

无线紫外光 MIMO 直升机助降 ALOS 链路性能分析

赵太飞, 包 鹤, 马欣媛

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 无线紫外光通信具有高速率高可靠性的特点, 可以满足复杂环境下的通信。通过直升机助降的过程提出近似直视通信方式, 并研究了无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 通信链路模型, 同时计算了弱湍流条件下 ALOS 链路中 MIMO 系统的误码性能, 并仿真分析其信噪比、发射功率、发射(接收仰角)以及通信距离对误码率的影响。计算分析当发射(接收)仰角小于 35° 时, 误码率随着发射(接收)仰角的增大, 其增长趋势比较明显, 当大于 35° 时, 误码率随着发射(接收)仰角的增大, 其增长趋势变缓。结果表明, 在无线紫外光 ALOS 链路中, 采用天线阵列和多探测器的 MIMO 技术能够较好地降低误码率和抑制大气湍流, 并提高抗衰弱能力。

关键词: 无线紫外光通信; MIMO 系统; 近似直视; 直升机助降

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1022002

Performance analysis of ALOS link by wireless UV MIMO in helicopter assisted landing

Zhao Taifei, Bao He, Ma Xinyuan

(School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Wireless ultraviolet (UV) communication has the characteristics of high speed and high reliability, which can meet the needs of complex environment. The approximate line of sight (ALOS) communication mode was proposed through the process of helicopter assisted landing, and the ALOS link of wireless UV MIMO system was studied. Meanwhile, the error performance of MIMO system in ALOS link under weak turbulence was calculated, the influence of SNR, transmitting power, transmitting (receiving) elevation angle and communication distance on the BER were calculated and analyzed. When the elevation angle of transmitting (receiving) was less than 35° , the BER increased rapidly with the increase of elevation angle, the trend growth of BER was slowing down with the increase of elevation angle when elevation was greater than 35° . The result indicates that adopting the MIMO technology with antenna array and multi-detector can reduce BER, suppress the atmospheric turbulence and improve the ability of anti-fading in the wireless ultraviolet ALOS link.

Key words: wireless ultraviolet communication; MIMO system; approximate light of sight; helicopter assisted landing

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金-中国民航局民航联合研究基金(U1433110); 陕西省教育厅科研计划项目(17-JF024);
西安市碑林区科技计划项目(GX1617); 特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金(17kftk04)

作者简介: 赵太飞(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事紫外光通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等方面的研究。

Email: tfz@xaut.edu.cn

通讯作者: 包鹤(1990-), 女, 硕士生, 主要从事无线紫外光通信方面的研究。Email: 408398439@qq.com

0 引言

受低空开放的影响,国内通用航空市场近几年发展很快,而作为其中重要分支的直升机更是备受关注。随着直升机的应用越来越广泛,直升机的安全问题也越发突出^[1]。当发生了紧急事件或者自然灾害时,地形地貌发生改变,交通中断,天气条件恶劣,导航定位困难,此时如何准确快速引导救援直升机抵达救灾地点的降落场并安全降落成为关注的焦点^[2]。

复杂环境中直升机应急起降急需无线紫外光引导系统进行辅助安全保障,通过无线紫外光 MIMO 通信系统在极短的时间内实现直升机对降落场的快速定位,实现直升机与地面信标的快速匹配算法,构建一种基于无线紫外光的复杂环境中直升机应急起降新方法。近年来,对于直升机辅助起降、舰载机降落和飞行器、无人机的自主降落研究较为广泛^[3-5]。2016 年,北京航空航天大学 Yao Zou 等^[6]提出一种用于模型定标自主式直升机轨迹跟踪的无奇异的非线性控制器方法,利用分解模型,控制器采用分层内外环策略进行设计,对外部位置环控制器采用双曲正切函数设计,对内部姿态回路控制器实现无奇异性的姿态跟踪,并对其验证。2017 年,北京交通大学 Zhenyu Yu 等^[7]根据 3D 摄像机的信息,提出了一种基于三维视觉的起飞和着陆控制方法,可以估计直升机高于地面的高度,也可以估计地面的平坦度,达到平稳和安全着陆。但是他们都未将直升机飞行决策规划的背景假设为复杂环境。因此对无线紫外光 MIMO 通信系统可以深入研究。

