, $0 \leq \kappa \leq \infty$, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ 。当惯性区 $\kappa_0 \leq \kappa \leq \kappa_m$ 时,式(5)可蜕变为式(3)中的 Kolmogorov 谱。

为充分考虑湍流内、外尺度的影响,人们将湍流的内尺度参数 κ_m 也引入到 Von Karman 模型中,进一步提出了修正 Von Karman 谱,其表达式^[9]为

$$\Phi_{n,v}(\kappa)' = 0.33 C_n^2 \frac{\exp\left(-\kappa^2/\kappa_m^2\right)}{\left(\kappa^2 + \kappa_0^2\right)^{11/6}} \quad (6)$$

其中, $0 \leq \kappa \leq \infty$, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, $\kappa_m = 5.92/l_0$ 。当惯性区内 $\kappa_0 \leq \kappa \leq \kappa_m$ 时,式(6)可蜕变为 Kolmogorov 谱。但在惯性区外,式(6)没有体现出高波数区突变因素的影响,因此并不能准确描述实际物理现象^[14]。

2.4 Greenwood-Tarazano 谱

Von Karman 谱仅仅描述了管道内的流体,这种流

体只有唯一的特征尺度,即管道直径。而实际大气湍流却具有许多特征尺度,因为在大气边界层中有高度、边界层厚度、地面非均匀尺度等,因此 Von Karman 谱无法准确描述实际大气湍流^[13]。

由于温度的空间结构函数与空间功率谱有相关性,且不依赖于泰勒冻结假设,GREENWOOD D P 等人^[10]用实验所测得的空间结构函数重建大气湍流功率谱,并依据实验数据提出了 Greenwood-Tarazano 谱,其表达式为

$$\Phi_{n,c}(\kappa)=0.33\tilde{C}_n^2(\kappa^2+\kappa\kappa_0)^{-11/6} \quad (7)$$

其中, $0\leq\kappa\leq\infty$, $\kappa_0=2\pi/L_0$ 。式(7)在式(4)基础上结合了实验测量数据,将其中的一个内尺度参数 κ 替换成了外尺度参数 κ_0 ,与 Von Karman 谱相比,在惯性区内,Greenwood-Tarazano 谱下降得更快^[13]。

2.5 Hill 谱

CHAMPAGN F H 等人^[11]根据实验测量证明:功率谱密度在接近高波数 $1/l_0$ 附近时存在一个小突起的特征(文献[58]的图 3-2),而式(3)~式(7)所述的功率谱都没有这一特征。因此,式(3)~式(7)所表示的谱模型在非惯性区内是不正确的。

HILL R J^[12]在实验的基础上考虑了功率谱高波数区突变因素的影响,即功率谱从惯性对流范围到粘性对流范围的转换发生在相对较高的波数区(功率谱在惯性对流范围内具有 $\kappa^{-11/3}$ 幂律,在粘性对流范围内具有 κ^{-3} 幂律),进而提出了一种精确描述惯性区和耗散区的数值模型—Hill 谱,其表达式为

$$\Phi_{n,H}(\kappa)=0.033\tilde{C}_n^2\kappa^{-11/3}\times\left\{\exp\left(-1.2\kappa^2l_0^2\right)+1.45\exp\left[-0.97\left(\ln\kappa l_0-0.452\right)^2\right]\right\} \quad (8)$$

其中, $1/L_0\leq\kappa\leq 1/l_0$ 。

HILL R J 在分析实验数据所得到的二阶线性方差如式(9)所示,Hill 谱便是式(9)的数值解。

$$\frac{d}{d\kappa}\left\{\left[\kappa^{14/3}13.9\kappa(0.135l_0)^{3.8}+1\right]^{-0.175}\frac{d}{d\kappa}\Phi_{n,H}(\kappa)\right\}=1.41\kappa^4(0.135l_0)^{4/3}\Phi_{n,H}(\kappa) \quad (9)$$

由于湍流内尺度 l_0 的作用,此谱形态与 Kolmogorov 谱不同,在进入快速指数下降前不是快速下降而是出现一个上升小峰值。

2.6 Andrews 谱

由于 Hill 谱模型形式复杂,不方便理论计算^[12]。ANDREWS L C^[15]在 Hill 谱模型的基础上采用了内插法进行修正,提供了与 Von Karman 湍流谱相同的理论模型—Andrews 谱。该谱既能描述在高波数处的突

