

刘雪¹ 陈健¹ 王萍¹ 马兆慧¹ 由骁迪¹ 吴媛媛² 符小东²

雾霾天气下 DAML 空间相干光通信系统的研究

摘要

大气湍流引起的折射率起伏会导致光信号的振幅和相位发生随机波动,同时日益严重的城市雾霾现象带来的系统性能降低问题也不可忽视。基于湍流相位波动和激光器相位噪声的缓慢时变特性,本文提出了将 DAML 相位估计算法应用到空间相干光通信系统中来提高系统性能,并推导了在大气湍流、激光器相位噪声以及各种天气状况衰减效应影响下,针对 DQPSK 信号的 DAML 相位估计系统的误码率,最后重点分析了在雾、霾天气条件下该系统的传输距离限制和波长选择特性。仿真结果表明:湍流相位波动造成的信噪比损失低于 0.1 dB;在雾和霾天气下,相较于传统的 OOK IM/DD FSO 通信系统,DAML 相位估计系统在不同的大气湍流环境中至少有 500 m 的传输距离优势;在霾和薄雾天气,传输波长为 1 550 nm 的 DAML 系统比波长为 850 nm 的系统的性能更优,但在能见度低于 200 m 的浓雾天气,系统性能基本与波长选择无关。

关键词

自由空间相干光通信;大气湍流;雾霾;判决辅助最大似然相位估计

中图分类号 TN929.12;TN911.7

文献标志码 A

收稿日期 2017-02-11

资助项目 江苏省科技支撑计划(BE2014855);国家自然科学基金(61271239)

作者简介

刘雪,女,硕士生,主要研究方向为自由空间光通信技术.15951935800@139.com

陈健(通信作者),男,博士,教授,主要研究方向为相干光通信和可见光通信.chenjian@njupt.edu.cn

0 引言

空间相干光通信因具备接收灵敏度高、克服背景噪声能力强、频谱利用率高等优点,在高速率、远距离、大容量数据通信上更具优势,是目前 FSO 通信的主要研究方向。然而激光信号经过大气信道时会受到大气湍流的影响而发生光强闪烁和相位波动,特别是对于基于相位调制的空间相干光通信系统,其性能将明显受到湍流相位波动和激光器相位噪声的限制。多数研究人员采用传统的自适应光学技术或光学锁相环(Optical Phase Lock Loop, OPLL)来抑制湍流波前相位波动,然而这两种方法都各有局限性。自适应光学相位补偿系统造价昂贵、相位估计速率慢,进行波前相位矫正后仍存在残余相位误差^[1],虽然通过模式相位补偿技术可以进一步减小残余相位误差^[2-3],但随着湍流强度的增加,其补偿效果会有所下降。OPLL 本身光器件的实现就比较复杂,与之相关的控制电路不易集成,并且反馈延迟较大,在高速率的空间相干光通信中很难实现稳定的工作^[4-5]。

泰勒的冻结-湍流理论^[6]指出,大气湍流的时间变化由垂直于信号传输方向的风速决定,并且湍流光强波动和相位波动的时间频率都在 1 kHz 量级以内,而目前空间相干光通信的数据传输速率通常在 100 Mbit/s~10 Gbit/s。因此大气信道可以近似为“冻结信道”,即可以认为大气信道在数个码元传输时间内保持不变。基于以上原因,本文提出将相干光纤通信系统中已成熟应用的判决辅助最大似然(Decision-Aided Maximum Likelihood, DAML)相位估计算法^[7-8]应用到空间相干光通信系统中来提高系统性能。

由于激光信号完全暴露在大气环境中传输,其传输质量对天气状况十分敏感,其中雾和霾对系统性能的影响尤为严重。大气中的雾滴和气溶胶颗粒对信号光有明显的散射作用,其造成的功率衰减和通信系统性能降低问题不可忽视。因此本文重点研究了在雾和霾天气条件下,基于 DAML 相位估计算法的空间相干光通信系统的误码性能,并推导出了该算法的相位估计误差和 DQPSK 信号的误码率。理论研究和蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)仿真结果表明 DAML 算法的应用可有效提高自由空间光通信系统的信号检测能力,并且相较于传统强度调制/直接检测(Intensity Modulated Direct Detection, IM/DD)系统,该系统在雾和霾天气状况下能够实现更远的通信距离。