文中利用一套有效、安全、可靠的无线紫外光 MIMO 直升机助降通信系统,提出近似直视(Approximate Line of Sight, ALOS)通信方式,并分析无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 通信链路模型,计算弱湍流条件下 ALOS 链路中 MIMO 系统的误码性能。首先采用紫外光引导直升机助降扫描模型,取对数正态分布衰落建立信号强度起伏的对数正态分布,并对其相应的概率密度函数以及联合概率密度函数进行仿真分析;最后对 PPM 调制方式 SISO, SIMO, MISO 和 MIMO 系统的误码率公式进行改进,并计算分析其信噪比、发射功率、发射仰角(接收仰角)以及通信距离对误码率的影响。

1 无线紫外光 MIMO 直升机助降系统

将紫外光 MIMO 技术引用直升机助降系统使用的过程中,由于收发端存在一定的高度差,必须考虑湍流对紫外光通信性能的影响^[8]。直升机在空中飞行的过程中,地面救援人员首先根据临时起降场周边环境,然后按键输入对应的环境信息,最后设置合适的扫描方式组合,发射端所有 LED 根据所设置的扫描方式将环境信息通过喷泉码广播发出,等待直升机到来。

直升机紫外光 MIMO 扫描巡检是以直升机为平台,在其基础上搭载紫外光 MIMO 扫描。紫外光引导直升机扫描模型如图 1 所示,利用无线日盲紫外光通信的直升机降落辅助技术,在降落阶段,利用紫外光 MIMO 技术对空中扫描帮助直升机定位寻找降落点,并引导其抵达降落点上空,然后通过空地紫外光通信将地面收集的信息传递到飞机上进而帮助飞行员判断降落条件。当直升机安全抵达降落点上空时,通过机下接收端对准地面发射端,来确定降落位置,提高降落精度。针对紫外光引导直升机扫描采用自设扫描方式,只发送基本的信标环境信息,不发送 LED 地址信息,此时 LED 地址为 00。利用自设扫描方式可满足特殊情况下的需求,提高信标扫描方式的灵活性,使其尽可能地适应多种环境^[9-10]。

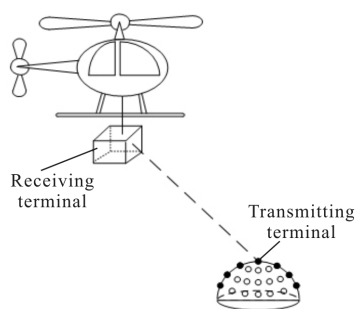


图 1 紫外光 MIMO 引导直升机助降扫描系统
Fig.1 UV MIMO guided helicopter assisted landing scanning system

2 无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 链路信道模型

在紫外光引导直升机助降过程中,大部分情况下发射装置与接收装置非共面, MIMO 结构可使得直升机在飞行过程中找到最佳直视通信方式,但由

于飞行姿态时刻发生变化,文中考虑直升机与紫外光近似直视(ALOS)通信方式。

ALOS 通信是指当发射光束的发散角和接收视场角都较小时,传输的光信息可以绕开通信两端的障碍物的通信模式为窄发散角发送-窄视场角接收,如图 2 所示。 TR 与发射光轴夹角 $\psi \leq \frac{\phi}{2}$,其中 ϕ 是发散角。

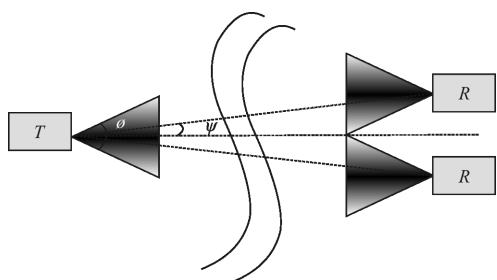


图 2 无线紫外光近似直视通信
Fig.2 Wireless UV ALOS communication

MIMO 技术通过获得分集增益以减弱接收信号的光强起伏,达到抑制大气湍流和降低误码率^[11]。图 3 给出了 M 个发射器和 N 个接收器的 MIMO ALOS UV 链路模型。链路间距离为 r 。图 4 表示 m 个发射天线 T_{xm} 和 n 个接收天线 R_{xn} 之间的关系。第 m 个发射器发射的发散角为 $\phi_{T,m}$,发射仰角 $\theta_{T,m}$;第 n 个接收器的视场角为 $\phi_{R,n}$,接收仰角 $\theta_{R,n}$,有效散射体积用 V_{mn} 表示, $r_{1,mn}$ 和 $r_{2,mn}$ 分别表示第 m 个发射器到 V_{mn} ,从 V_{mn} 到第 n 个接收器之间的距离。

