

基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析

陈泉润^{1,2*}, 虞翔¹, 崔文楠¹, 张涛^{1,3**}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海科技大学, 上海 201210

摘要 为了满足小卫星平台中尺寸、质量、功耗等约束并探索中短距离星间链路下射频(RF)通信和激光通信的替代解决方案,研究了多卫星网络中采用可见光通信(VLC)的中短距离星间通信的可行性。利用卫星工具软件(STK)构建了双星伴飞构型,定量分析了太阳及恒星引入的背景光噪声,从而构建了中短距离星间 VLC 链路模型。为了提高链路容量和可靠性,进一步构建了基于星间链路的单输入多输出 VLC(SIMO-VLC)系统,通过数值仿真评估了不同分集合并算法对于链路性能的影响。仿真结果表明:大部分时段中太阳辐射引入的杂散光功率在 $10 \mu\text{W}$ 以下,相比于地面场景引入的背景光功率降低了 75%。当在 20 km 内实现传输速率为 112.5 Mbit/s、误码率为 1×10^{-6} 的数据传输,系统所需的发射光功率至少为 4.55 W。相比单输入单输出(SISO)系统,采用基于单输入多输出(SIMO)的分集检测方案可以获得更好的性能,且所需发射功率和通信距离能够随着接收支路的增加得以有效改善,可为基于 VLC 的星间链路设计及扩展室外应用场景提供参考。

关键词 光通信; 可见光通信; 星间链路; 分集检测; 性能分析

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006003

Visible-Light Communication and Performance Analysis Based on Medium- and Short-Distance Inter-Satellite Links

Chen Quanrun^{1,2*}, Yu Xiang¹, Cui Wennan¹, Zhang Tao^{1,3**}

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract To meet constraints on size, weight, and power consumption in small satellite platforms and explore alternative solutions for radio frequency and laser-based communication in medium- and short-distance inter-satellite links, this study explores the feasibility of visible-light communication (VLC) based medium- and short-distance inter-satellite communication in multi-satellite networks. Using the satellite tool kit (STK), the binary star formation flying configuration is constructed, background-light noise introduced by the sun and stars is quantitatively analyzed, and a medium- and short-range inter-satellite VLC link model is constructed. Then, to improve the link capacity and reliability, the VLC link is further developed into a single-input multi-output VLC (SIMO-VLC) system. The influences of different diversity merging algorithms on the link's performance are evaluated by numerical simulation. Simulation results show that the stray light power introduced by solar radiation is below $10 \mu\text{W}$ throughout most of the time period, and the background light power introduced from the ground is reduced by 75%. In order to achieve a data transmission rate of 112.5 Mbit/s and a bit error rate of 1×10^{-6} within 20 km, the light power required by the system is at least 4.55 W. Compared with the single-input single-output system, the SIMO-based diversity detection scheme can achieve better performance, and the required transmission power and communication distance are effectively improved with the increase of the receiving branch, which can provide a reference for the design of VLC-based inter-satellite links and extending their outdoor application scenarios.

Key words optical communications; visible-light communication; inter-satellite link; diversity detection; performance analysis

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 060.4510; 040.1880

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-06-04; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 国家 863 计划(2015AA7046612)、国家重点研发计划(2017YFC0111403)

* E-mail: qrchen_work@126.com; ** E-mail: haozh@sina.com

1 引 言

多卫星协同网络由于具有更高的空间和时间分辨率,已逐渐成为未来太空任务的替代解决方案。大量的异构小卫星作为传感网络被部署于太空中,具有低成本、高性能和较强的灵活性等优势。与传统卫星相比,该空间部署网络能够通过更长的观测基线来增强任务,因此具有大故障容限、实时可重构、适应高度动态需求以及降低寿命周期成本等优点^[1]。为实现分布式多卫星节点之间的实时性协作,需要建立大容量、小时延、高可靠性的星间通信链路。

目前,用于实现星间通信的技术手段主要包括射频(RF)通信和激光通信。RF通信由于频谱资源紧缺难以满足大容量应用需求,同时对装配星载敏感电子设备的系统也不适用。激光通信具有传输速率高、距离远、天线尺寸小等优点^[2],但由于其发散角较小,需要搭载高精度的捕获、跟踪和瞄准(ATP)系统,对中短距离多卫星协同应用增加了冗余负担^[3],因此需要探索新的解决方案以满足中短距离星间链路的高可靠性通信。