1 南京邮电大学 通信与信息工程学院,南京,210003

2 中天宽带技术有限公司,南通 226463

1 系统和信道模型

1.1 系统模型

图 1 给出了基于 DAML 相位估计的空间相干光通信系统模型,该系统模型针对的是 M-PSK 差分编码信号,并且接收机采用零差检测方式.发射端通过对 M-PSK 信号差分编码将数据信息加载到光信号相位上.激光信号经过大气信道时,大气湍流效应使得信号的相位和光强产生随机波动,同时各种天气状况下的微粒散射效应还会造成功率衰减.为简化分析,本文做出如下假设:1) 调制器、准直设备、混频器等设备都工作在理想状态;2) 相干光接收机为点接收机.最后光信号到达接收端进行相干检测,接收信号先与本振光进行相干混频,然后混频信号经过光电转换和模/数转换之后合为一路离散信号,可简写为

$$r(i) = R\sqrt{P_s P_L I(i)} m(i) \exp[j(\theta_{\text{atm}}(i) + \theta_{\text{la}}(i))] + n(i), \quad (1)$$

式中 $m(i) \in \{C_d = \exp[j\varphi_d(i)]; \varphi_d(i) = \frac{2\pi d}{M}; d = 0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 是第 i 个符号的相位信息, R, P_s, P_L 分别表示光电检测器的响应度、发送信号光功率和本振信号光功率, $I(i)$ 是一个随机过程,表示大气信道对信号光功率产生的影响,包括大气湍流造成的光强波动和天气状况引起的功率衰减, θ_{atm} 是大气湍流引起的相位噪声, θ_{la} 是发送端和本振激光器总线宽引起的相位噪声, $n(i)$ 是光电二极管引起的散粒噪声,可视作均值为零、方差为 N_0 的高斯过程.

在大气信道干扰下,系统的比特信噪比可以表示为

$$\gamma_b = \frac{E[|m(i)|^2]}{E[|n_{\text{sh}}(i)|^2]} = \frac{E[|R\sqrt{P_s P_L I} m(i)|^2]}{N_0 \log_2 M} = I\gamma_{b0}, \quad (2)$$

γ_{b0} 为没有大气信道影响时的平均电比特信噪比.

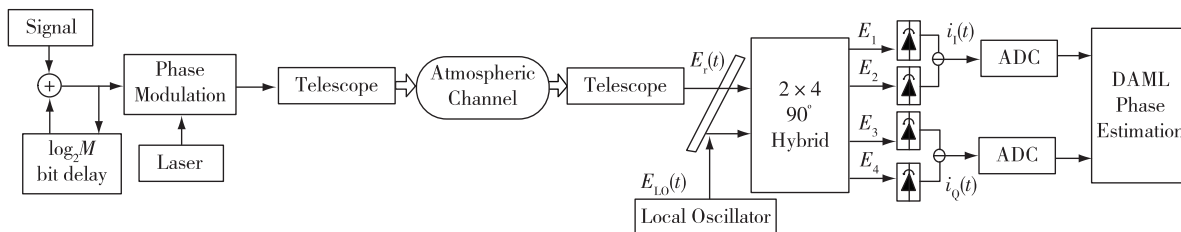


图 1 基于 DAML 相位估计的空间相干光通信系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of space coherent optical communication system with DAML phase estimation

1.2 相位噪声统计分布

Tatarskii 推导的微扰近似理论和近年来关于湍流相位波动的相关实验都表明^[9-10],大气湍流引起的相位波动近似符合均值为零的高斯分布,且相较于数据传输速率而言,相位噪声的时间变化十分缓慢,相干时间在 0.1~10 ms 之间.为了便于进行数学建模,本文采用了平面波传输模型,相位波动方差可简写为^[6]

$$\sigma_{\theta_{\text{atm}}}^2 = 0.64\sigma_R^2(z\kappa_0^2/k)^{-5/6}[1 - 0.39(z\kappa_0^2/k)^{5/6}], \quad (3)$$

式中 Rytov 方差 $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} z^{11/6}$ 通常作为大气湍流强弱的量度,其取值与波数 $k = 2\pi/\lambda$ 、大气湍流结构常数 C_n^2 和传输距离 z 有关, $\sigma_R^2 < 1$ 、 $\sigma_R^2 \cong 1$ 和 $\sigma_R^2 > 1$ 分别代表弱湍流、中度湍流和强湍流状态.另外式中 $\kappa_0^2 = 2\pi/L_0$, L_0 表示湍流外尺度.湍流相位波动的时间相关函数可表示为

$$R_{\theta_{\text{atm}}}(\tau) = 0.78C_n^2 k^2 z \kappa_0^2 (\kappa_0 v_{\perp} \tau)^{5/6} K_{5/6}(\kappa_0 v_{\perp} \tau), \quad (4)$$

式中 v_{\perp} 为垂直于链路方向的风速, τ 为时间间隔,因为相位波动的相干时间在毫秒量级,所以可以假设信号的相位波动在多个符号时间间隔内是不变的.