起,又具有易于处理的数学形式,其表达式为

$$\Phi_{n,A}(\kappa)=0.033\tilde{C}_n^2\left[1+a_1\left(\kappa/\kappa_1\right)-a_2\left(\kappa/\kappa_1\right)^{7/6}\right]\times\frac{\exp\left(-\kappa^2/\kappa_1^2\right)}{\left(\kappa_0^2+\kappa^2\right)^{11/6}} \quad (10)$$

其中, a_1 表示湍流功率谱中峰值与均值之间的比值($a_1=1.802$), a_2 表示湍流功率谱中出现的峰值数量与平均值出现的数量之比($a_2=0.254$), $\kappa_1=3.3/l_0$ 。从式(10)可以看出,当 $a_1=a_2=0$ 时,Andrews 谱模型可以简化为 Von Karman 谱模型;当 $\kappa_0=l_0=0$ 时,Andrews 谱模型与 Von Karman 谱模型均可以变化为 Kolmogorov 谱模型。

Von Karman 谱在惯性区时与 Kolmogorov 谱基本相同,随着波数的增大,Von Karman 谱急剧单调下降。Hill 谱和 Andrews 谱在惯性区的高波数区内与 Kolmogorov 谱有显著的不同,能体现高波数突变对光传输的影响。

2.7 Non-Kolmogorov 谱和广义修正 Non-Kolmogorov 谱

1962 年,OBUKHOV A M^[52]通过实验观察发现大尺度湍流具有明显的各向异性,但仅限于大尺度湍流范围内。2008 年,TOSELLI I 等人^[22]研究发现大尺度湍流和小尺度湍流之间可以直接进行能量转移。目前,越来越多的实验数据表明,在实际大气湍流中,大部分湍流处于各向异性状态,即为 Non-Kolmogorov 湍流。

为了研究 Non-Kolmogorov 大气湍流对光波传输的影响,ANDREWS L C 等人^[15]建立了 Non-Kolmogorov 谱,其表达式为

$$\Phi_n(\kappa,\alpha)=A(\alpha)\tilde{C}_n^2\kappa^{-\alpha} \quad (11)$$

其中, α 是折射率功率谱密度幂率, $3<\alpha<4$; $\tilde{C}_n^2$ 是 Non-Kolmogorov 湍流的折射率结构常数,单位为 $m^{3-\alpha}$; $A(\alpha)$ 是表示 α 的连续函数。

当 $\alpha=11/3$ 时, $\tilde{C}_n^2=C_n^2$, $A(\alpha)=0.033$,式(11)就变成了 Kolmogorov 湍流的折射率功率谱密度模型。

为了了解内外尺度对 Non-Kolmogorov 大气湍流效应的影响,ANDREWS L C 等人^[15]又发展了广义修正 Non-Kolmogorov 谱,其表达式为

$$\Phi_n(\kappa,\alpha)=\frac{A(\alpha)\tilde{C}_n^2}{\left(\kappa^2+\kappa_0^2\right)^{\alpha/2}}\exp\left(-\kappa^2/\kappa_m^2\right) \quad (12)$$

其中, $0<\kappa<\infty$, $3<\alpha<4$, $\kappa_0=2\pi/L_0$, $\kappa_m=c(\alpha)/l_0$,且 $c(\alpha)$ 是折射率功率谱密度幂率 α 的函数,具有如下形式:

李征,廖志文,梁静远,等:大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望

$$A(\alpha) = \frac{1}{4\pi} \Gamma(\alpha-1) \cos\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \quad (13)$$

$$c(\alpha) = \left[\frac{2\pi}{3} \Gamma\left(5-\frac{\alpha}{2}\right) A(\alpha) \right]^{1/(\alpha-5)} \quad (14)$$

从式(13)可以看出,当 $\alpha=11/3$ 时, $A(\alpha)=0.033$, Non-Kolmogorov 谱可等价于修正的 Von Karman 谱;当 $\alpha=11/3$ 、 $A(\alpha)=0.033$ 、 $L_0 \rightarrow \infty$ 、 $l_0 \rightarrow 0$ 时, Non-Kolmogorov 谱可等价于 Kolmogorov 谱。