在当前 RF 资源紧缺的现状下,可见光通信(VLC)作为一种非常有前景的应对补充方案,近十几年来已引起各国学者的广泛兴趣。VLC使用可见光波段(380~760 nm)作为信息载体,提供了大量不受管制的电磁频谱和极大的带宽,具有低碳、接近零通信损耗、抗干扰、保密性强、无电磁干扰等优势^[4-6]。由于VLC采用发光二极管(LED)作为光源,兼具照明与通信双重功能,目前室内VLC技术

已经取得较为完备的研究成果,主要用于光源布局^[7]、宽带接入^[8]及室内定位^[9]。而室外远距离VLC受到大气的散射吸收、湍流效应以及太阳背景光的影响,信道条件较差,VLC的室外应用场景受限。国内外对于VLC的室外应用研究主要集中在短距离的车间通信^[10]和 underwater通信^[11],以及部分长距离室外传输演示实验中^[12-13]。

为满足小卫星平台中尺寸、质量、功耗等约束条件并探索中短链路(≤ 20 km)下RF通信和激光通信的替代解决方案,本文分析了多卫星网络中采用VLC的中短距离星间通信的可行性。在采用STK构建双星伴飞构型的基础上,分析了在轨飞行一年期间的星间相对距离和太阳角的变化,从而定量分析太阳及恒星引入的背景光噪声,对中短距离星间VLC链路进行建模。为了提高链路容量和可靠性,构建基于星间链路的SIMO-VLC系统,通过数值仿真评估了不同分集合并算法对于链路性能的影响,为基于VLC的星间链路设计及扩展室外应用场景提供一定参考。

2 星间 VLC 信道模型

2.1 接收功率分析

室外远距离VLC模型如图1所示,其原理为:1)对输入电信号进行调制并进行信道编码,以提高远程VLC系统的通信链路可靠性;2)对信号进行预均衡和放大,以提高系统3 dB带宽,增加调制深度;3)通过Bias-Tee叠加直流电源(DC),并经LED器件发射。为了减小长距离传输后的几何损耗,通常采用聚光透镜来减小LED的发射角。在自由空

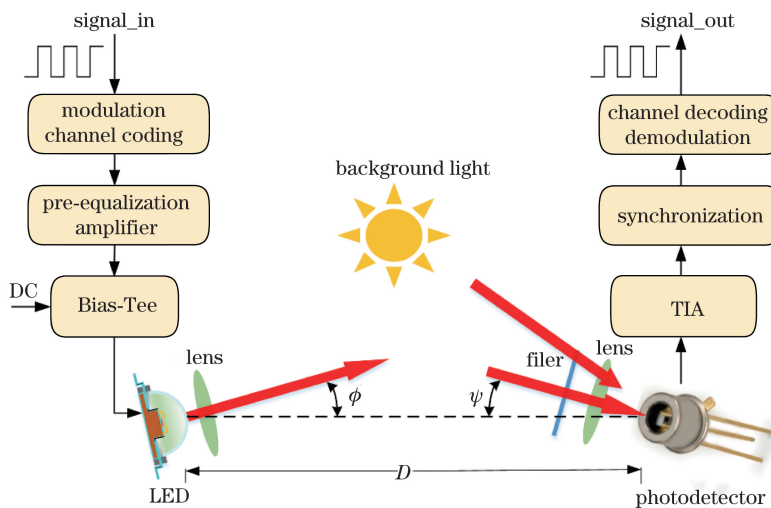


图1 室外可见光通信系统

Fig. 1 Schematic of outdoor VLC system

间信道中远距离传输后,光信号经聚光透镜和滤光片后由光电二极管(PD)接收;然后,信号被光电探测器接收并由跨阻放大器(TIA)放大;最后,完成同步、信道解码和解调之后恢复原始信号。

与室内 VLC 系统不同,光线在室外自由空间光信道中传播,信道增益主要由 LOS 链路贡献,因此接收端接收到的光功率与发射光功率之间的关系可以表示为

$$P_r = H(0)P_t, \quad (1)$$

式中: P_r 为接收功率; P_t 为发射功率; $H(0)$ 为 LOS 链路的信道增益, $H(0)$ 可表示为

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D^2} \cos^m \phi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (2)$$