发射端激光器和本振激光器的相位噪声都是维

纳过程,可表示为 $\theta_{\text{la}}(k) = \sum_{m=-\infty}^k v(m)$, 其中 $v(m)$ 为独立同分布的高斯随机变量,其均值为零.假设两激光器的线宽 $\Delta\nu$ 相等,则总的激光器相位噪声 θ_{la} 服从均值为零的高斯分布,在符号间隔时间为 T 时的方差为

$$\sigma_{\theta_{\text{la}}}^2 = 2\pi(2\Delta\nu)T. \quad (5)$$

1.3 信道状态模型

若不考虑接收机指向误差,那么在大气湍流和各种天气状况影响下,该通信系统的信道状态可以表示为 $I = I_a I_1$, 其中 I_a 表示大气湍流引起的光强波动, I_1 表示各种天气状况造成的大气信道衰减.

根据指数 Beer-Lambert 定律^[11],信道衰减定义为

$$I_1 = e^{-\sigma z}, \quad (6)$$

式中, z 为链路传输距离, σ 为天气原因造成的大气消光系数, 其单位为 km^{-1} , 本文只考虑雾和霾两种天气状况. 雾是由浮游在近地面空气中的小水滴、冰晶组成的水汽凝结物. 霾则是由空气中大量的微小尘粒、烟粒或盐粒(统称气溶胶颗粒)悬浮而形成的浑浊现象. 由于雾滴、气溶胶颗粒的粒度分布特征很难测量, 它随气候条件的不同有较大的差异, 人们通常用大气能见度来预测雾和霾天气的衰减特性. 本文采用了更加准确的 Kim 模型^[11]来描述雾和霾天气消光系数与大气能见度的关系, 并将光功率衰减阈值设定为 2%. 表 1 给出了光波长为 1 550 nm 时不同天气状况下由的 Kim 模型计算出的衰减系数. 需要注意的是, 浓雾天气不存在强湍流现象^[12], 这是因为空气中悬浮的雾滴会大大减少空气中的不均匀成分.

表 1 光波长为 1 550 nm 时, 各种天气状态下的大气能见度与衰减系数

Table 1 Visibility and attenuation coefficients for various atmospheric conditions at 1 550 nm wavelength

天气状态	能见度/km	衰减系数 /(dB · km ⁻¹)
晴天	20	0.22
霾	6	0.73
薄雾	2	4.28
中雾	0.6	25.45
浓雾	0.2	84.70

本文假设大气湍流引起的光强波动的概率分布模型为 Gamma-Gamma 分布^[13], 该信道模型适用于所有湍流状态, 其概率分布如下:

$$f_{I_a}(I_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_a^{(\alpha+\beta)/2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_a}), \quad (7)$$

式中 $K_n(\cdot)$ 为 Bessel 函数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, α 和 β 分别表示大尺度涡旋元和小尺度涡旋元的有效数目, 在平面波情况下, α 和 β 可以表示为

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (9)$$

从表达式可以看出, α 和 β 的值由 Rytov 方差决定.

由于信道衰减因子 I_1 是确定的, 信道状态 I 的概率密度函数可以写为

$$f_I(I) = \left| \frac{d}{dI} \left(\frac{I}{I_1} \right) \right| f_{I_a} \left(\frac{I}{I_1} \right) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{I}{I_1} \right)^{(\alpha+\beta)/2} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta I} \right). \quad (10)$$