无线光通信一般采用强度调制方式,所以针对无线紫外光采用带强度调制和直接检测(IM/DD)的脉冲位置调制(PPM)。假设在接收端的信道状态信息是完美的,并且信噪比服从高斯分布,第 n 个接收器的接收信号为^[12]:

$$r_n = s\eta \sum_{m=1}^M P_{t,m} I_{m,n} + V_n, n=1, \dots, N \quad (1)$$

式中: s 为信息位 $s \in \{0, 1\}$; η 为光电转换系数; V_n 是均值为 0, 方差为 $\delta_n^2 = N_0/2$ 的加性高斯白噪声信号; $P_{t,m}$ 为从第 m 个发射天线到接收端的发射功率; $I_{m,n}$ 表示在有路径损耗和湍流效应时,第 m 个发射器和 n 个接收器之间的接收辐照度。

紫外光一般考虑在弱湍流中进行通信,所以采用对数正态分布衰落来建模,使得信号的强度起伏

服从对数正态分布,其概率密度函数为^[13]:

$$f_I(I) = \frac{1}{(2\pi\sigma_I^2)^{1/2}I} \exp\left[-\frac{\ln I + \frac{\sigma_I^2}{2}}{2\sigma_I^2}\right] \quad (2)$$

式中: I 为光强起伏,紫外光光信号对光强起伏的方差 $\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_x^2 - 1)$,平面波对数振幅方差 $\sigma_x^2 = 0.56k^{7/6} \int_0^L C_n^2(x)L(L-x)^{5/6}dx$,波数 $k=2\pi/\lambda$, λ 为紫外光的波长, L 表示传播距离。

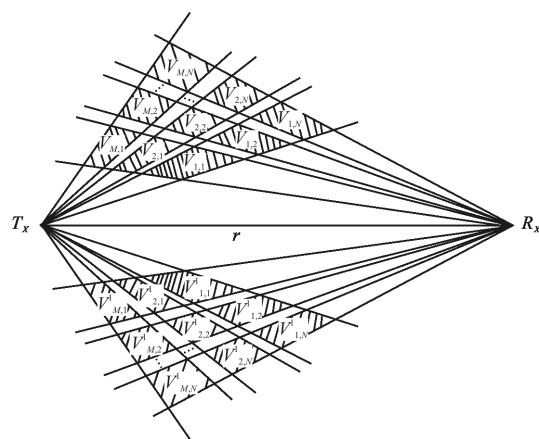


图 3 MIMO ALOS UV 系统信道模型
Fig.3 Channel model of MIMO ALOS UV communication system

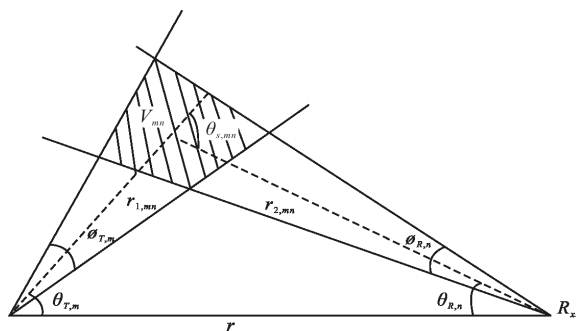


图 4 m 个发射天线 T_{xm} 和 n 个接收天线 R_{xn} 之间的关系
Fig.4 Relationship between the m transmitting antenna T_{xm} and the n receiving antenna R_{xn}

通过 LOS 湍流模型可将 ALOS 链路表示为两个 LOS 链路, $r_{1,mn}$ 和 $r_{2,mn}$ 。采用对数正态分布(Log-normal)分布模型,结合两个 LOS 链路结果得到 ALOS 湍流分布。假设 T_{xm} 光束是足够小的,散射体中的闪烁衰减是恒定的,并只考虑单次散射。通过分析,随着大气湍流的增加,辐照度 I_{mn} 到达 V_{MN} 的