式中: A 为探测器有效物理面积; D 为 LED 与接收端之间的距离; ϕ 为 LED 的辐射角; ψ 为接收端的光线入射角; $T_s(\psi)$ 为光滤波器增益; $g(\psi)$ 为聚光器增益; ψ_c 为接收端视场角(FOV); m 为光源的辐射模式数, m 可表示为^[14]

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}, \quad (3)$$

式中: $\phi_{1/2}$ 为发射端 LED 的半功率角。

2.2 信噪比分析

接收端噪声主要包括:散粒噪声 σ_{shot}^2 、热噪声 $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 和放大器噪声 $\sigma_{\text{amplifier}}^2$ 。其中散粒噪声 σ_{shot}^2 可表示为

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2q\gamma(P_r + P_{\text{bg}})B, \quad (4)$$

式中: q 为电荷电量; P_{bg} 为背景光功率; B 为等效噪声带宽。热噪声 $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 可表示为

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{4kT}{R_L}B, \quad (5)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; R_L 为接收端负载电阻。放大器噪声 $\sigma_{\text{amplifier}}^2$ 可表示为

$$\sigma_{\text{amplifier}}^2 = I_n^2 B_a, \quad (6)$$

式中: I_n 为放大器电流噪声密度; B_a 为放大器带宽。室外可见光通信系统的信噪比(SNR)可表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\gamma^2 P_r^2}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 + \sigma_{\text{amplifier}}^2}, \quad (7)$$

式中: γ 为探测器响应率。

2.3 LED 波段的选择

对于地面远距离 VLC 系统,太阳被视为环境背景光噪声的主要来源^[15]。太阳可等效为 5900 K

的黑体辐射模型,根据普朗克定理,黑体的光谱辐射出射度是波长和温度的函数,可表示为

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/(\lambda k T_s)] - 1}, \quad (8)$$

式中: λ 表示波长; h 为普朗克常数; c 表示光速; T_s 是太阳表面的平均温度。

对于室外自由空间光通信(FSO)链路,由太阳散射进入到视场内的背景光功率可表示为^[16]

$$P_{\text{bg}} = \eta_{\text{bg}} \cdot A \cdot L \cdot \Omega_r, \quad (9)$$

式中: η_{bg} 为滤光片通带内背景光功率与全波段内背景辐射光功率的比值; A 为探测器有效物理面积,远距离传输一般需要在接收端前加聚光透镜,透镜通光口径为 D_r ,则 $A = \pi D_r^2/4$; L 为近地天空光亮度,在不考虑太阳直射时,白天天空亮度一般为 $10 \sim 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ^[17]; Ω_r 为接收视场立体角,可表示为

$$\Omega_r = 4\pi \sin^2\left(\frac{\psi_c}{4}\right). \quad (10)$$

根据(8)式,因子 η_{bg} 可表示为

$$\eta_{\text{bg}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_s) d\lambda}{\int_0^{\infty} M(\lambda, T_s) d\lambda}, \quad (11)$$

式中: λ_2 和 λ_1 分别表示带通滤光片的上、下限截止波长。

综上(9)~(11)式分析可知,进入室外 VLC 系统视场内的背景光噪声主要与 3 个因素相关:1)滤光片中心波长 λ_c 及带宽 $\Delta\lambda$;2)接收机视场角 ψ_c ;3)探测器有效物理面积 A 。通过减小接收端聚光透镜的通光口径,即减小 A 的数值,可以有效降低背景光功率。但同时由(2)式可知,接收光功率与 A 成正比,因此优化该因子不宜作为降低背景光功率的首选方案,而通过选取合适的通信窗口和减小接收机 FOV,可以很大程度上减缓背景光的影响。

聚光透镜 $D_r = 28 \text{ cm}$,近地天空亮度 $L = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,接收机视场角 $\psi_c = 10^\circ$,图 2 给出了不同滤光片带宽及不同接收机 FOV 下的背景光功率。