2 基于 DAML 相位估计的误码率分析

DAML 相位估计算法假设相位噪声在观测区间 (L 个符号时间长度) 内恒定不变, 然后根据当前符号的前 L 个符号的判决反馈信息来估计当前接收信号的相位, 其中 L 为记忆长度. 对于 M-PSK 信号, 可以通过引入参考相位矢量 $V(i)$ 来表示相位噪声:

$$V(i) = U^{-1}(i) \sum_{x=i-L}^{i-1} r(x) \hat{m}^*(x). \quad (11)$$

其中 $U(i) = \sum_{x=i-L}^{i-1} R\sqrt{P_s P_L I(x)} |\hat{m}(x)|^2$ 为参考相位的归一化因子, $\hat{m}^*(x)$ 为第 x 个接收符号判决信息的共轭. 然后通过去除相位噪声进行相位判决, 判决式为

$$q_1(i) = \text{argmax}_1 \text{Re}[r(i) V^*(i) C_1^*]. \quad (12)$$

对每一个信息符号 $m(i)$ 可能的相位信息 C_1 , 当 $\text{Re}[r(i) V^*(i) C_1^*]$ 取最大时, 判决 $m(i) = C_1$. 可以注意到, 在进行相位判决时符号的振幅信息 $R\sqrt{P_s P_L I(x)}$ 可以忽略, 这是因为 M-PSK 信号的幅度是恒定的, 光强变化对信号相位的判决没有影响.

将接收信号(1)代入到参考相位(11)中, 可以得到大气湍流与激光器带来的总的相位噪声的估计值:

$$\hat{\theta}(i) = \hat{\theta}_{\text{atm}}(i) + \hat{\theta}_{\text{la}}(i) = \text{arg}[V(i)] = \text{arg} \left[\sum_{x=i-L}^{i-1} \{ \exp[j(\theta_{\text{atm}}(x) + \theta_{\text{la}}(x))] + n'(x) \} \right], \quad (13)$$

式中 $n'(x) = n(x) / [R\sqrt{P_s P_L I} \hat{m}(x)]$, 其均值为零, 方差为 $\sigma_n'^2 = 1 / (I \gamma_{\text{lo}} \log_2 M)$. 经推导可以得到湍流相位噪声和激光器相位噪声引起的总的相位估计误差:

$$\Delta\theta(i) = \theta_{\text{atm}}(i) + \theta_{\text{la}}(i) - \hat{\theta}(i) = \theta_{\text{atm}}(i) - \frac{1}{L} \sum_{x=i-L}^{i-1} \theta_{\text{atm}}(x) + \frac{1}{L} \sum_{p=0}^{L-1} (L-p)v(k-p) - \frac{1}{L} \sum_{x=i-L}^{i-1} \text{Im}[n''(x)], \quad (14)$$

式中散粒噪声 $n''(x) = n'(x) \exp \left[-j \left(\sum_{x=i-L}^{i-1} \theta_{\text{atm}}(x) / L - \sum_{p=1}^{L-1} (L-p) \cdot v(i-p) / L + \theta_{\text{la}}(i-1) \right) \right]$, 由于

$n'(x)$ 的圆对称性, $n''(x)$ 和 $n'(x)$ 是统计相同的。

由于湍流相位噪声、激光器相位噪声以及加性噪声彼此相互独立,且都近似符合高斯分布,因此 DAML 算法的相位估计误差可以近似为高斯过程,经分析其均值和方差如下:

$$E[\Delta\theta] = 0, \quad (15)$$

$$E[\Delta\theta^2] = \left[\frac{1+L}{L} \sigma_{\theta_{\text{atm}}}^2 - \frac{2}{L} \sum_{x=1}^L R_{\theta_{\text{atm}}}(x) + \frac{2}{L^2} \sum_{x=1}^{L-1} (L-x) R_{\theta_{\text{atm}}}(x) \right] + \left[\frac{(L+1)(2L+1)}{6L} \sigma_{\text{la}}^2 \right] + \left[\frac{1}{2L\gamma_{\text{b0}} \log_2 M} \right], \quad (16)$$

式中, $\sigma_{\theta_{\text{atm}}}^2$ 和 $R_{\theta_{\text{atm}}}(x)$ 分别为式(3)和式(4)所示的湍流相位噪声的方差和时间相关函数,式(4)中时间间隔 $\tau = xT$, $\sigma_{\theta_{\text{la}}}^2$ 为式(5)所示的激光器相位噪声方差。

综上,在同时考虑大气湍流、激光器相位噪声以及各种天气状况衰减效应的情况下,以 DQPSK 信号为例,可以推导出其误码率(Bit Error Rate, BER):

$$P_e = \int_0^\infty \int_{-\pi/4}^{\pi/4} p(e|I, \Delta\theta) f_1(I) p_{\Delta\theta}(\Delta\theta) dI d\Delta\theta \cong \int_0^\infty \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \text{erfc}[\sqrt{I\gamma_{\text{b0}}}(\cos\Delta\theta - \sin\Delta\theta)] \cdot f_1(I) p_{\Delta\theta}(\Delta\theta) dI d\Delta\theta. \quad (17)$$