Log-normal 概率密度函数为^[14-15]:

$$f(I_{mn}^v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{mn} I_{mn}^v} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{mn}^2} \left(\ln \left(\frac{I_{mn}^v}{\mu_{mn}^v} \right) \frac{1}{2} \sigma_{I_{mn}^v}^2 \right)^2 \right] \quad (3)$$

由第 n 个接收器的概率密度函数为^[14-15]:

$$f(I_{mn} | I_{mn}^v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{mn} I_{mn}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{mn}^2} \left(\ln \left(\frac{I_{mn}}{\mu(I_{mn} | I_{mn}^v)} \right) + \frac{1}{2} \sigma_{I_{mn}}^2 \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: $\mu(I_{mn} | I_{mn}^v) = I_{mn}^v \cdot \frac{A_r e^{-k_2 r_2}}{r_2^2}$, 根据 I_{mn} 和 I_{mn}^v , 衰落信道

模型的信道系数从 m 发射孔径至 n 接收孔径的联合分布概率密度函数 $f(I_{mn}) = \int f(I_{mn} | I_{mn}^v) f(I_{mn}^v) dI_{mn}^v$, 其对数正态分布形式为^[16]:

$$f(I_{mn}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{mn} I_{mn}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{mn}^2} (\ln(I_{mn}) - \mu_{mn})^2 \right] \quad (5)$$

式中: 方差 $\sigma_{mn}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} (r_{1,mn}^{11/6} + r_{2,mn}^{11/6})$, C_n^2 为大气折射率结构常数; I_{mn} 的平均值为: $\mu_{mn} = -0.5 \sigma_{mn}^2 - a_{mn} \ln 10 / 10 + \ln(I_{0,mn})$, 其中 $a_{mn} = 2 \sqrt{23.17 C_n^2 k^{7/6} (r_{1,mn}^{11/6} + r_{2,mn}^{11/6})}$ 。 $I_{0,mn}$ 在单个发射器功率的单散射假设下, 在没有湍流的情况下接收的辐照度为^[12]:

$$I_{0,mn} = \frac{k_s P(\theta_{s,mn}) A_r \exp(-k_e (r_{1,mn}^{11/6} + r_{2,mn}^{11/6})) v_{mn}}{2\pi [1 - \cos(\theta_{r,mn}/2)] r_{1,mn}^2 + r_{2,mn}^2} \quad (6)$$

式中: 大气信道衰减系数和散射系数分别为 k_e , k_s ; $P(\theta_{s,mn})$ 表示散射相函数; A_r 为接收孔径。

3 无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 链路中误码率性能

对于一个 $M \times N$ (M 表示发送天线, N 表示接收天线) 的 MIMO 系统, 采用 PPM 调制技术提高 ALOS MIMO UV 通信系统的抗干扰能力和功率利用率, 降低系统的误码率。通过选取对数正态分布模型, 并且假设在接收端可以接收到独立的不同的衰落信道信息, 则误码率可以表示为^[17]:

$$P_e = p(\text{off})p(\text{eloff}) + p(\text{on})p(\text{elon}) \quad (7)$$

式中: $p(\text{on})$ 和 $p(\text{off})$ 分别表示在发射端“on”和“off”的概率。在发射端为“on”和“off”时的条件比特错误概率 $p(\text{eloff})$ 和 $p(\text{elon})$ 。

3.1 无线紫外光 SISO 系统的 ALOS 链路中误码率性能

假设 $M=N=1$ 时, 则^[18]:

$$p(\text{eloff}, I) = p(\text{elon}, I) = \int_I f(I) Q \left(\frac{\eta P I}{\sqrt{2N_0}} \right) dI \quad (8)$$

根据条件衰落系数得^[18]:

$$p(\text{eloff}, I) = p(\text{elon}, I) = Q \left(\frac{\eta P I}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (9)$$

其中 $Q(y) = 1/\sqrt{2\pi} \int_y^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 。

