

无线光通信系统中的噪声模型研究进展*

梁静远¹ 毛双双¹ 柯熙政^{1,2} 秦欢欢¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710068)

摘要:无线光通信作为一种高速、高带宽和高安全性的通信技术,受到了广泛的关注。然而,噪声作为系统性能的重要限制因素,会使得系统信号失真和信噪比下降,进而影响通信质量。因此,为了减少噪声对信号的影响,从而更有效地设计和调整通信系统,就需要理解和模拟噪声的行为,而噪声模型就是一个研究噪声行为的重要工具。本文针对无线光通信系统中的噪声及噪声模型进行了系统性的研究,文中首先从无线光通信系统的信源、信道和信宿三方面对其中引入的各类典型噪声进行逐一分析,然后总结了相应噪声及其噪声模型的国内外研究进展,分析了噪声的产生机理,并给出了对应的噪声模型。此外,还总结了相关模型的特点及局限性。最后,总结了各类噪声的关键抑制技术,并展望了该领域的进一步研究方向,可为无线光通信技术的发展 and 系统设计与优化提供理论支持与启示。

关键词:无线光通信;信源;信道;信宿;噪声模型

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research progress on noise models in optical wireless communication systems

Liang Jingyuan¹ Mao Shuangshuang¹ Ke Xizheng^{1,2} Qin Huanhuan¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for Civil-Military Cooperation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Optical wireless communication, as a high-speed, high bandwidth, and high security communication technology, has received widespread attention. However, noise, as an important limiting factor of system performance, can cause system signal distortion and signal-to-noise ratio to decrease, thereby affecting communication quality. Therefore, in order to reduce the impact of noise on signals and design and adjust communication systems more effectively, it is necessary to understand and simulate the behavior of noise, and noise models are an important tool for studying noise behavior. This article systematically studies the noise and noise models in optical wireless communication systems. Firstly, the article analyzes each type of typical noise introduced in optical wireless communication systems from the perspectives of signal source, channel, and destination. Then, the research progress on corresponding noise and its noise models at home and abroad was summarized, and the mechanism of noise generation was analyzed, and corresponding noise models were provided. In addition, the characteristics and limitations of relevant models were summarized. Finally, key suppression technologies for various types of noise were summarized, and further research directions in this field were discussed, which can provide theoretical support and inspiration for the development of optical wireless communication technology and system design and optimization in this field.

Keywords: optical wireless communication; information source; channel; host; noise model

0 引言

随着无线通信需求的增加和频谱资源的日益稀缺,无线光通信逐渐引起了广泛的关注。它利用光波作为信息传播的载体,具有大容量、低延迟和抗干扰等优势^[1],被广泛应用于高密度通信场景和特殊环境中。然而,无线光通信仍面临着许多技术挑战,其中最为关键的是环境和系统内部噪声的影响。噪声不仅限制了通信系统的性能,降低了信号质量,而且还对链路的可靠性和稳定性构成威胁。因此,准确的噪声模型对于设计和优化无线光通信系统至关重要。

本综述旨在提供一个全面的概述,关注无线光通信系统中噪声模型的研究进展。文中首先概述系统中的噪声分类,然后逐一深入分析信源、信道和信宿中的噪声机理和噪声模型,最后总结了各类噪声的关键抑制技术。

此外,还探讨了未来可能的发展方向,能够为研究人员提供一个关于无线光通信系统噪声问题的参考框架,并为噪声抑制和系统优化提供指导和启示,促进该领域的进一步研究和发展。

1 无线光通信系统中的噪声分布

无线光通信系统的整体架构如图1所示,主要包括信道编码解码、信号调制解调、光耦合器件、光放大器、光学收发天线以及捕获、对准和跟踪系统。它以激光器作为信号载体光源,经过信道编码和调制后,被光学天线放大并发射到无线信道中。经信道传播后,到达接收端被光学天线接收,随后被光学耦合模块耦合进单模光纤,再经前置放大器放大后,通过直接检测或相干检测技术转换为电信号,并进行解调、译码处理,从而完成信源到信宿的传输^[2]。

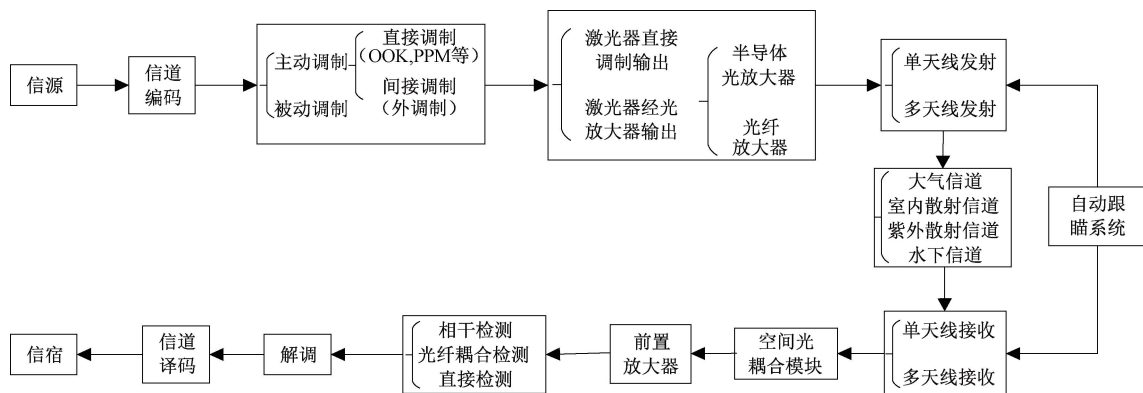


图1 无线光通信系统框图^[2]

Fig. 1 Block diagram of optical wireless communication system^[2]

基于上述系统模型,本文将从信源、信道和信宿三方面对其中引入的各类典型噪声进行逐一分析。文中主要聚焦于近地面无线激光通信系统中的噪声模型研究,在此背景下,信源主要指的是激光器,信道主要是指大气信道,而信宿主要指的是光电探测器。将系统中的典型噪声以统一框图形式表示,可直观地了解系统内部噪声分布情况,如图2所示。以下噪声的成因,机理以及相关噪声模型,都将在之后的各章中详细阐述。

2 信源噪声及噪声模型

2.1 研究进展

受外部和内部因素影响,固体激光器中都会存在强度噪声和相位噪声,常规激光器的噪声可以通过速率方程理论和一阶微扰法计算。然而,在考虑到量子噪声因素时,现有模型的准确性还不够高。为了深入分析激光

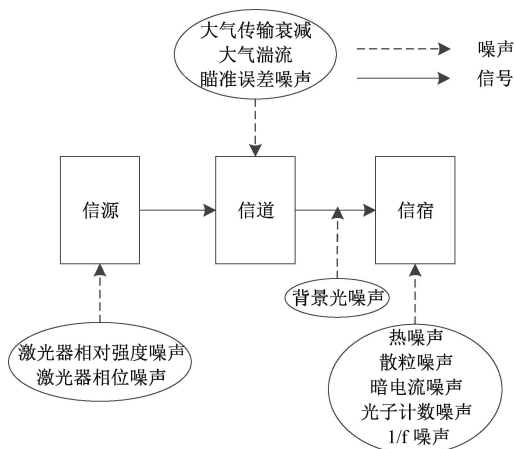


图2 无线光通信系统中噪声分布

Fig. 2 Noise distribution in optical wireless communication systems

器噪声,国内外学者对此进行了许多研究。

2005 年,Gensty 等^[3]提出了一种新的 RIN (relative intensity noise) 半经典模型,该模型解释了安静泵浦条件下量子级联激光器和带间半导体激光器的强度噪声特性以及不同的标度行为,预测了实验中观察到的 RIN 功率依赖性。

2006 年,Shi 等^[4]在饱和激光模型中,研究了量子噪声和泵浦噪声之间的相关性及其对激光强度波动的影响。

同年,李孝峰等^[5]首次分析了混沌光通信系统中激光器自发辐射噪声对系统同步和解码能力的影响。结果表明,该噪声对全同步影响较大,对系统解码性能影响不大。

2012 年,Horri 等^[6]推导了半导体自组装量子点激光器的噪声等效电路模型,该模型可直接计算出激光器与电子元件相结合的噪声,还可以解释非均匀展宽对激光器 RIN 的影响。