式中 $f_1(I)$ 为式(10)所示的信道状态模型, $p_{\Delta\theta}(\Delta\theta)$ 是相位估计误差 $\Delta\theta$ 的概率密度函数,其均值为零,方差为式(16)。

3 系统仿真与讨论

在本节仿真系统中,通过构建自回归模型(Autoregressive model, AR)来产生高斯相关的湍流相位噪声序列^[14-15],以满足泰勒冻结假说。下面将通过理论计算和 MC 仿真来研究大气湍流、雾以及霾天气对基于 DAML 相位估计的 DQPSK 系统性能的影响。

3.1 大气湍流对系统性能的影响

在本小节仿真实验中,数据传输速率设为 1 Gbit/s,信号光波长 λ 为 850 nm,链路传输距离 z 为 1 km, DAML 相位估计器的记忆长度 L 设为 10。

图 2 展示了只考虑湍流相位波动以及散粒噪声影响时,大气湍流强度和风速对 DQPSK 系统误码率的影响。大气湍流结构常数 C_n^2 分别设为中湍流强度下的 $3 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 和强湍流下的 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 相应的相位波动标准差 σ_{atm} 分别为 44 和 80 rad,垂直于链路方向的风速分别设为 10 和 40 m/s。从图 2 可以看

出,当相位波动方差相同时,风速对系统误码率的影响可以忽略不计,这是因为湍流相位波动的时间相关性很强,在 $L = 10$ 个符号长度内其相位噪声变化十分缓慢。此外,当 BER 值为 10^{-4} 时,相较于没有大气湍流影响时的理想信道,强湍流信道中系统的信噪比代价小于 0.1 dB,中度湍流强度下几乎没有信噪比损伤。因此 DAML 相位估计算法能够很好地抑制大气湍流引起的相位噪声对系统性能的影响。

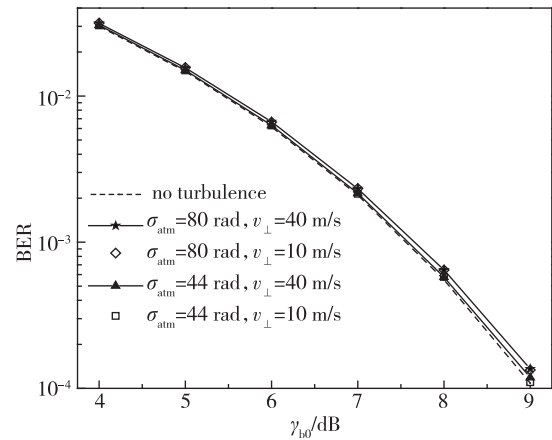


图 2 湍流相位噪声对 DQPSK 系统误码率的影响

Fig. 2 Effect of turbulent phase noise on BER in DQPSK system

图 3 展示了在大气湍流相位波动、光强波动以及激光器相位噪声综合影响下, DQPSK 系统误码率随信噪比的变化关系。在 C_n^2 设为 10^{-14} 、 2.5×10^{-14} 和 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时, Rytov 方差为 0.4、1、4, 湍流相位波动标准差为 25、40、80 rad, 分别代表弱、中度以及强湍流信道。激光器总线宽分别设为 160 和 500 kHz。图 3 中理论计算结果与 MC 仿真结果基本吻合,从而验证了第 2 节理论推导的正确性。从图 3 中可以看出,激光器线宽越大、湍流强度越强,系统误码率就越大。若要求系统 BER 值为 10^{-4} , 相较于线宽为零的理想情况,线宽为 160 kHz 的系统付出的信噪比代价分别为 0.5、0.34 和 2 dB, 不难看出信噪比代价随着湍流强度的增加而减小。因此湍流强度越大,系统能够容忍的相位噪声就越大。可以解释为,当激光器线宽一定时,随着湍流强度增加,要达到同一误码率系统所需的信噪比代价增大,由相位估计误差方差公式(16)可知,信噪比的增加将使得散粒噪声的影响减小,进而相位噪声的容错范围变大。