无线紫外光 ALOS 与发射功率 P_t , 接收功率 $P_{r, \text{LOS}}$ 和 ψ 有关, 则 SISO 系统的误码率为:

$$p_{e, \text{SISO}} = \int_{\text{SISO}} f(p) f_{\text{SISO}}(I_{\text{SISO}}) Q \left(\frac{\eta P I_{\text{SISO}}}{\sqrt{2N_0}} \right) dI_{\text{SISO}} \quad (10)$$

其中 $f(p) = \frac{P_{r, \text{LOS}}}{P_t} \cos \psi$, $P_{r, \text{LOS}} = \frac{P A_r}{4\pi r^2} e^{-K_r r}$ 。

3.2 无线紫外光 MISO 系统的 ALOS 链路中误码率性能

将 UV 与 MIMO 相结合则可以得出^[18]:

$$p(r|\text{loff}, I_{mn}) = \begin{cases} \text{off} \\ > \\ \text{on} \end{cases} p(\text{elon}, I_{mn}) \quad (11)$$

式中: $r = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 是接收信号矢量, 条件概率为^[14,18]:

$$p(r|\text{loff}, I_{mn}) = \frac{\exp \left(-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{n=1}^N (r_n - \eta \sum_{m=1}^M P_{t,m} I_{mn})^2 \right)}{(2\pi \sigma_n^2)^{N/2}}$$

$$p(r|\text{lon}, I_{mn}) = \frac{\exp \left(-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{n=1}^N r_n^2 \right)}{(2\pi \sigma_n^2)^{N/2}} \quad (12)$$

根据公式(12)得出无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 链路中误码率性能:

$$p_{e, \text{MIMO}} = \int_I f(p) f(I_{mn}) Q \left(\frac{\eta P_t}{MN \sqrt{2N_0}} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M I_{mn} \right)^2} \right) dI \quad (13)$$

当考虑分集接收时, 假设 $N=1$, 由公式(13)得到 MISO 的误码率:

$$P_e = \int_I f(p) f(I_{m1}) Q \left(\frac{\eta P_t}{M \sqrt{2N_0}} \sum_{m=1}^M I_{m1} \right) dI \quad (14)$$

假设所有的收发器配置相同, 则化简出:

$$\sigma_{\text{MISO}}^2 \approx \frac{\sigma_{m1}^2}{M} \quad (15)$$

假设 $I_{\text{MISO}} \approx \sum_{m=1}^M I_{m1}$, 则在无线紫外光 MISO 系统 ALOS 链路的误码率为:

$$P_{e,\text{MISO}} = \int_{\text{MISO}} f(p) f_{\text{MISO}}(I_{\text{MISO}}) Q\left(\frac{\eta P_t}{\sqrt{2N_0} M} I_{\text{MISO}}\right) dI_{\text{MISO}} \quad (16)$$

3.3 无线紫外光 SIMO 系统的 ALOS 链路中误码率性能

当考虑最大比合并的接收分集时, 假设 $M=1$, SIMO 的误码率为:

$$P_{e,\text{SIMO}} = \int_I f(I_{1n}) Q\left(\frac{\eta P_t}{\sqrt{2N_0} N} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_{1n}^2}\right) dI \quad (17)$$

假设所有的收发器配置相同, 则化简出:

$$\sigma_{\text{SIMO}}^2 \approx \frac{4}{M} \sigma_{1n}^2 \quad (18)$$

假设 $I_{\text{SIMO}} \approx \sum_{n=1}^N I_{1n}^2$, 则在无线紫外光 SIMO 系统的 ALOS 链路中误码率为:

$$P_{e,\text{SIMO}} = \int_{\text{SIMO}} f(p) f_{\text{SIMO}}(I_{\text{SIMO}}) Q\left(\frac{\eta P_t}{\sqrt{2N_0} N} \sqrt{I_{\text{SIMO}}}\right) dI_{\text{SIMO}} \quad (19)$$

4 误码性能仿真分析

文中根据上述理论, 定量分析了在弱湍流 ($C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$) 情况下 ALOS 链路的误码性能。通过 PPM 调制的方式, 仿真分析了在弱湍流情况下 MIMO 链路对误码率的影响。仿真过程中的部分参数如表 1 所示。