2014 年,Huynh 等^[7]构建了可调谐激光器的整个调频噪声谱,并通过实验证实了该模型的正确性。

2016 年,陈丹等^[8]推导了激光器非线性互调失真的数学表达式,得到了系统最佳调制指数与非线性系数之间的对应关系。

2017 年,Darman 等^[9]提出了一种新的紧凑型半导体激光器噪声等效电路模型,该模型具有单一解域,只需使用一个电路模型,就能研究激光器的静态、动态响应以及噪声特性。

2018 年,Dilazaro 等^[10]提出了一种用于分析调频连续波测距性能的激光相位噪声模型,该模型是在白噪声模型的基础上扩展的,仅考虑了激光器电流的稳态情况。

McDaniel 等^[11]提出了一种新的半导体激光器自发辐射噪声和载流子噪声的随机微分方程模型,该模型揭示了这两类噪声之间的强负相关性。

2019 年,白燕^[12]通过测量激光器的相位噪声与频率噪声,计算出激光器的输出线宽,解决了 2 μm 波段激光器线宽测量的难题。

同年,刘帆^[13]在研究中指出,理想相位噪声模型下的场谱、FM 噪声谱和相位差方差 3 种函数曲线都能有效反映相位噪声的大小。

2020 年,刘阳^[14]运用量子力学理论推导出了激光相对强度噪声的传递函数。

2021 年,Qi 等^[15]基于控制理论建立了双环光电振荡器单边带相位噪声模型,首次提出并引入了小信号直接调制下的激光频率噪声,使模型更加完整。

曲畅^[16]构建了单异质结和双异质结 HP-LDs 的噪声等效电路模型,并通过实验证明了该模型是有效的。

2022 年,刘家辰等^[17]构建了一个三模速率方程模

型,用于研究回音壁模式微腔激光器的噪声特性。结果表明,噪声随注入电流增大而明显减小。

2023 年,刘相宏等^[18]阐述了单纵模激光器中强度噪声的主要来源和产生机理,并开展了基于半导体光放大器的强度噪声抑制技术研究,实现了强度噪声的有效抑制。

综上可知,信源噪声模型的研究主要集中在以下几个方面:1) 新型激光器的噪声建模,从半导体激光器、可调谐激光器、蓝紫色 InGaN 激光器到单纵模激光器等。2) 模型的简化,研究人员倾向于采用更加简化且易于实现的模型来描述系统的噪声特性,以提高计算效率和实用性。3) 模型的完善,逐步考虑到了更多影响噪声的因素,如小信号调制、量子效应等,以更准确地描述噪声特性,使模型更加完整。

2.2 噪声模型

1) 激光器相对强度噪声模型

激光器内部光子生成的随机性会导致光功率的波动,产生相对强度噪声。当发射光束的平均功率为 P ,并被响应度为 ρ 和带宽为 Δf 的探测器接收时,那么探测器中电流均方值为^[4]:

$$\overline{i_{NL}^2} = RIN(\rho P)^2 \Delta f \quad (1)$$

激光器光强起伏引起的平均功率为:

$$\overline{P_{NL}^2} = \frac{\overline{i_{NL}^2}}{\rho^2} \quad (2)$$

可得激光器相对强度噪声为:

$$RIN = \frac{\overline{P_{NL}^2}}{P^2 \Delta f} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知,激光器相对强度噪声主要受光束平均功率和探测器带宽的影响。

在多模激光器中,主模增益会因侧模存在而减小,且主模的 RIN 高于总 RIN,因此传统的 RIN 模型并不适用。Mortazy E 推导出了具有非线性增益系数的多模半导体激光器 RIN 模型,可表示为:

$$RIN_T(\omega) = \frac{S_p(\omega)}{\bar{P}^2} = \frac{\sum_j \bar{i}_{ij}^2(\omega)}{(I - I_{th})^2} \quad (4)$$

式中: $S_p(\omega)$ 为光子噪声谱, \bar{P} 为光子总数, I 为注入电流, I_{th} 为阈值电流, i_{ij} 为第 j 个光学模式中的光子数。该模型证明了多模激光二极管的线宽随输出功率的减小而减小。

2) 激光器相位噪声模型

激光器的相位噪声主要包括两个方面:一是固有相位噪声,其产生机制根源于原子层面的自发辐射过程;二是载流子浓度随机波动引起的噪声^[12]。

常见的相位噪声表征形式有 FM 噪声谱 $S_f(f)$ 、场谱

$S(f)$ 、相位差 $\Delta\varphi_{\tau}(t)$ 以及相位误差方差 $\sigma_{\varphi}(\tau)^2$ 。其相互关系式如式(5)~(7)所示^[13]。

$$\Delta\varphi_{\tau}(t) = \varphi(t) - \varphi(t - \tau) \tag{5}$$

$$\sigma_{\varphi}(\tau)^2 = \langle \Delta\varphi_{\tau}(t)^2 \rangle \tag{6}$$

$$\sigma_{\varphi}(\tau)^2 = 4 \int_0^{\infty} \left(\frac{\sin(\pi f \tau)}{f} \right)^2 S_f(f) df \tag{7}$$

其中, $\varphi(t)$ 表示相位变化, τ 为时间间隔, $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均, f 代表频率。

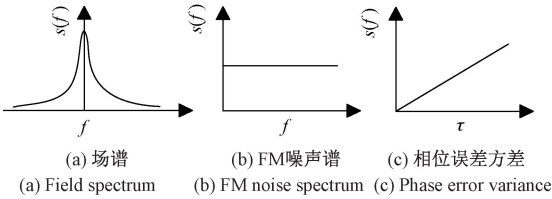


图 3 3 种相位噪声表征曲线^[13]

Fig. 3 Three types of phase noise characterization curves^[13]

图 3 为理想相位噪声模型下的 3 种表征曲线。在此模型下,场谱的 3 dB 谱宽常用来表征激光器线宽;FM 噪声谱表现为白噪声特性,它与激光器线宽的关系为:

$$S_0 = \frac{\Delta\nu}{\pi} \tag{8}$$

其中, S_0 为 FM 噪声谱的白噪声。相位误差方差函数的斜率与激光器线宽成正比:

$$\sigma_{\varphi}(\tau)^2 = 2\pi\Delta\nu\tau \tag{9}$$

综上所述,这 3 种曲线均能计算线宽并有效反映激光器的相位噪声特性。但实际情况下,相位噪声会偏离理想模型,引起场谱展宽,FM 噪声谱低频范围增强和相位误差方差随时间间隔变化偏离线性等问题。此时,鉴于频率噪声是相位噪声的微分,用它来描述相位噪声较为准确。

表 1 信源噪声模型总结表^[13]

Table 1 Source noise model summary table^[13]

噪声类型	具体模型	特点
激光器相对强度噪声	$RIN_r(\omega) = \frac{S_p(\omega)}{\bar{P}^2} = \frac{\sum_j \bar{i}_{L_j}^2(\omega)}{(I - I_{th})^2}$	多模激光器线宽随输出功率减小而减小,但非线性效应可能会影响模型准确度
	场谱	具有洛伦兹线性,依赖于测量时间,测量时间间隔足够短时才能测量,随着测量时间延长,洛伦兹谱的中心频率会发生漂移,此时便不适用于测量相位噪声
激光器相位噪声	FM 噪声谱	能得到更加全面的相位噪声信息,但实际情况中,FM 噪声谱不一定是平坦的,需要注意低频区域的特性
	相位误差方差	理想相位噪声模型下,与信号时间间隔呈线性关系,但实际情况中,可能会偏离线性

3 信道噪声及噪声模型

3.1 研究进展

无线光通信面对的最大挑战来自于大气信道,大气中的压强、风速和温度变化会导致大气折射率波动,产生大气湍流。激光在传输过程中受湍流影响出现散射、漂移等现象,会影响通信链路性能。此外,背景光噪声、瞄准误差等其他环境因素造成的干扰也会给系统性能带来负面影响。因此,对信道中的噪声及其模型的研究,一直是众多专家学者研究的重点。

2005 年, Kiasaleh 等^[19] 分析了弱湍流(晴朗空气)场景和负指数分布的接收信号强度情况,给出了脉冲位置调制情况下的数值结果,以阐明湍流对整体性能的影响。2006 年,程永强等^[20] 对 CO₂ 激光大气传输特性进行了全面分析,结果表明,与其他红外波段激光相比,CO₂ 激光的传输性能较差,但其具有极佳的透雾性能。