3.2 雾和霾对系统性能的影响

为了突出 DAML 算法给空间相干光通信系统性能带来的提高,图 4 对比仿真了不同湍流状态和天

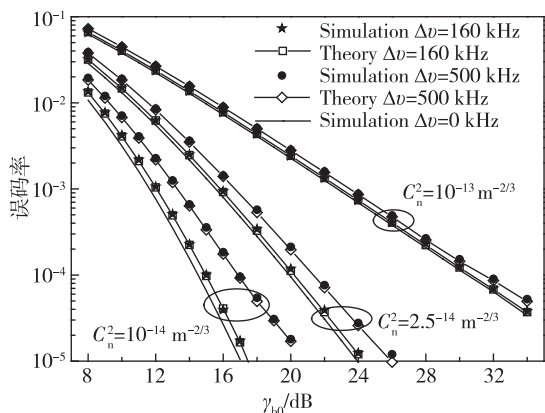


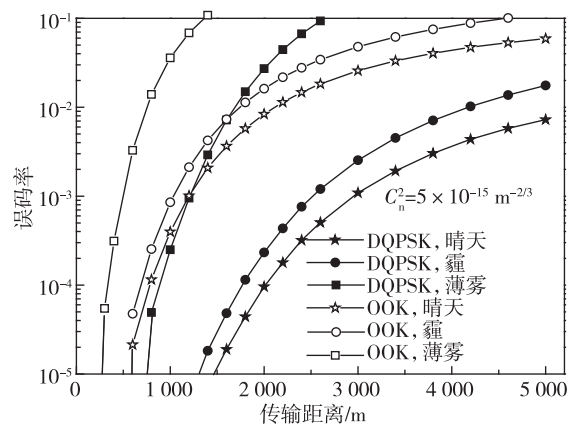
图3 不同大气湍流强度和激光器线宽条件下, DQPSK 系统的误码率

Fig. 3 BER of DQPSK system under different turbulent strengths and laser line-widths

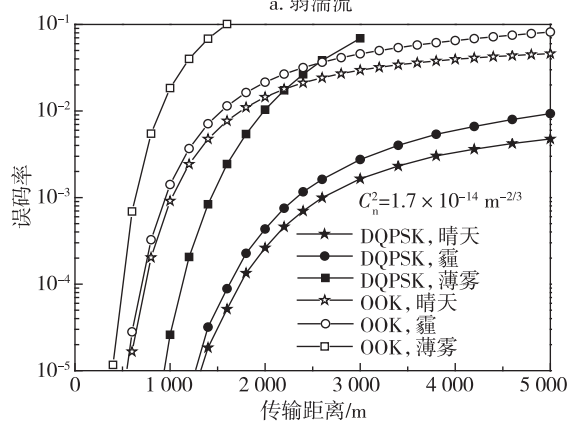
气状况下,DQPSK 系统和 OOK IM/DD 系统^[16]的误码率随传输距离的变化关系.两系统的数据传输速率都为 1 Gbit/s,链路传输距离为 1 km,光波长为 1 550 nm.由于浓雾天气不存在强湍流,图 4 所仿真的天气状态只参考了表 1 所示的晴朗、霾以及薄雾天气.

在图 4a 所示的弱湍流信道中,系统信噪比设为 15 dB;在图 4b 的中度湍流和图 4c 的强湍流信道中,信噪比则设为 20 dB.从 3 张图中可以看出,系统误码率随传输距离的增加而增加,通信距离随能见度的降低而减小.当天气状态为晴朗、霾、薄雾时,若将误码率标准设为 10^{-3} ,图 4a 中 DQPSK 系统相较于 OOK 系统分别有 1 747、1 486、715 m 的传输距离优势;图 4b 中 DQPSK 系统有 1 593、1 376、806 m 的传输距离优势;图 4c 中 DQPSK 系统有 931、836、570 m 的传输距离优势.因此 DQPSK 系统在远距离通信上更具优势.可以做出如下解释,DQPSK 信号幅度恒定,根据 DAML 判决公式(12)可知,影响其相位判决的只有符号的相位信息,因此大气湍流光强波动和大气衰减效应不会影响 DQPSK 信号的相位判决,只会带来系统信噪比的恶化.而对于 OOK IM/DD 系统而言,功率变化除了降低接收端信噪比之外,还将直接影响到 OOK 信号幅度信息的判决,造成判决失误,使系统性能恶化.