由图 2 可见,室外 FSO 链路中太阳辐射出射度在红光范围内产生的背景光功率低于蓝光和绿光,因此选取红光波段的 LED 作为发射光源且在接收端采用窄带滤光片,可以有效降低背景光对室外 VLC 系统性能的影响。同时,对于室外 VLC 系统,接收机视场角越小,越能有效抑制背景光功率。同等滤光片带宽下,3种波段的背景光功率随着接收

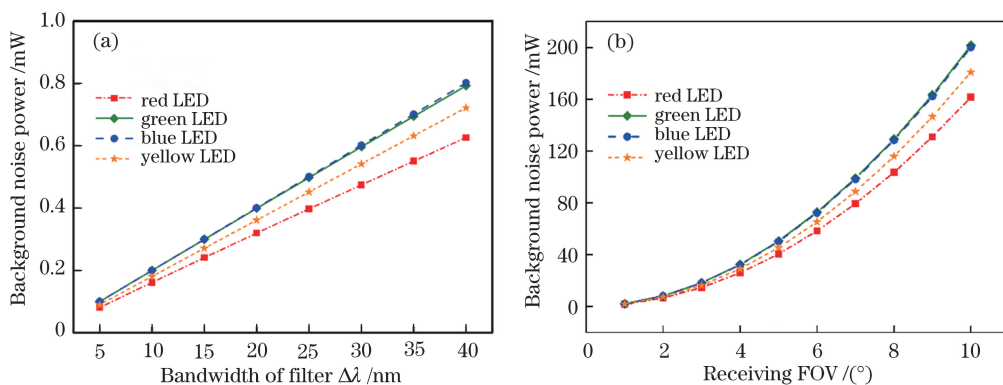


图 2 不同因素对背景光功率的影响。(a)滤光片带宽;(b)接收 FOV

Fig. 2 Influences of different factors on background light power. (a) Bandwidth of filter; (b) receiving FOV

机视场角的减小逐渐逼近,变化幅度显著大于滤光片带宽的影响,因此在设计的时候首先考虑视场角的优化方案。

3 星间 VLC 链路分析

3.1 基于 VLC 的双星伴飞构型

与单个大型卫星相比,多个小型航天器通过提

高适应性、可扩展性、可重构性和可承受性提供了更高的效率。当多卫星编队飞行时,需要在特定高度保持特定的距离和相对方位。各个小卫星通过协同工作,实现单颗昂贵大卫星的功能,整个星群构成一个虚拟卫星。根据飞行任务的不同,有不同类型的编队方式。常见的三种编队类型为:尾随、集群和星座^[18],如图 3 所示。

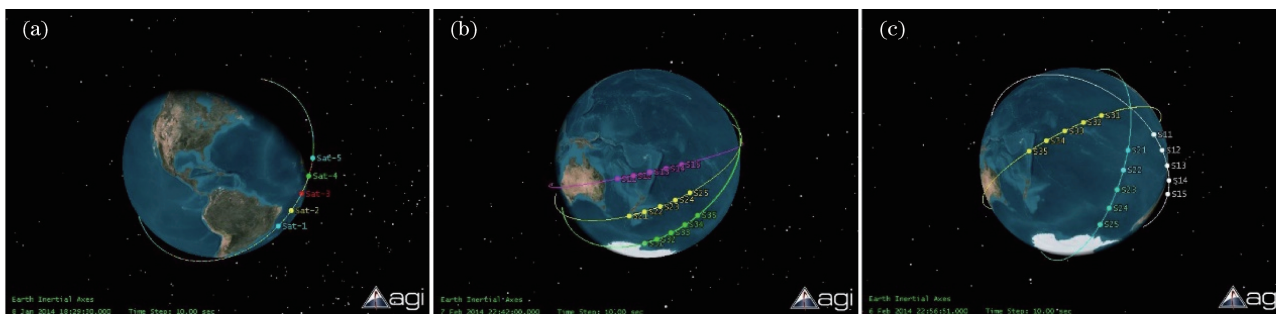


图 3 常见的编队飞行类型^[18]。(a)尾随;(b)集群;(c)星座

Fig. 3 Common formation flying types^[18]. (a) Trailing; (b) cluster; (c) constellation