2007 年,许祖兵^[21] 给出了霾、雾、云、雨、雪等环境下

辐射衰减的理论公式与经验公式。2008 年, Zilberman 等^[22] 提出了一个随高度变化的 non-Kolmogorov 湍流谱模型,但该模型仅考虑了湍流频谱的惯性区间,未描述小尺度和大尺度湍流对光波传播的影响。

2010 年, Golbraikh 等^[23] 对比分析了 Kolmogorov 和 non-Kolmogorov 湍流对激光通信链路的不同影响。2011 年, Jurado 等^[24] 提出了 Malaga 湍流模型,通过调整其模型参数,可转化为其他湍流统计模型。

2013 年, Barrios 等^[25] 用 Exponential Weibull 分布来描述湍流,它是在 Weibull 分布的基础上发展起来的,能很好地描述孔径平均效应下的弱、中、强湍流特征。

2014 年, Nistazakis 等^[26] 研究了无线光通信系统在用 Gamma-Gamma 分布或负指数分布建模的大气湍流信道上的误码率性能。

2015 年, Garrido 等^[27] 基于广义 K 分布,提出了一个新的 Malaga 分布的数学公式,该公式比原来的公式更为简洁。2016 年,柯熙政等^[28] 对无线光通信系统中的大气湍流模型进行总结,对比分析了对数正态分布、双

Gamma 分布等模型的概率密度函数特性。

2017 年,范新坤等^[29]构建了一个天空背景光噪声模型,并结合理论分析与仿真得出结论:天空背景光会导致跟踪单元精度降低,并增加通信误码率。2019 年,王晨昊^[30]推导了 Tikhonov 分布相位噪声模型的概率密度函数,并通过仿真得出结论:在低相位噪声偏差情况下,相位噪声模型可用高斯分布来描述。

2020 年,傅玉青等^[31]对 UOWC (underwater optical wireless communication) 系统进行了模拟研究,分析了海洋湍流参数和瞄准误差对平均误码率和中断概率的影响。同年,王璐甲^[32]对水下光传播特性进行建模,分析了光吸收和散射带来的衰减及背景噪声对能源消耗的影响。

2021 年,Xu 等^[33]在不同噪声下比较了对数正态和 Gamma-Gamma 信道模型下的系统性能。结果表明,通过调整参数来抑制噪声以及选择适当的调制方式均能使系统性能得到改善。同年,柯熙政等^[34]提出了一个车联网夜间可见光通信的背景光噪声模型,该模型是基于双高斯函数建立的,与实际情况相当符合。Zhai^[35]推导了具有各向异性倾斜角的水平和卫星链路的 non-Kolmogorov 谱模型,并通过计算得出结论:链路闪烁指数随各向异性倾斜角和方位角的变化而变化。

2023 年,李征等^[36]对各种大气湍流谱模型的理论和构建进行了系统分析,并详细介绍了在实际研究中所采用的大气湍流模型。同年,柯熙政等^[37]推导了大气湍流乘性噪声模型,并进行了实验测量研究。结果表明:按照晴天、雾霾天、雪天、小雨、中雨、大雨及阴天的顺序,光强信号衰落概率逐渐变大。

综上可知,信道噪声模型的研究涉及了大气衰减和大气湍流等重要内容,主要关注以下几个方面:1) 不同天气条件下的信道衰减,如雨、雾、雪等;2) 不同湍流强度下的信道衰减,如弱、中、强湍流等;3) 针对不同湍流类型的研究,从经典的 Kolmogorov 湍流到更符合实际大气情况的 no-Kolmogorov 湍流模型;4) 考虑了多种信道类型,包括大气信道、水下信道、紫外散射信道等。然而,现有的相关模型都离不开进一步的完善和简化,以便更准确地描述大气信道特性,适应不断变化的大气环境。

3.2 噪声模型

1) 大气传输衰减

激光通过信道时,信道内的气体分子、微粒以及各种气象条件等因素,会吸收部分光辐射能量,并将其转化为不同的能量形式。另有部分能量发生散射,偏离原传播方向。吸收与散射的总体作用表现为传输光辐射强度的减弱。其表达式为^[20]:

$$I_l = \exp[-c(\lambda)L] \quad (10)$$

式中: $c(\lambda)$ 为衰减系数, L 为信号光传输的距离。

2) 大气湍流

大气湍流会导致光信号的光强发生衰减和闪烁。因此,可用光强闪烁概率密度函数模型用来描述和量化大气湍流对系统的影响。下面分别介绍几种典型模型。

(1) 对数正态分布模型

对数正态分布模型假定光强的自然对数符合正态分布,该模型较为简单,其概率密度函数可表示为:

$$f_I(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I^2 I} \exp\left\{-\frac{\left[\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) - E[I]\right]^2}{2\sigma_I^2}\right\} \quad (11)$$

式中: I 代表接收到的光强, I_0 表示受湍流影响前的接收光强, σ_I^2 表示对数光强方差。

不同 σ_I^2 下的对数正态分布的光强概率密度曲线如图 4 所示。从图中可以观察到,随着 σ_I^2 的增大,曲线近似效果逐渐变差。因此,对数正态模型主要适用于描述弱湍流情况下的光强闪烁。

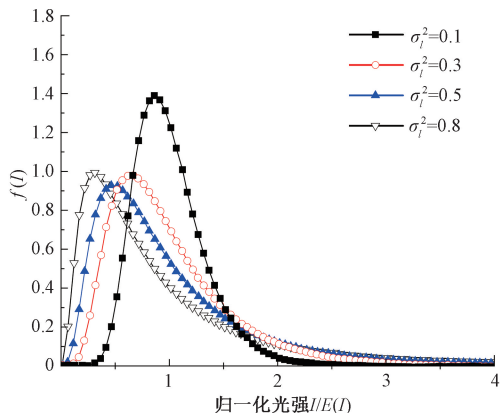


图 4 对数正态分布光强概率密度函数曲线^[28]

Fig. 4 Logarithmic normal distribution light intensity probability density function curve^[28]

(2) Γ - Γ 模型

由于对数正态分布对强湍流不太适用,为使光强闪烁统计模型在湍流范围内更具有适应性,Andrews 运用修正 Rytov 理论,提出了 Gamma-Gamma 模型,其概率密度函数可表示为:

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad (12)$$

式中: $K_n(\cdot)$ 为 n 阶第二类修正贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数, α β 是用来表示大尺度、小尺度涡流特性的两个参数,表示为:

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1 + 0.65d^2 + 1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1}$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51\sigma_l^2(1 + 0.69\sigma_l^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0.9d^2 + 0.62d^2\sigma_l^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

(13)

式中： $\sigma_l^2 = 1.23C_n^2k^{7/6}L^{11/6}$ 即 Rytov 方差， $d = (kD^2/4L)^{1/2}$ ，而 k 为波数， λ 为波长， D 为接收机孔径直径， L 为光束传输距离， C_n^2 是折射率结构常数。

相比于对数正态分布模型， Γ - Γ 分布模型的适用范围更广，可用于描述弱到强湍流下的光强变化。

(3) 负指数分布模型

对于链路长度达到几公里的强湍流情况下，光强起伏概率分布接近于负指数分布，其表达式为：

$$f(I) = \frac{1}{I_0} \exp \left(-\frac{I}{I_0} \right)$$

(14)

式中： $I_0 = E(I)$ 为平均光强值。在饱和状态下，闪烁指数 $\rightarrow 1$ ，负指数分布光强概率密度函数如图 5 所示。

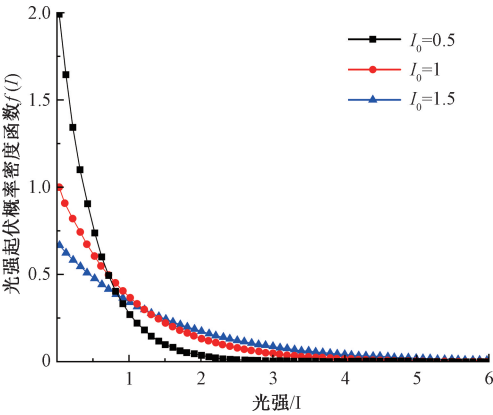


图 5 负指数分布光强概率密度函数^[28]
Fig. 5 Negative exponentially distributed light intensity probability density function^[28]