表 1 部分仿真系数

Tab.1 Partial simulation coefficient

Parameter	Value
Wavelength/nm	250
Receiving aperture/cm ²	1.77
Detection efficiency	0.2
Scattering coefficient/km ⁻¹	0.759
Attenuation coefficient/km ⁻¹	2.8
Scattering phase function	1
Planck constant	6.626×10^{-34}
Divergence angle/(°)	10
Viewing angle/(°)	10
Emitter elevation/(°)	20
Receiving elevation/(°)	20

图 5 仿真分析了闪烁方差为 0.1 时, 无线紫外光 MISO 系统和 SIMO 系统的 ALOS 链路中误码率曲线图。由图 5(a)中可见, 2×1, 3×1 和 4×1 系统的误码性能明显优于 SISO 系统的误码性能。当 BER=10⁻⁸ 时, 相对于 SISO 系统的误码率分别改善了约 7、11、13.5 dB。当信噪比一定时, 误码率随着发射天线的增大而增大。由图 5(b)中可见, 1×2, 1×3 和 1×4 系统的误码性能明显优于 SISO 系统的误码性能。当 BER=10⁻⁸ 时, 相对于 SISO 系统的误码率分别改善了约 6、11、13.5 dB。当信噪比一定时, 误码率随着接收天线的增大而增大。

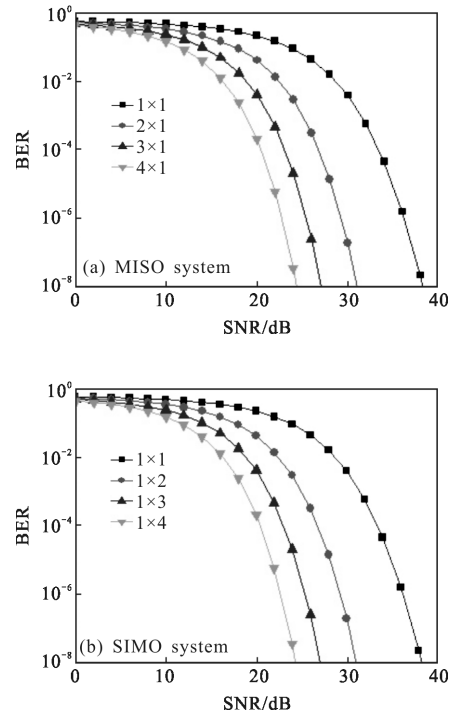


图 5 无线紫外光 MISO 系统和 SIMO 系统的 ALOS 链路中的误码率
Fig.5 BER in ALOS link of wireless UV MISO and SIMO system

图 6 进行了对无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 链路中误码率性能分析。图 6(a)闪烁方差 0.1 和图 6(b)分别为闪烁方差为 0.1 和 0.3 时, PPM 调制误码率曲线。由图 6 可知, 2×2, 3×3 和 4×4 系统的误码性能明显优于 SISO 系统的误码性能。图 6(a)中当 BER=10⁻⁸ 时, 相对于 SISO 系统的误码率分别改善了约 10.5、20、26.3 dB; 图 6(b)中所呈现的规律与图 6(a)基本相同, 当信噪比一定时, 发射和接收天线相同

时,图 6(a)比图 6(b)的性能稍有改善。随着接收天线数的增加,误码率相同时信噪比变化比较大,但是当 4×4 系统的信噪比变化较小时,收发天线继续增加,信噪比几乎就不再变化。因此 MIMO 系统可以抑制湍流,提高抗衰弱能力。

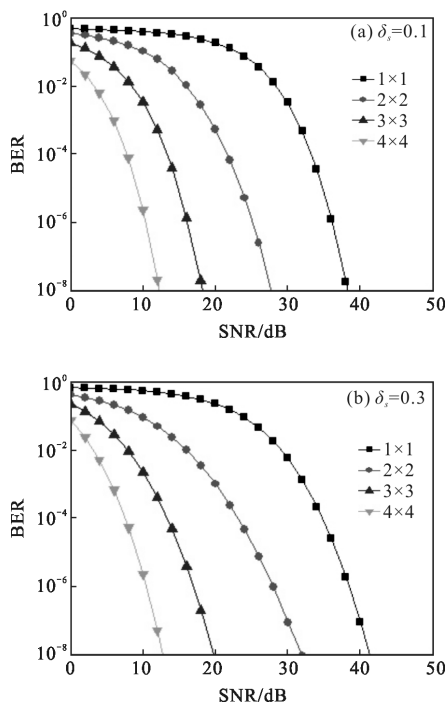


图 6 无线紫外光 MIMO 系统的 ALOS 链路中的误码率
Fig.6 BER in ALOS link of wireless UV MIMO system