文献[59]中的图 6-1 为不同 α 值下 Non-Kolmogorov 谱与 Kolmogorov 谱比较图。当 $\alpha=11/3$ 、 $\tilde{C}_n^2=C_n^2$ 时, $A(\alpha)=0.033$, 此时 $\Phi_{n,k}(\kappa)=0.033 \tilde{C}_n^2 \kappa^{-11/3}$, Non-Kolmogorov 谱变成了 Kolmogorov 谱;当 $\alpha=3.1$ 、 $\alpha=10/3$ 、 $\alpha=4.8$ 时, Non-Kolmogorov 谱明显偏离了 Kolmogorov 谱,且 α 越大,偏离的程度也相应变大,但在惯性区内 ($\kappa < 1.1 \times 10^3$);不同 α 值下的 Non-Kolmogorov 谱与 Kolmogorov 谱偏差较小。从以上分析可知, Kolmogorov 谱属于 Non-Kolmogorov 谱的一种特例。

2.8 随高度变化的湍流谱

迄今为止,地球大气中的大气湍流结构有 2 种模型:一种是 2 层模型,即大气中湍流由对流层中的 Kolmogorov 湍流和平流层中的非 Kolmogorov 湍流组成;另一种是 3 层模型,即大气中的湍流由边界层中的 Kolmogorov 湍流、自由对流层中的非 Kolmogorov 湍流、平流层中的非 Kolmogorov 湍流组成,湍流谱表达式分别为

$$\Phi_{n,U}(\kappa, z) = 0.033 \tilde{C}_{n,U}^2(z) \kappa^{-11/3} \quad (15)$$

$$\Phi_{n,F}(\kappa, z) = 0.015 \tilde{C}_{n,F}^2(z) \kappa^{-10/3} \quad (16)$$

$$\Phi_{n,S}(\kappa, z) = 0.0024 \tilde{C}_{n,S}^2(z) \kappa^{-5} \quad (17)$$

其中, z 是传播距离, $\tilde{C}_{n,U}^2(z)$ 是边界层中的常规 Kolmogorov 湍流折射率结构参数(单位为 $m^{-2/3}$), $\tilde{C}_{n,F}^2(z)$ 是自由对流层中的非 Kolmogorov 湍流折射率结构参数(单位为 $m^{-1/3}$), $\tilde{C}_{n,S}^2(z)$ 是平流层中的非 Kolmogorov 湍流折射率结构参数(单位为 m^{-2})。 $\tilde{C}_{n,U}^2(z)$ 、 $\tilde{C}_{n,F}^2(z)$ 、 $\tilde{C}_{n,S}^2(z)$ 这 3 个参数值大小均取决于海拔高度。

ARKADI Z^[21]根据实验发现自由对流层和平流层中湍流的功率谱可能表现出非 Kolmogorov 谱特性,折射率波动的光谱行为随海拔高度而变化,不适合式(4)

~式(11)等通用模型。于是,ARKADI Z^[21]基于自由大气中折射率功率谱的 3 层模型,根据对流层和平流层下部湍流廓线的实验和理论数据,提出了一种随高度变化的湍流谱模型,其表达式为

$$\alpha(z) = \frac{\alpha_1}{1+(z_1/H_1)^{b_1}} + \frac{\alpha_2(z_1/H_1)^{b_1}}{1+(z_1/H_1)^{b_1}} \times \frac{1}{1+(z_1/H_2)^{b_2}} + \frac{\alpha_3(z_1/H_2)^{b_2}}{1+(z_1/H_2)^{b_2}} \quad (18)$$

其中, α_1 、 α_2 、 α_3 分别对应 3 层模型中边界层、自由对流层、平流层的折射率功率谱密度幂率, $\alpha_1=11/3$ 、 $\alpha_2=-10/3$ 、 $\alpha_3=-5$; z_1 为距离地面的高度, H_1 、 H_2 为特征高度, b_1 、 b_2 为拟合系数。实验结果表明,大气湍流特性会随距离地面高度的变化而变化,并且可以通过 3 层模型可以表示 $\alpha(z)$ 对高度的依赖性。

3 大气信道模型

由于大气湍流效应的影响,当激光束在大气中传输时,接收端上的光强会发生随机起伏,即光强闪烁效应,它会导致接收器处的信号衰落和接收信号质量的恶化^[60]。因此,为了提高 WOC 系统的性能,建立不同大气湍流条件下的信道模型是必不可少的。现有的研究信道模型包括:Log-normal 分布、Gamma-Gamma 分布、负指数分布、K 分布、Malaga 分布、柯氏分布,这些分布信道模型一般采用概率密度函数表示。