(4) K 分布模型

K 分布模型可以很好地描述中强湍流情况下的光强闪烁，其概率密度函数为：

$$f_I(I; \alpha_K) = \frac{2\alpha_K}{\Gamma(\alpha_K)} (\alpha_K I)^{(\alpha_K-1)/2} K_{\alpha_K-1}(2\sqrt{\alpha_K I})$$

(15)

式中： α_K 是一个与离散散射体的有效数量相关联的信道参数，它与 σ_I^2 的关系为：

$$\alpha_K = \frac{2}{\sigma_I^2 - 1}$$

(16)

由式(16)可知，光强闪烁指数 σ_I^2 仅与信道参数 α_K 有关，并且在强湍流条件下，随着 α_K 的增大，湍流强度逐渐减小。

(5) Malaga 分布模型

Malaga 分布是一种通用模型，可通过对其中参数的变换来表征不同强度的湍流分布。其概率密度函数表达

式如式(17)~(20)所示^[30]。

$$f_I(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}} \right)$$

(17)

$$A = \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\gamma^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\gamma\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}}$$

(18)

$$a_k = \frac{(\beta-1)}{(k-1)} \frac{(\gamma\beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}}}{(k-1)!} \left(\frac{\Omega'}{\gamma} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}}$$

(19)

$$\Omega' = \Omega + 2\rho b_0 + 2\sqrt{2b_0\Omega\rho} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$$

(20)

式中： α 为正实参数，与大尺度湍流因子相关； β 是表示衰落量的参数；参数 Ω' 为相干平均光功率； γ 为接收机信噪比； ρ 为耦合到视距的散射光功率与总光功率的比例； φ_A 与 φ_B 分别代表大气湍流信道中光波的视距传播分量和传播耦合分量的相位。Malaga 分布光强起伏概率密度函数曲线如图 6 所示，通过对其设置相应的 α 和 β 等参数，可以得到 log-normal 分布模型、Gamma-Gamma 分布模型以及 K 分布模型等大气湍流模型。

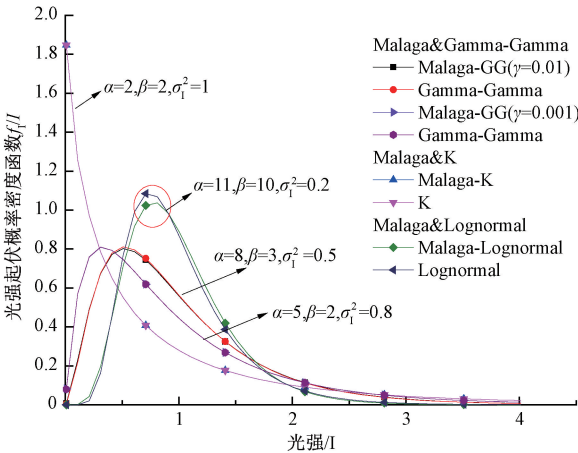


图 6 Malaga 分布光强起伏概率密度函数曲线^[30]
Fig. 6 Probability density function curve of Malaga distribution light intensity fluctuation^[30]

表 2 光强闪烁统计模型分类表
Table 2 Classification of light intensity scintillation statistical models

信道模型	适应湍流范围
对数正态模型	弱湍流
Γ - Γ 模型	弱、中、强湍流
K 分布模型	中、强湍流
负指数分布模型	强湍流
Malaga 分布模型	弱、中、强湍流

3) 瞄准误差噪声模型

当光束在信道中传输时，由于光束扩展和光斑漂移等因素，接收机和发射机之间可能会产生失调，进而引起

系统的瞄准误差。设一束宽为 w_z 的光束到达距离发送端 z 处的接收端,接收孔半径为 R ,此时的瞄准误差可表示为^[31]:

$$h_p(r, z) = A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{z_{eq}}^2}\right) \quad (21)$$

$$A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2 \quad (22)$$

$$v = \frac{\sqrt{\pi} R}{\sqrt{2} w_z} \quad (23)$$

$$w_{z_{eq}}^2 = \frac{w_z^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)} \quad (24)$$

式中: h_p 为由瞄准误差引起的损耗, r 为径向偏离, A_0 为 $r=0$ 处接收到的功率分量; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数, v 为光束传输速率, $w_{z_{eq}}$ 为等效束宽。 r 符合瑞利分布,因此 h_p 的概率密度函数为:

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^{\gamma^2}} h_p^{\gamma^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (25)$$

式中: $\gamma = w_{z_{eq}}/2\sigma_s$, 其中 σ_s^2 表示接收端的等效方差。

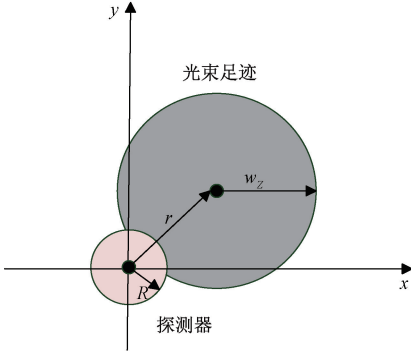


图 7 探测器和光束在接收平面上的偏移^[31]

Fig. 7 The offset of the detector and beam on the receiving plane^[31]

4) 背景光噪声模型

无线光接收机所接收到的除信号光以外的其他光源如太阳光、月光、和人造光源等所发射或反射的干扰光,被称为背景光噪声^[32],它会导致光电探测器的饱和与本底噪声增加,进而显著降低接收信号的信噪比。

背景光噪声采用黑体辐射模型描述,其函数公式为:

$$\omega(\lambda) = \frac{c^2 h}{\lambda^2} \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (26)$$

式中: c 为光速; h 为普朗克常数,数值为: $h = 6.626\ 069\ 3 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; λ 为波长; k 为玻尔兹曼常数,数值为: $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为辐射源的黑体温度。

2021 年,柯熙政等提出了一个车联网夜间可见光通信的背景光噪声模型,该模型是基于双高斯函数建立的,即柯氏模型,其表达式为^[34]:

$$f(I) = A_1 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_1} \times e^{\left[\frac{(I-\mu_1)^2}{2 \times \sigma_1^2}\right]} + A_2 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_2} \times e^{\left[\frac{(I-\mu_2)^2}{2 \times \sigma_2^2}\right]} \quad (27)$$

式中: A_1 和 A_2 为归一化修正系数,取值范围在 $0 \sim 1$, 使 $\int_0^{+\infty} f(I) = 1$; μ_1 是车辆当前位置下路灯光强闪烁均值; σ_1 是车辆当前位置下路灯光强闪烁方差; μ_2 是其他光源的光强闪烁均值; σ_2 是其他光源的光强闪烁方差。Ke's 模型的概率密度函数曲线如图 8 所示,图中高斯曲线 1、2 分别表征光强起伏较弱和光强起伏较强时的噪声模型。该模型与实际情况相符合,可用于表征不同区域和不同天气下的车联网可见光通信中的环境噪声。

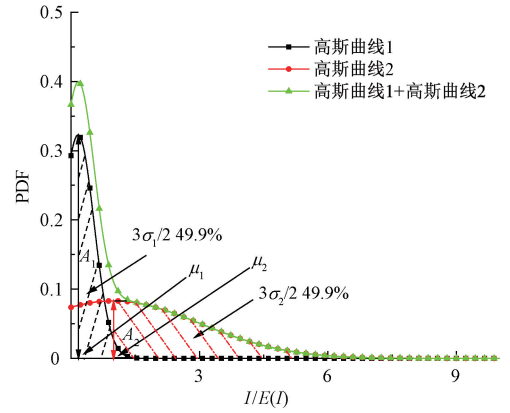


图 8 柯氏噪声模型^[34]

Fig. 8 Ke's noise model^[34]

4 信宿噪声及噪声模型

4.1 研究进展

无线光通信系统中的信宿噪声源于光接收器件的非理想性质,主要包括热噪声、散粒噪声、暗电流以及 $1/f$ 低频噪声等。噪声会严重干扰光电转换过程和降低系统信噪比,因此有必要对其中的噪声展开定量计算。

2005 年,包军林等^[38]构建了光电耦合器件在电力作用前后的 $1/f$ 噪声定量分析模型,该模型能够敏感反映应力对器件不同区域的损伤。

2007 年,高新江等^[39]推导出了 APD(avalanche photo diode)内部暗电流特性以及过剩噪声等数值结果,模拟结果与实际器件特性测量结果相符合。