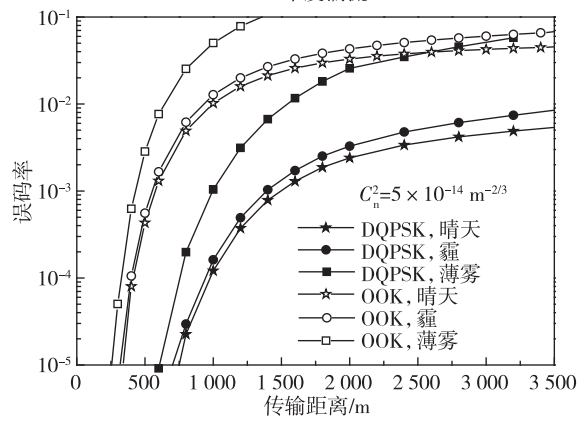
由于雾滴半径通常在 $1\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间,气溶胶颗粒的半径多在 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 之间,在雾和霾天气下光信号主要发生与波长选择有关的米氏散射,但随着雾的加重,功率衰减与传输波长的相关性减



a. 弱湍流



b. 中度湍流



c. 强湍流

图4 不同大气湍流环境和天气状态下, DQPSK 系统与 OOK 系统误码性能对比

Fig. 4 BER of DQPSK system and OOK system under different turbulent strengths and weather conditions

小^[11,17].图 5 展示了传输光波长分别为 850 和 1 550 nm 时,表 1 所示的晴朗、霾、薄雾、中雾、浓雾 5 种天气状况下,DQPSK 系统的误码率随信噪比的变化关系.由于浓雾不存在强湍流,图 5 是在折射率结构常数为 $5\times 10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}$ 的弱湍流环境下进行仿真的,链路传输距离 z 如图 5 所示.若要达到 10^{-4} 误码率,在晴朗、霾、薄雾、中雾天气,1 550 nm 波长系统相较于于

850 nm 系统分别有 1.3、0.5、0.5、0.22 dB 的信噪比优势,而浓雾天气二者性能十分接近,即随着雾天能见度的降低,1 550 nm 波长系统的性能优势将逐渐减小.因此,在晴朗、霾、薄雾以及中雾天气,1 550 nm 系统要比 850 nm 系统性能更优,而浓雾天气 ($V < 200$ m) 系统性能基本与波长选择无关.

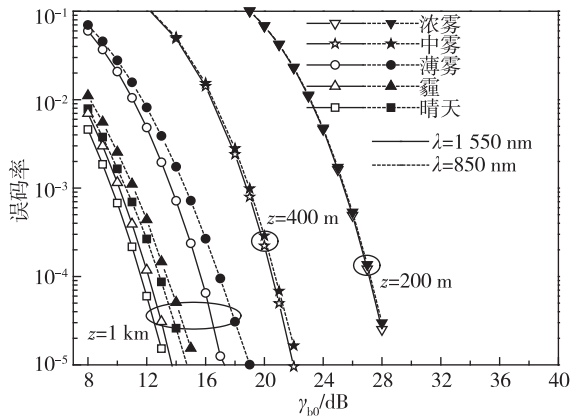


图5 不同天气状况下,光波长分别为 1 550 和 850 nm 时 DQPSK 系统的误码性能对比

Fig. 5 Comparison of BER in DQPSK system at 1 550 nm and 850 nm wavelengths in different weather conditions

4 结束语

本文主要研究了在大气湍流引起的相位波动和光强波动以及激光器相位噪声的影响下,DAML 相位估计算法在空间相干光通信系统中的可行性和有效性,并将该系统应用于雾、霾天气,通过与传统 OOK IM/DD FSO 通信系统进行对比,分析了针对 DQPSK 信号的 DAML 系统的传输距离限制和波长选择特性.所得结论对空间相干光通信系统的开发以及信号检测能力的提高具有重要参考价值.

本文主要结论如下:1) DAML 相位估计系统可以很好地抑制湍流相位波动的影响,即使在强湍流信道中系统的信噪比代价仍低于 0.1 dB;2) 湍流强度越大,激光器相位噪声对系统性能的影响越小,这是因为在强湍流环境中系统所需信噪比代价更高,此时散粒噪声的影响减小,从而扩大了相位噪声的容错范围;3) 在雾和霾天气下,相比于 OOK IM/DD FSO 通信系统,DAML 空间相干光通信系统在远距离通信上更占优势;4) 在霾、薄雾天气,传输波长为 1 550 nm 的 DAML 系统性能更优,在浓雾天气系统性能基本与波长选择无关.