图 7 仿真分析了闪烁方差为 0.1 时,无线紫外光 MIMO 系统(2×2,3×3 和 4×4 系统)ALOS 链路中发射功率和通信距离与误码率的关系曲线图。图 7(a)中 $r=200\text{ m}$, $R=500\text{ kb/s}$, P_t 为 0~30 mW。图 7(b)中 $P_t=3\text{ mW}$, $R=500\text{ kb/s}$, r 为 0~200 m。从图 7(a)中可以看出,不同天线数下,误码率随着发射功率的增大而减小, $P_t=20\text{ mW}$ 时,4×4 系统的误码最小。当误码率 $P_s=10^{-8}$ 时,2×2,3×3 和 4×4 系统分别比 SISO 方式下

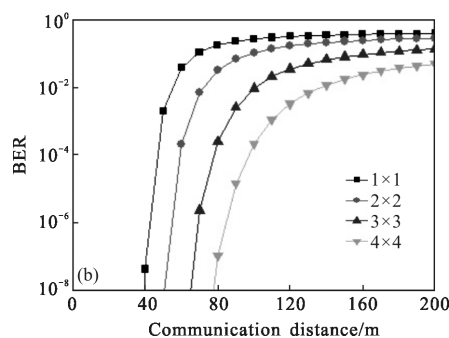
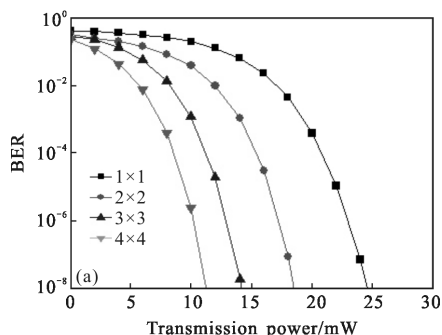


图 7 发射功率(a)和通信距离(b)与误码率的关系曲线图
Fig.7 Relationship diagram between transmission power (a) and communication distance (b) and BER

节省了约 8.39、10、11.24 dBm 的发射功率。从图 7(b)中可以看出,不同天线数下,误码率随着通信距离的增大而增大,当 $r=100\text{ m}$ 时,4×4 系统的误码最小。当误码率 $P_s=10^{-8}$ 时,2×2,3×3 和 4×4 系统分别比 SISO 方式下通信距离增大了约 10、25、37.5 m。

图 8 仿真分析了闪烁方差为 0.1 时,无线紫外光 MIMO 系统 ALOS 链路中发射(接收)仰角与误码率的关系曲线图。当误码率 $P_s=10^{-8}$ 时,2×2,3×3 和 4×4 系统分别比 SISO 方式下发射(接收)仰角增大了约 2.4°、5.9°、9.7°。当天线数相同时,误码率随着收发仰角的增大而增大。当发射(接收)仰角小于 35° 时,误码率随着发射(接收)仰角的增大,其增长趋势比较快,当大于 35° 时,误码率随着发射(接收)仰角的增大,其增长趋势变小。

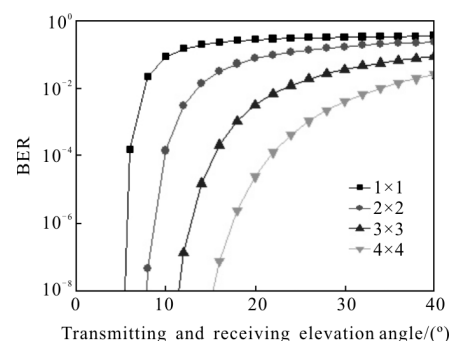


图 8 无线紫外光 MIMO 系统 ALOS 链路中收发仰角与误码率的关系曲线图
Fig.8 Relationship between the transmitting and receiving elevation angle and BER in ALOS link of wireless UV MIMO system