3.1 Log-normal 分布

Log-normal 分布描述了弱湍流区的闪烁和衰落统计,其概率密度函数表达式^[4]为

$$f_{I,L}(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_I^2 I} \exp\left\{-\frac{\ln(I/I_0) - E[I]}{2\sigma_I^2}\right\}^2 \quad (19)$$

其中, σ_I^2 为对数光强方差, I_0 为发射端的光强值, I 为到达每个接收器的归一化光强值。

从不同 σ_I^2 下的 Log-normal 分布概率密度函数曲线图(文献[58]中的图 4-4)可知,随着 σ_I^2 的增大,曲线逐渐偏离均值,且拖尾更严重,与 Log-normal 分布逐渐不符。因此,Log-normal 分布仅适用于弱湍流条件 ($\sigma_I^2 < 1$)。

3.2 Gamma-Gamma 分布

由于 Log-normal 分布仅限于弱湍流,因此 KOLMOGOROV A N^[4]基于修正的 Rytov 理论提出了 Gamma-Gamma 信道模型,其中的光强起伏被发展为 2 个

随机过程的乘积,其概率密度函数表达式为

$$f_{I,G}(I) = \int_0^{+\infty} p_y(I|x) p_x(x) dx = \frac{2(u\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(u)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} B_{\alpha\beta}[2(\alpha\beta I)^{1/2}], I>0 \quad (20)$$

其中, u, β 分别表示大、小尺度散射系数, $B_{\alpha\beta}(\cdot)$ 为第二类修正 Bessel 函数。

从不同湍流强度下的 Gamma-Gamma 分布概率密度函数值(文献[58]中的图 4-5 所示)可知,与 Log-normal 分布相比, Gamma-Gamma 分布适用范围更广,对弱、中、强湍流区的光强起伏统计特征均可准确描述。

3.3 负指数分布

对于链路长度为几千米的强湍流情况,信号幅度遵循信号强度的负指数分布,其概率密度函数的表达式为

$$f_{I,N}(I) = 1/I_0 \exp(-I/I_0) \quad (21)$$

其中, $I_0 = E[I]$ 为平均光强值, $I>0$ 。在饱和状态下,闪烁指数 $\rightarrow 1$,负指数分布如文献[58]中的图 4-8 所示。

3.4 K 分布

在强湍流区域中,大气湍流分布信道模型可用 K 分布表示,其概率密度函数^[58]表达式为

$$f_{I,K}(I) = \frac{2a^{(a+1)/2}}{\Gamma(a)} I^{(a-1)/2} B_{a-1}(2\sqrt{aI}), I>0 \quad (22)$$

其中, $B_{a-1}(\cdot)$ 为第二类修正 Bessel 函数。

从 K 分布信道随信噪比(SNR)变化的误时隙率图(文献[59]中的图 6 所示)可知,当 SNR 较小时,与一维 K 分布信道相比,二维 K 分布信道的误时隙率较低;当 SNR 较大时,两者相差不大。

从 K 分布信道分别在 $a=1, a=2$ 时随 SNR 变化的信道容量图(文献[59]中的图 7 所示)可知, SNR 和 a 的增大都会使 K 分布平均信道容量增大;当 a 相同时,与一维 K 分布信道相比,二维 K 分布信道容量较大。

3.5 Malaga 分布

Malaga 分布是一种可以描述多种湍流分布的通用模型,其概率密度函数^[60]表达式为

$$f_{I,M}(I) = A \sum_{k=1}^{\infty} h_k I^{(\alpha+k)/2-1} B_{\alpha-k} \left(2\sqrt{\frac{aI}{\gamma\beta+\Omega'}} \right) \quad (23)$$

其中, $A = \frac{2\alpha^{\alpha/2}}{\gamma^{1+\alpha/2} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\gamma\beta}{\gamma\beta+\Omega'} \right)^{\beta}$, γ 为离轴涡旋接收的经典散射分量的平均光功率, h_k 为第 k 条路径的幅度

系数(信道增益), $h_k = \frac{(\beta)_{k-1} (\alpha\gamma)^{k/2}}{[(k-1)!]^2 \gamma^{k-1} (\Omega'+\gamma\beta)^{k-1}}, \Omega'$