2008 年,王晓颖^[40]对无线光通信系统中的散粒噪声、热噪声和背景噪声等进行建模,并对系统各部分的传输性能、保密性能等重要指标做了定性分析。

2009 年,Carbone 等^[41]通过分析电子漂移速度与探测器电压的关系修正了暗电流模型,这种改进模型能准

准确预测暗电流,且计算更简便。

2012 年,吴少兵等^[42]详细阐述了磁阻传感器的 $1/f$ 噪声模型,并搭建了 $1/f$ 噪声测试平台,验证了磁屏蔽系统对环境磁场具有较好的屏蔽作用。Ramesh 等^[43]在考虑量子力学效应的前提下,首次对纳米 FinFET 光电探测器的噪声行为进行了建模分析。结果表明,该探测器的噪声特性取决于器件参数和入射光功率的大小,通过适当调整工作频率,可使噪声行为与入射光功率无关。

2013 年,Kharraz 等^[44]从带宽、增益、消光比、散粒噪声等方面对光通信系统中常用的光电探测器性能进行了分析。同年,徐浩然等^[45]分析了紫外光通信中的电路板热噪声和光电倍增管暗电流噪声的时域和频域特性。陈文豪^[46]通过推导和实验验证了 PbS 多晶薄膜光导型红外探测器的 $1/f$ 噪声模型和 G-R 噪声模型。然而,选取的噪声参数较为单一,未能深入研究噪声的影响。刘红梅等^[47]通过研究微纳尺度电子传输对激发能的影响,构建了暗电流噪声模型,该模型与探测器的实际工作机制更为吻合。

2014 年,金露凡^[48]对长期老化后的 InGaAs 探测器噪声模型公式进行修正,得到了探测器在无光照条件下的本底噪声演化规律。然而,尚未研究探测器在光输入条件下的长期噪声演化情况。

2018 年,王政^[49]提出了一个量子点红外探测器暗电流模型,发现暗电流与温度、量子点密度和量子点侧面尺寸有关。该模型是在近乎理想的黑暗条件下建立的,仅考虑了部分关键参数,需要进一步完善。

2020 年,Gansen E 等^[50]探讨了量子点场效应晶体管中 $1/f$ 噪声的来源,给出了 $1/f$ 噪声模型。2021 年,Mahmoudi 等^[51]对时间门控 SPAD (single photon avalanche diode) 的击穿电压、暗计数和后脉冲噪声机制进行了有效表征和建模。

2023 年,柯程虎等^[52]对各类探测器的散粒噪声、 $1/f$ 噪声和热噪声等进行阐述,并给出了相应数学模型。刘惠等^[53]分析了宽带光电探测器中电子学噪声和信号噪声的输出特性。结果表明,光电流信号较强时的电子学噪声影响可忽略不计。然而,当信号较弱时,噪声影响不容忽视。

无线光通信系统中信宿噪声模型的研究主要集中在新型探测器建模和模型完善两方面,并通过理论分析和实验验证,不断优化和调整模型参数,提高噪声模型的适用性和准确性。这些研究为光通信系统中的信宿噪声问题提供了重要的理论基础和技术支持,有助于系统性能的提升和优化。

4.2 噪声模型

1) 热噪声模型

热噪声是对光电探测器性能影响最为严重的一类噪

声,其主要源于电阻内电子或电荷载流子的无规则运动^[40]。1928 年,约翰逊首先提出了这一概念,此后奈奎斯特利用热力学方法导出了其功率谱密度表达式为:

$$S(f) = 4kTR \quad (28)$$

式中: T 为温度, k 为玻尔兹曼常数, R 为电阻。

由式(28)可知,热噪声功率谱密度仅与温度和电阻值有关。然而,如果噪声的频率范围无限扩展,那么电阻的热噪声功率理论上会趋向于无限大,这是不现实的。因此,式(28)只适用于电子能量遵循玻尔兹曼分布的热平衡状态。此时,运用量子理论进行计算可以得到更准确的热噪声表达式为:

$$S(f) = \frac{4hfR}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (29)$$

式中: h 为普朗克常数,改进后的公式考虑了电子在能带中离散的能量状态和由于热激发引起的非平衡分布,更能准确地描述现代微电子器件中的噪声。

2) 散粒噪声模型

散粒噪声主要来源于载流子经过势垒时的随机运动。1918 年,肖特基在热阴极电子管中观察到了散粒噪声,其功率谱密度表示为^[44]:

$$S_I(f) = 2eI \quad (30)$$

式中: I 为平均直流电流, e 为电子电荷。

散粒噪声的数学模型具有随机性、耗散性和可加性的特点,其表达式为:

$$q(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} u_i h(t - \tau_i) \quad (31)$$

式中: t 为时间, q 为总效果, u_i 表示第 i 个颗粒的冲击幅度, τ_i 表示第 i 个颗粒到达系统的时刻, h 代表衰减函数, $N(t)$ 表示在 t 时刻之前,冲击系统的颗粒总数为 N 。

3) 暗电流噪声模型

暗电流是在无外部光照条件下,半导体器件内部少数载流子自发产生并通过结区流动导致的。它主要由载流子复合电流、扩散电流和表面漏电流等构成,可表示为^[45]:

$$\langle i_D^2 \rangle = 2q(I_D + I_L) \cdot \Delta f \quad (32)$$

式中: I_D 为暗电流, I_L 为漏电流。

目前,关于暗电流模型的研究主要集中在量子点红外探测器中,这类探测器的暗电流本质上由内部电子的完整传输过程决定。基于此,刘惠春等构建了一个暗电流模型,并通过计算势垒内移动的载流子数来估计探测器暗电流,其表达式为^[47]:

$$\langle j_{\text{dark}} \rangle = evn_{3D} \quad (33)$$

式中: e 代表电子电荷, v 代表电子漂移速度, n_{3D} 代表电子三维密度。如果不考虑扩散的影响,可以通过式(34)来计算电子密度:

$$n_{3D} = 2 \left(\frac{m_b kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_a}{kT} \right) \quad (34)$$

其中, m_b 为电子有效质量, k 为玻尔兹曼常数, T 是温度, \hbar 为归一化普朗克常数, E_a 是激发能。

上述模型仅考虑了微米级别的电子,而在实际探测器中,纳米级别的电子传输同样对暗电流具有重要影响,因此需要进一步完善。电子完整传输过程的激发能可表示为:

$$E_0 = E_{a,micro} + E_{a,nano} \quad (35)$$

式中: $E_{a,micro}$ 和 $E_{a,nano}$ 代表微米尺度、纳米尺度电子传输过程的激发能。

$$E_{a,micro} = E_{0,micro} \exp(-E/E_0) \quad (36)$$

$$E_{a,nano} = E_{0,nano} - \beta E \quad (37)$$

其中, E 是整个探测器设备的电场强度, $E_{0,micro}$ 和 $E_{0,nano}$ 为零偏置电压下探测器微米级和纳米级传输的激发能, E_0 和 β 分别描述微米级和纳米级电子过程中激发能随电场强度变化的速度。

将式(35)~(37)代入式(33),可得量子点红外探测器的暗电流密度表达式^[47]为:

$$\langle j_{dark} \rangle = 2ev \left(\frac{m_b kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_{a,micro} + E_{a,nano}}{kT} \right) \quad (38)$$

改进后的模型综合考虑了纳米级和微米级电子传输对暗电流的影响,与量子点红外探测器的实际工作机制更为吻合。

4) 光子计数噪声模型

当光子撞击二极管表面时,其引发的雪崩效应将导致高电流的产生,从而完成一次光子计数。但是,接收光子时可能会引入暗计数和后脉冲等错误信号,导致输出波形质量下降、不够理想。

(1) 暗计数噪声

暗计数是光电探测器在没有外部光信号的情况下自发产生的计数现象,主要由探测器内部噪声如暗电流引起,不利于执行单光子计数。其输出电荷期望值 N_{dc} 可表示为:

$$N_{dc} = r_{dc} \cdot \Delta t \quad (39)$$

其中, r_{dc} 为暗计数率, Δt 表示输出信号的持续时间。

(2) 后脉冲噪声

在探测器探测光子的过程中,一些电子空穴对可能会被带电载流子临时占用,导致输出脉冲与延迟电信号分离,形成后脉冲现象。单次放电过程中产生的后脉冲数量的概率分布可由泊松分布表征^[51]:

$$Pa(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda^i}{i!} \cdot e^{-\lambda} \cdot \frac{i}{\tau} e^{-t \cdot i/\tau} \quad (40)$$