参考文献

References

- [1] Kaufmann J E. Performance limits of high-rate space-to-ground optical communications through the turbulent atmospheric channel [C] // Proceedings SPIE, 1995, 2381: 171-182
- [2] Belmonte A, Khan J. Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques [J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14151-14162
- [3] Belmonte A, Khan J M. Sequential optimization of adaptive arrays in coherent laser communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(9): 1383-1387
- [4] Li M, Li B W, Song Y J, et al. Investigation of costasloop synchronization effect on BER performance of space uplink optical communication system with BPSK scheme [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 1-9
- [5] Camatel S, Ferrero V. Design, analysis and experimental testing of BPSK homodyne receivers based on subcarrier optical phase-locked loop [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5): 552-559
- [6] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005: 136-379
- [7] Zhang S L, Kam P Y, Chen J, et al. Decision-aided maximum likelihood detection in coherent optical phase-shift-keying system [J]. Optics Express, 2009, 17(2): 703-715
- [8] Zhang S L, Kam P Y, Yu C Y, et al. Decision-aided carrier phase estimation for coherent optical communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1597-1607
- [9] Tatarskii V I, Zavorotnyi V U. Wave propagation in random media with fluctuating turbulent parameters [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1985, 2(12): 2069-2076
- [10] Zhang J K, Li R J, Dang A H. Experimental studies of phase fluctuations in free-space optical communications [C] // Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications, 2015, DOI: 10.1364/LSC. 2015.LTh2D.3
- [11] Kim I I, McArthur B, Korevaar E. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1 550 nm in fog and haze for optical wireless communications [C] // Proceedings SPIE, 2001, 4214(2): 26-37
- [12] Zhang W Z, Hranilovic S, Shi C. Soft-switching hybrid FSO/RF links using short-length raptor codes: design and implementation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1698-1708
- [13] Al-Habash M A, Andrews L C, Phillips R L. New mathematical model for the intensity PDF of a laser beam propagating through turbulent media [J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562
- [14] Jurado-Navas A, Puerta-Notario A. Generation of correlated scintillations on atmospheric optical communications [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(5): 452-462

- [15] Rodionov A S, Choo H, Youn H Y, et al. Generation of pseudo random processes with given marginal distribution and autocorrelation function [J]. International Journal of Computer Mathematics, 2001, 78(4): 521-537
- [16] Kaur P, Jain V K, Kar S. Performance analysis of FSO array receivers in presence of atmospheric turbulence [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(12): 1165-1168
- [17] Grabner M, Kvicera V. Physical and statistical modeling of attenuation due to atmospheric hydrometeors on free-space optical links at 850 and 1 550 nm [C] // Proceedings of the SPIE, 2012, 8517(1): 1647-1655

Analysis of free space coherent optical communication system based on DAML phase estimation in fog/haze weather

LIU Xue¹ CHEN Jian¹ WANG Ping¹ MA Zhaohui¹ YOU Xiaodi¹ WU Yuanyuan² FU Xiaodong²

1 College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003

2 Zhongtian Broadband Technology Co.Ltd., Nantong 226463

Abstract Optical signal suffers from fluctuations in both intensity and phase due to the random refractive index variations induced by atmospheric turbulence. Meanwhile, system performance degradation due to urban fog/haze also should not be ignored. Given slowly time-varying characteristics of turbulent phase variations and laser phase noise, decision-aided, maximum likelihood (DAML) phase estimation algorithm is employed in free space coherent optical communication system to improve system performance. Then, BER performance of DAML system with DQPSK modulation is investigated considering the influences of atmospheric turbulence, laser phase noise and weather conditions. Transmission distance and wavelength selectivity is also analyzed in fog/haze weather. Simulation results show that turbulent phase noise can be ignored with less than 0.1 dB signal-to-noise ratio penalty compared with no turbulence. And in fog and haze weathers, free space coherent optical communication with DAML algorithm has longer transmission distance than OOK IM/DD free space optical communication, at least 500 meters. DAML system with 1 550 nm wavelength has better performance than that with 850 nm wavelength in haze and light fog weathers. But system performance is independent of wavelength in thick fog weather when visibility is less than 200 meters.

Key words free space coherent optical communication; atmospheric turbulence; fog/haze weather; decision-aided; maximum likelihood (DAML) phase estimation