为相干平均光功率^[61]。

从 Malaga 大气湍流信道与其它湍流信道中光强 I 概率密度函数曲线对比图(文献[60]中的图 3-4 所示)可知,随着耦合因子 ρ 的增大, $f_{I,M}(I)$ 值也相应增大。在强湍流情况下,与 Gamma-Gamma 分布相比, Malaga 分布的 $f_{I,M}(I)$ 值下降趋势较为缓慢,拖尾相对严重;在弱湍流情况下,随着 ρ 的升高, $f_{I,M}(I)$ 曲线逐渐右移,同时峰值增高且拖尾现象减弱^[62]。

3.6 柯氏分布

车联网可见光通信不仅受大气湍流影响,同时受交通灯、路灯、汽车前后灯、高亮度广告牌等背景光的干扰,传统的光强闪烁模型不能准确描述信道。针对车联网可见光通信,柯熙政等人^[63]提出了一种采用双高斯函数进行拟合的夜晚背景光噪声模型,即柯氏分布,其概率密度函数表达式为

$$f_{I,X}(I) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} e^{[-(1-\mu_1)^2/(2\sigma_1^2)]} + \frac{A_2}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} e^{[-(1-\mu_2)^2/(2\sigma_2^2)]} \quad (24)$$

其中, A_1, A_2 为归一化修正系数,取值范围为 $0 \sim 1$; μ_1 为车辆所在当前路灯光强闪烁均值, σ_1 为车辆所在当前路灯光强闪烁方差; μ_2 为其它光源光强闪烁均值, σ_2 为其它光源光强闪烁方差。

从柯氏分布(文献[63]中的图 1 所示)可知,在高斯曲线 1 中,背景噪声主要包含了当前路灯背景光成分,其光强较弱且光强起伏方差较小;在高斯曲线 2 中,背景噪声主要包含了前后车灯、高亮度广告牌和交通灯等成分,其光强较强且光强波动方差较大^[62]。因此,柯氏分布能够准确描述可见光通信环境噪声模型。

4 结束语

距 1941 年首次发表湍流理论至今已有 81 年,在这期间各国科学学者陆续建立了各种大气湍流理论模型,大气光学湍流的折射率功率谱研究已经从 Kolmogorov 折射率功率谱(描述统计均匀的且充分发展的理想湍流)发展到了非 Kolmogorov 折射率功率谱(描述分层、湍流未充分发展等非经典湍流)^[60]。本文虽然介绍了各种大气湍流模型和大气分布信道模型,但考虑到理论分析的需要,在未来仍需研究新的能简化湍流效应理论分析的湍流模型。我们认为未来的大气湍流模型研究方向如下:

1) 对实际大气湍流特性进行测量研究,获取更多

李征,廖志文,梁静远,等:大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望

有关大气湍流的统计特征参数,更快推进实际大气湍流中无线光通信的研究发展。

2)对不同光源在不同大气湍流中传输特性进行分析和对比,探索大气湍流对光信号传输的影响机制,提高抑制大气湍流的能力。

3)研究高准确度的大气湍流参数测量仪器,同时发展高灵敏度、高分辨率的大气湍流特性测量技术和方法,从而提高实际大气中的大气湍流参数测量准确度。

致谢:感谢吴鹏飞、季旭宽、武迎辉、龚清润、姚海峰、王振华、丁德强、王燕红、王怡等人在实验数据测量方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] KIM A, JOHN L, MOIN L, et al. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number [J]. Jhon Fluid Mech, 1987, 50(24): 485–498.
- [2] MONIN A S. Statistical fluid mechanics: the mechanics of turbulence [J]. American Journal of Physics, 1977, 318(10): 202–220.
- [3] 柯熙政,吴加丽,杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 323–339.
- [4] KOLMOGOROV A N. The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1941, 30(42): 301–305.
- [5] KARMAN V T. Progress in the statistical theory of turbulence [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1948, 34(11): 530–539.
- [6] TATARSKI V I. Wave propagation in a turbulent medium [M]. New York: Hill Pergamon Press, 1961: 69–78.
- [7] KARMAN V T. From low-speed aerodynamics to astronautics[M]. New York: Pergamon Press, 1963: 152–168.
- [8] BUSCH N E, PANOFKY H A. Recent spectra of atmospheric turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1968, 94(400): 132–148.
- [9] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface layer turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(28): 12–20.
- [10] GREENWOOD D P, TARAZANO D. A proposed form for the atmospheric microtemperature in the input range. USAF Rome Air Development Center [J]. Technical Report RADC, 1974, 42(16): 442–456.
- [11] CHAMPAGNE F H. Flux measurements, flux estimation techniques, and fine-scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land[J]. Journal Of the Optical Society Of America, 1977, 34(3): 515–530.
- [12] HILL R J. Modified spectrum of atmospheric temperature fluctuations and its application to optical propagation[J]. Journal Of the Optical Society Of America, 1978, 68(4): 892–897.
- [13] MANNING R M. An anisotropic turbulence model for wave propagation near the surface of the Earth [J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 1986, 34(2): 258–261.
- [14] KRAICHNAN R H. Preliminary calculation of the Kolmogorov turbulence spectrum[J]. The Physics of Fluids, 1990, 8(5): 995–997.
- [15] ANDREWS L C. An analytical model for the refractive index power spectrum and its application to optical scintillations in the atmosphere[J]. Journal of Modern Optics, 1992, 39(9): 1849–1853.
- [16] BELAND R R. Some aspects of propagation through weak isotropic non-Kolmogorov turbulence [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1995, 27(11): 6–16.
- [17] ANTOSHKIN L V, BOTYGINA N N, EMALEEV O N, et al. Investigation of turbulence spectrum anisotropy in the ground atmospheric layer: Preliminary results[J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 1995, 8(12): 993–996.
- [18] STRIBLING B E, WELSH B M, ROGGMANN M C. Optical propagation in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 1998, 24(7): 117–126.
- [19] LIPATACK C. Optical wave propagation through non-Kolmogorov atmospheric turbulence[M]. University of Central Florida, 2004: 152–159.
- [20] TOSELLI I, ANDREWS L C, PHILLIPS R L, et al. Scintillation index of optical plane wave propagating through non-Kolmogorov moderate strong turbulence[J]. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2007, 54(32): 437–446.
- [21] ZILBERMAN A, GOLBRAIKH E, KOPEIKA N S. Propagation of electromagnetic waves in Kolmogorov and non-Kolmogorov atmospheric turbulence: three-layer altitude model [J]. Applied Optics, 2008, 47(34): 6385–6391.
- [22] TOSELLI I, ANDREWS L C, PHILLIPS R L, et al. Free space optical system performance for laser beam propagation through non Kolmogorov turbulence for uplink and downlink paths[J]. Optical Engineering, 2008, 47(2): 115–122.
- [23] ZILBERMAN A, GOLBRAIKH E, KOPEIKA N S. Some limitations on optical communication reliability through Kolmogorov and non-Kolmogorov turbulence [J]. Optics Communications, 2010, 283(7): 1229–1235.
- [24] TOSELLI I. Introducing the concept of anisotropy at different scales for modeling optical turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(8): 1868–1875.
- [25] HELIN T, KINDER J A. Atmospheric turbulence profiling with unknown power spectral density[J]. Inverse Problems An International Journal of Inverse Problems Inverse Methods, 2018, 8(10): 29–43.
- [26] SANTOS F L D, BOTERO-BOLIVAR L, VENNEN C H, et al. Modelling the dissipation range of von Karman turbulence spectrum [J]. Optics Communications, 2021, 28(11): 101–113.
- [27] GOLDMAN I. Analytic derivation of the inertial range of compressible turbulence[J]. Optics Communications, 2021, 24(12): 129–140.
- [28] IWANO K, HOSOI J, SAKAI Y, et al. Power spectrum of high Schmidt number scalar in a turbulent jet at a moderate Reynolds number[J]. Experiments in Fluids, 2021, 62(6): 148–156.
- [29] 周培源,黄永念. 均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论[J]. 中国科学, 1975, 20(2): 180–198.