其中, i 代表光子数目, λ 代表触发雪崩后延迟载流的平均数量, τ 代表载流子扩散的时间常数。

在光子计数模型中,一般假定探测光子在时空上均

匀分布,因此光子数在单位时间内的概率分布符合泊松分布为:

$$P(Y) = \frac{(\alpha \tau)^Y \exp(-\alpha \tau)}{Y!} \quad (41)$$

$$\alpha = \frac{\eta P_0}{\hbar \bar{\nu}} \quad (42)$$

式中: Y 为光子数, α 为系数, η 为量子效率, P_0 为入射光功率, \hbar 为普朗克系数, $\bar{\nu}$ 为准单色光的平均光频率, $!$ 代表阶乘。

5) 1/f 噪声模型

1/f 噪声普遍存在于许多电子器件中,它与载流子的随机运动和缺陷态之间的相互作用有关,会影响器件性能。其表达式为^[52]:

$$S(f) = \frac{AI^\beta}{f^\gamma} \quad (43)$$

其中, I 是电流, β 为电流因子, f 为频率, γ 为频率指数, A 是器件结构特性决定的常数。

目前,1/f 噪声理论还不够成熟,两个被广泛认可的 1/f 噪声的物理模型分别是 McWhorter 提出的表面载流子数波动模型和 Hooge 提出的迁移率波动模型。然而,它们对某些实验现象的解释还存在局限性。具体模型如下:

(1) 载流子数涨落模型

该模型是目前普遍认可的解释半导体器件中 1/f 噪声的一种模型。此模型指出,1/f 噪声的产生是由于电荷传输区的载流子在表面氧化层中隧穿和陷入陷阱态时所发生的随机电荷交换导致的。若载流子陷阱具有单一时间常数 τ , 那么填充这一陷阱的载流子数量波动将遵循洛伦兹谱,其表达为:

$$S_N(f) = 4\Delta N^2 \frac{\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2} \quad (44)$$

其中, $\overline{\Delta N^2}$ 代表载流子数量波动的均方值。

(2) 迁移率涨落模型

Hooge 等在总结了各类金属和半导体中 1/f 噪声的测量结果后,给出了描述 1/f 噪声的经验公式^[52]:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = \frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{\alpha_H}{fN} \quad (45)$$

式中: R 是电阻; α_H 是 Hooge 常数; N 表示载流子总数。该公式提供了一个用来量化比较不同材料和器件中 1/f 噪声特性的有用工具,并且常数 α_H 具有普适性。

经过长期研究,目前公认的观点是:在大多数半导体材料和电子设备中,存在两种并行的 1/f 噪声机制。其中,表面载流子数量变化引起的 1/f 噪声可以通过改进工艺流程和优化设备结构来有效降低至忽略不计的程度。而此时,迁移率涨落则会成为 1/f 噪声的主要来源。

表 3 信宿噪声模型总结表
Table 3 Host noise model summary table

噪声类型	具体模型	特点
热噪声	$S(f) = 4kTR$	只适用于电子能量遵循玻尔兹曼分布的热平衡状态
	$S(f) = \frac{4h f R}{e^{\frac{h f}{k T}} - 1}$	考虑了电子能量的非平衡状态,更能准确描述现代微电子器件中的噪声
散粒噪声	$q(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} u_i h(t - \tau_i)$	较为全面地描述了系统的响应过程,引入衰减函数使模型更加贴近实际情况
暗电流噪声	$\langle j_{dark} \rangle = evn_{3D}$	计算势垒内的移动载流子数来估计探测器暗电流,仅考虑了微米级电子的影响
	$\langle j_{dark} \rangle = 2ev \left(\frac{m_0 k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_{a,micro} + E_{a,nano}}{k T} \right)$	综合考虑了纳米级和微米级电子对暗电流的影响,与量子点红外探测器的实际工作机制更为吻合,提高了计算精度
光子计数噪声	$P(Y) = \frac{(\alpha \tau)^Y \exp(-\alpha \tau)}{Y!}$	假定探测光子在时空上均呈均匀分布的条件下得到的,在特定情况下可能需要额外修正和调整
1/f 噪声	$S_N(f) = 4\Delta N^2 \frac{\tau}{1 + (2\pi f \tau)^2}$	目前普遍认可的一种解释半导体中 1/f 噪声的模型
	$\frac{S_I(f)}{I^2} = \frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{\alpha_H}{fN}$	可用于量化比较不同材料和器件中的 1/f 噪声特性,且常数 α_H 具有普适性。

5 噪声抑制技术

随着光通信、激光雷达等领域的快速发展,对无线通信系统性能的要求不断提高,因此噪声抑制显得尤为重要。有效的噪声抑制技术可以显著提高系统信号的质量和稳定性,从而满足行业对高精度、高可靠性的需求。下面将从信源、信道、信宿三方面介绍几种常用的噪声抑制技术。

5.1 信源噪声抑制

激光器的噪声抑制一般有 3 种方案:光电反馈、注入锁定和饱和吸收效应,示意图分别如图 9~11 所示。图 9 中,激光器的部分输出光会被光电探测器转换为电信号,经电路处理后,反馈到光强调制器上,从而实现噪声抑制。这种技术可以抑制低中频强度噪声,但会引入电学噪声;图 10 中,将低噪声主激光器的部分光信号注入到与其频率相近的从激光器中,随后,这部分光信号将会会在从激光器的谐振腔中得到放大,从而有效地降低激光器的噪声。然而,这种技术需要额外的主激光器,并且要求主激光器的谐振频率接近于从激光器;图 11 中,在饱和状态下,输入光功率的波动会因增益饱和效应而减小,起到抑制噪声的作用。这种技术可以抑制全频段噪声,但会引入自发辐射。因此,一般需要在光放大器后增加一个滤波器来滤除自发辐射。

上述 3 种方案各有优缺点,单独采用一种方案很难在全频段对噪声进行有效抑制。近年来,研究人员倾向于将各种方案相结合来抑制激光器噪声,以弥补不同方

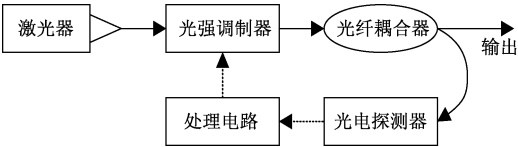


图 9 光电反馈抑制激光器噪声原理图^[54]
Fig. 9 Principle diagram of optoelectronic feedback suppression of laser noise^[54]

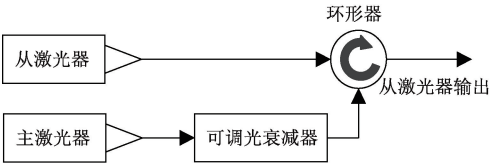


图 10 注入锁定抑制激光器噪声原理图^[54]
Fig. 10 Schematic diagram of injection locking to suppress laser noise^[54]



图 11 饱和光放大器抑制激光器噪声原理图^[54]
Fig. 11 Schematic diagram of saturated optical amplifier for suppressing laser noise^[54]

案的不足之处。

5.2 信道噪声抑制

无线光通信系统的信道主要受到大气吸收、散射和湍流效应的影响。目前,自适应光学技术和分集技术被

认为是最有前景的湍流效应抑制技术。

1) 自适应光学技术

自适应光学系统可分为有波前探测型和无波前探测型。有波前探测型系统中,激光器发射的光束受大气湍流影响产生波前畸变。波前传感器实时测量波前误差,并将数据传送给波前处理器^[55]。后者分析数据,计算出校正相位,并输出指令给波前校正器进行调整,从而校正畸变。这种系统校正精度高,但结构复杂、成本昂贵;无波前探测型系统中,光束首先聚焦在成像探测器上,随后系统对采集到的图像进行质量评价,并将评价得到的反馈量传送给波前处理器进行处理和分析。接着,波前校正器根据处理后的信息对光波进行实时校正,以减小大气湍流等因素的影响。这种系统结构简单、成本低,但校正精度相对较低。

2) 分集技术

分集技术通过多个信道接收到承载相同信息的多个副本,由于每个信道的传输特性不同,信号副本的衰落也不同。接收机利用多个副本包含的信息能比较正确的恢复出原发送信号,从而有效降低湍流引起的信号衰减和失真^[56]。常见的分集技术包括时间分集、频率分集、空间分集等。几种分集技术的具体对比如下:

表 4 常见分集技术

Table 4 Common diversity techniques

类型	优点	缺点
时间分集	无需增加发射功率	占用时隙资源、传输效率低
频率分集	抗干扰能力强	频谱利用率降低
空间分集	不需要降低频谱效率	系统成本增加

5.3 信宿噪声抑制

噪声会严重影响探测器的精度和灵敏度,因此研究和实施有效的噪声抑制技术对提高探测器性能至关重要。下面以 APD 为例,介绍两种典型的噪声抑制技术。

1) 温度控制

温度变化会直接影响探测器性能和噪声水平,通过精确控制探测器温度,可在一定程度上减少噪声。典型的温度控制系统包括差分放大电路、模拟 PID (proportional integral derivative) 电路、TEC (thermo-electric cooler) 驱动电路、温度传感器和 TEC 制冷器等模块。其基本工作原理是:热敏电阻首先将感知到的 APD 温度变化信息传送给差分放大电路中进行放大处理,处理后的信号会被输送至模拟 PID 控制电路中并计算出需要调整的加热/制冷功率,然后反馈给 TEC 驱动电路,从而调节 TEC 的制冷量,使 APD 管保持在稳定状态^[57]。温度控制系统具有良好的稳定性和可靠性,但建立和维护该系统增加了成本。

2) 门控无源抑制电路

尽管温度控制可以减少噪声,但无法完全消除后脉冲效应。为处理此问题,可以采用门控无源抑制电路。在门控模式下,只有当光子抵达 APD 时,偏置电压才会超过雪崩电压阈值,触发雪崩过程。随后,由于电阻 R_L 的作用,APD 上的电压会迅速下降直至低于击穿电压,雪崩随即停止,整个过程持续约几个 ns 时间。这种机制保护了 APD 免受损坏,并确保了门脉冲之间的时间间隔大于载流子的寿命,从而在一定程度上解决了后脉冲导致的暗计数问题^[58]。门控无源抑制电路设计简单、成本较低,便于实现和集成到现有系统中,但与温度控制系统相比,其抑制效果相对较差。

虽然上述两种方案存在一定的局限性和成本问题,但它们为优化光电探测器性能提供了有效途径。未来的研究应继续探索更多创新的噪声抑制方法,以满足不断提高的无线光通信系统性能要求。

6 结 论

无线光通信系统中的噪声模型是评估系统性能、优化参数和设计信号处理算法的关键工具。研究噪声模型可以帮助了解噪声对系统的影响,预测系统的性能极限,并提供指导系统设计和优化的方法。本文综述了国内外无线光通信系统在信源、信道和信宿 3 个方面的噪声模型研究进展,探讨了噪声的产生机理,并列出了相应的噪声模型,还总结了各类噪声的关键抑制技术。今后还有以下工作值得深入研究和讨论,目前的研究大多集中在单一种类的噪声上,如大气湍流、背景光等。未来需开发能够综合考虑多种噪声因素(包括但不限于大气湍流、背景光噪声、设备自身噪声等)及其交互作用的噪声模型,以更真实地模拟实际通信环境。利用机器学习和人工智能技术来分析大量的实际通信数据,从中学习噪声的特性,并预测在特定环境条件下的噪声行为,从而指导通信系统的优化。探索基于量子通信理论的噪声抑制方法。量子通信理论提供了一些独特的噪声抑制策略,如量子纠缠、量子随机编码等,这些方法可在一定程度上克服经典通信系统中存在的噪声问题,提高系统的抗干扰能力和安全性。因此,深入研究和应用量子通信理论有望为未来通信系统的设计和优化带来新的思路和方法。总的来说,无线光通信系统中的噪声模型研究是一个日益发展和拓展的领域。当前的研究已经取得了很大的成就,但未来的潜力和机会还有待研究者来发现和把握。

参考文献

[1] 安亚青,李文田. 无线光通信技术与应用分析[J]. 电力系统通信,2005,26(4):4-6.
AN Y Q, LI W T. Analysis of wireless optical

- communication technology and applications [J]. Power System Communication, 2005, 26(4): 4-6.
- [2] 杨尚君. 无线光相干通信中的自适应光学技术及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- YANG SH J. Adaptive optics technology and experimental research in wireless optical coherent communication [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [3] GENSTY T, ELSÄBER W. Semiclassical model for the relative intensity noise of intersubband quantum cascade lasers [J]. Optics Communications, 2005, 256(3): 171-183.
- [4] SHI B C, DONG C M. Statistical fluctuations in a saturation laser model with correlated noises [J]. Chinese Physics, 2006, 15(12): 2861-2866.
- [5] 李孝峰, 潘伟, 马冬, 等. 激光器自发辐射噪声对混沌光通信系统的影响 [J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5094-5104.
- LI X F, PAN W, MA D, et al. The impact of laser spontaneous emission noise on chaotic optical communication systems [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5094-5104.
- [6] HORRI A, MIRMOEINI S Z, FAEZ R. The noise equivalent circuit model of quantum-dot lasers [J]. Journal of Russian Laser Research, 2012, 33(3): 217-226.
- [7] HUYNH T N, DÚILL S P Ó, NGUYEN L, et al. Simple analytical model for low-frequency frequency-modulation noise of monolithic tunable lasers [J]. Applied Optics, 2014, 53(5): 830-835.
- [8] 陈丹, 柯熙政, 张璐. 湍流信道下激光器互调失真特性 [J]. 光子学报, 2016, 45(2): 99-103.
- CHEN D, KE X ZH, ZHANG L. Distortion characteristics of laser intermodulation in turbulent channels [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 99-103.
- [9] DARMAN M, FASIHI K. A new compact circuit-level model of semiconductor lasers: Investigation of relative intensity noise and frequency noise spectra [J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(18): 1839-1845.
- [10] DILAZARO T, NEHMETALLAH G. Phase-noise model for actively linearized frequency-modulated continuous-wave laser [J]. Applied optics, 2018, 57(21): 6260-6268.
- [11] MCDANIEL A, MAHALOV A. Stochastic differential equation model for spontaneous emission and carrier noise in semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2018, 54(1): 1-6.
- [12] 白燕. 2 μm 波段激光线宽表征方法及单纵模掺铒光纤激光器研制与应用 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- BAI Y. Two μm characterization method of m-band laser linewidth and development and application of single longitudinal mode thulium doped fiber laser [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [13] 刘帆. 可调谐半导体激光器的相位噪声及其对相干通信系统的影响 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- LIU F. Phase noise of tunable semiconductor lasers and its impact on coherent communication systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [14] 刘阳. 1.06 μm 宽带调频低噪声固体激光器研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- LIU Y. 1.06 μm research on broadband frequency modulation low noise solid state laser [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [15] QI B, WANG H, ZHANG B, et al. Improvement of the phase noise model based on an optoelectronic oscillator using a directly modulated distributed feedback laser [J]. Optics Communications, 2021, 488(8): 126848-126848.
- [16] 曲畅. 高功率半导体激光器低频噪声产生机理及表征特性研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- QU CH. Mechanism and characterization characteristics of low-frequency noise generation in high-power semiconductor lasers [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [17] 刘家辰, 黄永箴, 郝友增, 等. 回音壁微腔激光器噪声特性数值模拟研究 (特邀) [J]. 光子学报, 2022, 51(2): 72-81.
- LIU J CH, HUANG Y ZH, HAO Y Z, et al. Numerical simulation study on noise characteristics of echo wall microcavity lasers (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2): 72-81.
- [18] 刘相宏, 张锐, 田小程, 等. 单纵模激光器强度噪声抑制技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 60-71.
- LIU X H, ZHANG R, TIAN X CH, et al. Research progress on intensity noise suppression technology for single longitudinal mode lasers [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(23): 60-71.
- [19] KIASALEH K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(9): 1455-1461.
- [20] 程永强, 谭荣清. CO₂ 激光的大气传输特性 [J]. 光电技术应用, 2006, 21(2): 9-13.