5 结论

文中根据散射特性,结合紫外光 MIMO 引导直

升机助降扫描系统,提出了紫外光 MIMO 系统 ALOS 链路的问题。研究了适用弱湍流无线紫外光 SISO、MISO、SIMO、MIMO 系统的误码性能。利用紫外光一般只能在弱湍流中进行通信特性,采用对数正态分布衰落来建模,计算分析 2×2 、 3×3 和 4×4 与 SISO 系统的信噪比、发射功率、发射仰角(接收仰角)以及通信距离对误码率的影响。

计算结果表明,SIMO、MISO、MIMO 系统可以抑制湍流,提高抗衰弱能力,其误码性能明显优于 SISO 系统的误码性能。相同条件下,误码率随着 SNB 的增加而减小,误码率随着发射功率的增大而减小,误码率随着通信距离的增大而增大,误码率随着收发仰角的增大而增大。因此在无线紫外光 ALOS 链路中,采用天线阵列和多探测器,MIMO 技术能够好地降低误码率和抑制大气湍流,并能提高抗衰弱能力。

参考文献:

- [1] Liu Haiming. China helicopter market pattern and opportunity scanning [J]. *Airlift Business*, 2014 (6): 49–51. (in Chinese)
- [2] Zhao Taifei, Wang Xiufeng, Liu Yuan. Study of helicopter assisted ultraviolet guided modulation in atmospheric turbulence [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(3): 411–411. (in Chinese)
- [3] Pedro J Garcia-Pardo, Gaurav S Sukhatme, James F Montgomery. Towards vision-based safe landing for an autonomous helicopter [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 38(1): 19–29.
- [4] Sheng Shouzhao, Ashfaq Ahmad Mian, Zhao Chao, et al. Autonomous takeoff and landing control for a prototype unmanned helicopter[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(9): 1053–1059.
- [5] Sebastian Scherer, Lyle Chamberlain, Sanjiv Singh. Autonomous landing at unprepared sites by a full-scale helicopter [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(12): 1545–1562.
- [6] David Cabecinhas, Rita Cunha, Carlos Silverstre. A nonlinear quadrotor trajectory tracking controller with disturbance rejection[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 26: 1–10.
- [7] Zou Y, Huo W. Singularity-free non-linear controller for a model-scaled autonomous helicopter [J]. *Control Theory & Applications Iet*, 2016, 10(2): 210–219.
- [8] Yu Z, Shin J, Celestino D, et al. 3939 3D vision-based autonomous landing and take-off control of unmanned small helicopter [C]//The Japan Society of Mechanical Engineers, 2017: 269–270.
- [9] Zhao Taifei, Wu Pengfei, Song Peng. Wireless ultraviolet helicopter aided landing and landing communication technology research [J]. *Laser Magazine*, 2014, 35(10): 9–13. (in Chinese)
- [10] Zhao Taifei, Hou Peng, Liu Yijie, et al. Helicopter guidance system and guidance method based on wireless ultraviolet and multidimensional encoding: China, 201410108725.2 [P]. 2014–03–21.
- [11] Wang Huiqin, Ke Xizheng. MIMO of an atmospheric laser communication and the key technology of [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(3): 52–54. (in Chinese)
- [12] Maryam Haghighi Ardakani, Ali Reza Heidarpour, Murat Uysal. Performance analysis of MIMO ALOS UV communications over atmospheric turbulence channels [C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2016: 1–5.
- [13] Zeinab H, Jarir F, Mohsen K. MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere [J]. *Journal of Communications*, 2009, 4(8): 524–532.
- [14] Majumdar A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel [J]. *Journal of Optical & Fiber Communications Reports*, 2005, 2(4): 345–396.
- [15] Ardakani M H, Heidarpour A R, Uysal M. Non-line-of-sight ultraviolet communications over atmospheric turbulence channels [C]//International Workshop on Optical Wireless Communications. IEEE, 2015: 55–59.
- [16] Ding H, Chen G, Majumdar A K. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels [C]//SPIE, 2011, 8038: 8038J.
- [17] Zuo Y, Xiao H, Wu J, et al. Effect of atmospheric turbulence on non-line-of-sight ultraviolet communications [C]//International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2012: 1682–1686.
- [18] Navidpour S M, Uysal M, Kavehrad M. BER Performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. *Wireless Communications IEEE Transactions on*, 2007, 6(8): 2813–2819.