- [30] 刘振兴. 大气湍流的湍流谱及有关大气污染问题 [J]. 大气科学, 1978, 11(3): 219-229.
- [31] 安应琪. 均匀各向同性湍流在大波数区域的能谱密度[J]. 河北工学院学报, 1984, 22(3): 70-81.
- [32] 宋正方, 张逸新, 龚知本. 湍流大气中光束漂移的若干问题探讨[J]. 量子电子学报, 1986, 10(1): 57-64.
- [33] 吴振森. 随机介质中波传播饱和状态的强度相关和闪烁[J]. 电波科学学报, 1986, 35(1): 72-84.
- [34] 王介民. 山谷城市的近地层大气湍流谱特征[J]. 大气科学, 1992, 21(1): 11-17.
- [35] XU Y, ZHOU C, LI Z, et al. Microstructure and spectral characteristics of turbulence in the surface-layer atmosphere over Guangzhou [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1993, 55(11): 26-29.
- [36] 胡非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解 [J]. 气候与环境研究, 1998, 20(2): 2-10.
- [37] 曾宗泳, 袁仁民, 吴晓庆, 等. 复杂地形近地面温度谱[J]. 量子电子学报, 1998, 32(2): 134-139.
- [38] 饶瑞中. 大气光传播研究中的湍流谱与间歇性[J]. 电子科技大学学报, 1999, 28(4): 437-442.
- [39] RAO C H, WEN H. Spatial and temporal characterization of phase fluctuations in non-Kolmogorov atmospheric turbulence [J]. Journal of Modern Optics, 2000, 47(6): 1111-1126.
- [40] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 应用哈特曼-夏克波前传感器测量大气湍流参数[J]. 光学学报, 2000, 35(9): 1201-1207.
- [41] 朱文越, 赵柱灵, 马晓珊, 等. 同步测量大气湍流折射率结构常数和内尺度的光学方法[J]. 强激光与粒子束, 2005, 54(10): 23-26.
- [42] 张逸新. 湍流大气中激光传输波前扭曲规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005: 32-38.
- [43] 潘锋, 马晶, 谭立英, 等. 孔径接收下大气闪烁频谱的理论和实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 21(9): 1457-1459.
- [44] 何武光, 吴健, 杨春平, 等. 近地面光学湍流估算与测量[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(6): 893-896.
- [45] 卢盼盼, 吴晓庆. 雪面上湍流谱特征研究[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 32(6): 421-426.
- [46] 程显海, 孙方, 赵振维. 海上实测大气折射率起伏特性研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 513-518.
- [47] 陈昊, 金亚秋. 风云三号 MWTS/MWHS 大气温度与水汽廓线反演—2008 年凤凰台风个例试验[J]. 遥感学报, 2011, 15(1): 137-147.
- [48] XUE B, CUI L, XUE W, et al. Generalized modified atmospheric spectral model for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28 (5): 912-916.
- [49] 段梦云, 艾勇, 熊准, 等. 激光大气传输室内模拟研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(3): 188-193.
- [50] LI J, YANG S, GUO L, et al. Anisotropic power spectrum of refractive-index fluctuation in hypersonic turbulence[J]. Applied Optics, 2016, 18(9): 53-62.
- [51] 王惠琴, 李源, 胡秋, 等. 兰州地区夜间光强起伏特性实验[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 194-201.
- [52] OBUKHOV A M. On the question of geostrophic wind [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1962, 38(4): 101-111.
- [53] 胡昌琼, 张雪婷, 王必强, 等. 武汉青山长江公路大桥设计的风参数研究[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 276-283.
- [54] ZHAI C. Anisotropic non-Kolmogorov turbulence spectrum with anisotropic tilt angle[J]. Photonics, 2021, 8(21): 521-530.
- [55] 杨斌, 袁祺, 谭昌海, 等. 青藏高原东部拉萨河下游地区大气湍流交换特征研究[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 204-215.
- [56] 饶瑞中, 李玉杰. 非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 26-36.
- [57] KARP S, GAGLIARDI R M, MORAN S E, et al. Optical channels[M]. New York: Springer, 1988: 105-112.
- [58] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [59] 柯熙政, 田晓超. 二维相关 K 分布湍流信道的建模与仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 41-49.
- [60] 高晓梅, 邢甜, 高婉倩, 等. 无线光相干通信及其实验研究[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 37-45.
- [61] 柯熙政, 王晨昊, 陈丹. Malaga 大气湍流信道下副载波调制系统相位噪声分析[J]. 通信学报, 2018, 39(11): 80-86.
- [62] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 无线光 MIMO 技术及空时编码研究进展[J]. 湖南科技学院学报, 2021, 11(5): 25-32.
- [63] 柯熙政, 秦欢欢, 杨尚君, 等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 986-990.