- CHENG Y Q, TAN R Q. The atmospheric transmission characteristics of CO₂ laser [J]. Application of Optoelectronic Technology, 2006, 21(2): 9-13.
- [21] 许祖兵. 激光大气传输特性分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- XU Z B. Analysis and research on laser atmospheric transmission characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [22] 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.
- [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] JURADO N A, GARRIDO B J M, PARIS J F, et al. A unifying Statistical Model for Atmospheric Optical Scintillation [M]. Rijeka: Intech, 2011.
- [25] BARRIOS R, DIOS F. Exponentiated weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45(3): 13-20.
- [26] NISTAZAKIS H E, STASSINAKIS A N, MUHAMMAD S S, et al. BER estimation for multi-hop RoFSO QAM or PSK OFDM communication systems over gamma gamma or exponentially modeled turbulence channels [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64(8): 106-112.
- [27] GARRIDO B J M, JURADO N A, PARIS J F, et al. Novel formulation of the M model through the Generalized-K distribution for atmospheric optical channels [J]. Optics express, 2015, 23(5): 6345-6358.
- [28] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- KE X ZH, DENG L J. Wireless Optical Communication [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [29] 范新坤, 张磊, 佟首峰, 等. 天空背景光对空间激光通信系统的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 102-110.
- FAN X K, ZHANG L, TONG S F, et al. The impact of sky background light on space laser communication systems [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2017, 54(7): 102-110.
- [30] 王晨昊. 无线光副载波调制相位噪声特性及补偿技术研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- WANG CH H. Research on phase noise characteristics and compensation techniques of wireless optical subcarrier modulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [31] 傅玉青, 段琦, 周林. Gamma Gamma 强海洋湍流和瞄准误差下水下无线光通信系统的性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 110-117.
- FU Y Q, DUAN Q, ZHOU L. Performance study of underwater wireless optical communication system with Gamma Gamma strong ocean turbulence and aiming error [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 110-117.
- [32] 王璐甲. 基于 UWOC 的静态节点自组网分簇算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- WANG L J. Research on static node self-organizing network clustering algorithm based on UWOC [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [33] XU Z, XU G, ZHENG Z. BER and channel capacity performance of an FSO communication system over atmospheric turbulence with different types of noise [J]. Sensors, 2021, 21(10): 3454-3454.
- [34] 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.
- KE X ZH, QIN H H, YANG SH J, et al. A night background light noise model for the visible light communication system of the internet of vehicles [J]. Journal of Radio Science, 2021, 36(6): 986-990.
- [35] ZHAI C. Anisotropic Non-Kolmogorov turbulence spectrum with anisotropic tilt angle [J]. Photonics, 2021, 8(11): 521-521.
- [36] 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.
- LI ZH, LIAO ZH W, LIANG J Y, et al. Research and prospects of atmospheric turbulence models [J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(3): 9-17.
- [37] 柯熙政, 廖志文, 梁静远, 等. 无线光通信中大气湍流噪声测量研究 [J]. 电波科学学报, 2023, 6(4): 1-13.
- KE X ZH, LIAO ZH W, LIANG J Y, et al. Measurement of atmospheric turbulence noise in wireless optical communication [J]. Journal of Radio Science, 2023, 6(4): 1-13.
- [38] 包军林, 庄奕琪, 杜磊, 等. 光电耦合器件闪烁噪声模型 [J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1359-1362.
- BAO J L, ZHUANG Y Q, DU L, et al. Flicker noise model of optocoupler [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(9): 1359-1362.
- [39] 高新江, 张秀川, 陈扬. InGaAs/InP SAGCM-APD 的器

- 件模型及其数值模拟[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 617-622.
- GAO X J, ZHANG X CH, CHEN Y. Device model and numerical simulation of InGaAs/InP SAGCM-APD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(5): 617-622.
- [40] 王晓颖. 图像无线光通信系统光接收机设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- WANG X Y. Design of optical receiver for image wireless optical communication system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [41] CARBONE A, INTROZZI R, LIU H C. Photo and dark current noise in self-assembled quantum dot infrared photodetectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2009, 52(6): 260-263.
- [42] 吴少兵, 陈实, 李海, 等. TMR 与 GMR 传感器 1/f 噪声的研究进展[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 552-561.
- WU S B, CHEN S, LI H, et al. Research progress on 1/f noise of TMR and GMR sensors[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 552-561.
- [43] RAMESH R, MADHESWARAN M, KANNAN K. Physical noise model of a uniformly doped nanoscale FinFET photodetector[J]. Optik, 2012, 123(12): 1087-1094.
- [44] KHARRAZ O, FORSYTH D. Performance comparisons between PIN and APD photodetectors for use in optical communication systems[J]. Optik, 2013, 124(13): 1493-1498.
- [45] 徐浩然, 左勇, 张文博, 等. 紫外光通信系统的噪声研究[J]. 光通信研究, 2013, 12(2): 65-69.
- XU H R, ZUO Y, ZHANG W B, et al. Research on noise in UV optical communication systems[J]. Optical Communication Research, 2013, 12(2): 65-69.
- [46] 陈文豪. 电子器件低频电噪声测试技术及应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- CHEN W H. Research on low frequency electrical noise testing technology and application of electronic components[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [47] 刘红梅, 杨春花, 刘鑫, 等. 量子点红外探测器的噪声表征[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 454-459.
- LIU H M, YANG CH H, LIU X, et al. Noise characterization of quantum dot infrared detectors[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(21): 454-459.
- [48] 金露凡. InGaAs PIN 光电探测器和 ASE 宽谱光源的老化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- JIN L F. Aging study of InGaAs PIN photodetectors and ASE broadband light sources [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [49] 王政. 基于量子点红外探测器暗电流模型研究[J]. 电子设计工程. 2018, 26(23): 89-93.
- WANG ZH. Research on dark current model of quantum dot infrared detectors[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(23): 89-93.
- [50] GANSEN E J, NICKEL T B, VENNER J M, et al. Sources of 1/f noise in QDOGFET single-photon detectors [J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2020, 118(1): 61-70.
- [51] MAHMOUDI H, HOFBAUER M, GOLL B, et al. Noise and breakdown characterization of SPAD detectors with time-gated photon-counting operation [J]. Sensors, 2021, 21(16): 5287-5287.
- [52] 柯程虎, 包晶, 梁静远, 等. 探测器及其噪声模型研究进展[J]. 光学技术, 2023, 49(3): 329-348.
- KE CH H, BAO J, LIANG J Y, et al. Research progress on detectors and their noise models [J]. Optical Technology, 2023, 49(3): 329-348.
- [53] 刘惠, 张卓, 凌志强, 等. 宽带光电探测器的仿真分析与实验研究[J]. 量子光学学报, 2023, 29(1): 54-61.
- LIU H, ZHANG ZH, LING ZH Q, et al. Simulation analysis and experimental research of broadband photodetectors[J]. Journal of Quantum Optics, 2023, 29(1): 54-61.
- [54] 邹萌, 肖何, 宋青果, 等. 短腔型超窄线宽低噪声光纤激光技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 25-42.
- ZOU M, XIAO H, SONG Q G, et al. A review of short cavity ultra narrow linewidth low noise fiber laser technology[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(15): 25-42.
- [55] 杨尚君, 柯熙政, 梁静远. 无线光相干通信智能信道均衡技术实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 131-139.
- YANG SH J, KE X ZH, LIANG J Y. Experimental study on intelligent channel equalization technology for wireless optical coherent communication [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 44(5): 131-139.
- [56] 秦欢欢, 王梦凡, 柯熙政. 工业互联网下的无线光通信研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 1-13.
- QIN H H, WANG M F, KE X ZH. Research progress of wireless optical communication under industrial Internet[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 1-13.
- [57] 姚友丹. 量子密钥分发系统中探测器制冷系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- YAO Y D. Research on detector cooling system in

quantum key distribution system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.

[58] 吕华,彭孝东. 单光子探测器 APD 的外围抑制电路设计[J]. 科技经济市场,2007,12(7):4-5.

LYU H, PENG X D. Design of peripheral suppression circuit for single photon detector APD[J]. Science and Technology Economic Market,2007,12(7):4-5.

作者简介



梁静远,2015 年于西安理工大学获得硕士学位,现为西安理工大学自动化与信息工程学院助理工程师,主要研究方向为无线光通信系统调制解调技术。
E-mail: ljj@ xaut. edu. cn

Liang Jingyuan received her M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015. Now she is an assistant engineer in the School of Automation and Information Engineering

at Xi'an University of Technology. Her main research interests in modulation and demodulation technology for wireless optical communication systems.



柯熙政(通信作者),1996 年于中国科学院大学获得博士学位,现为西安理工大学自动化与信息工程学院教授,俄罗斯自然科学院外籍院士,主要研究方向为无线光理论与技术。
E-mail: xzke@ 263. net

Ke Xizheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1996. Now he is a professor at the School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Foreign academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His main research interest includes theory and technology of optical wireless communication.