最基本的卫星相对运动为伴飞星相对于轨道偏心率为零的主卫星的运动,伴飞模型的几何关系如图 4 所示^[19]。通常采用 Hill-Clohessey-Wiltshire (HCW)模型来描述,HCW 模型假设每颗卫星都遵循开普勒双体运动并且主要为圆形轨道,采用相对轨道元素(ROEs)可以有效描述 HCW 模型^[20],其中: r_c 和 r_s 分别为地球指向伴飞卫星和主星的矢量; ρ 是两个矢量的差矢量; (x, y, z) 用于描述相对运动坐标系中主星和伴飞星的距离; $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 用于描述相对运动坐标系中伴飞星与主星的相对速度。

采用 Hill 方程来求解 ROEs,假设相对运动的初始条件为 $(x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$,绕飞轨迹为封闭椭圆,则 Hill 方程的解可表示为^[21]

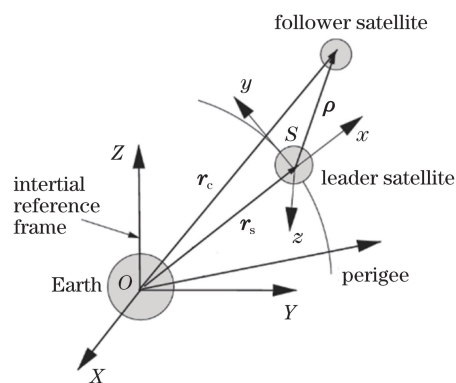


图 4 伴飞模型的几何关系

Fig. 4 Geometric relationship of formation flying model

$$\begin{cases} x = \frac{\dot{x}_0}{n} \sin nt + x_0 \cos nt \\ y = -2x_0 \sin nt + \frac{2}{n} \dot{x}_0 \cos nt \\ z = \frac{\dot{z}_0}{n} \sin nt + z_0 \cos nt \\ \dot{x} = -nx_0 \sin nt + \dot{x}_0 \cos nt \\ \dot{y} = -2\dot{x}_0 \sin nt - 2nx_0 \cos nt \\ \dot{z} = -nz_0 \sin nt + \dot{z}_0 \cos nt \end{cases}, \quad (12)$$

式中： n 为主星的平均运动角速度； t 为时间。

根据相对运动的初始条件及主星的轨道根数，可以获得编队中伴飞星的轨道根数，设计流程如

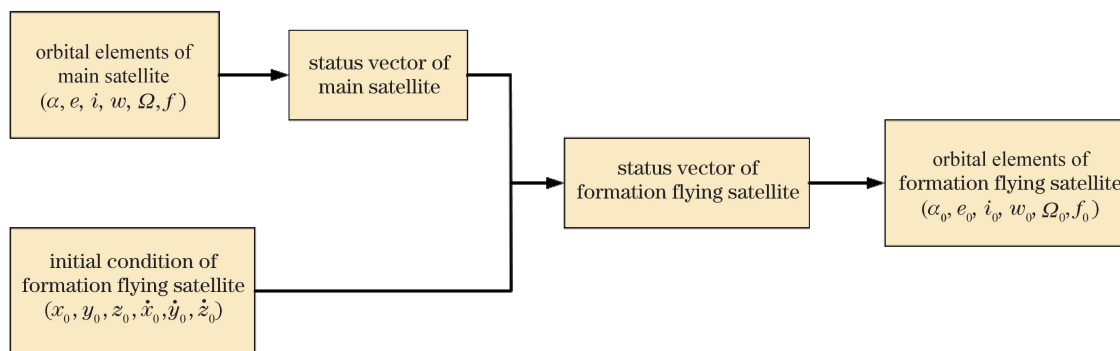


图 5 伴飞星轨道根数的设计流程图

Fig. 5 Design flow chart of orbital elements of formation flying satellite

表 1 双星伴飞构型的轨道根数

Table 1 Orbital elements of two-satellite formation flying model

Object	α /km	$e / 10^{-4}$	$i / (^\circ)$	$w / (^\circ)$	$\Omega / (^\circ)$	$f / (^\circ)$
Leader	6978.14	0	97.7924	0	234.066	0
F-1	6978.14	7.1776	97.7924	179.9890	234.066	180.017
F-2	6978.14	7.1776	97.7924	59.7659	234.066	300.169

表 1 中的 Leader 表示主星，F-1 表示伴飞星 1 号，F-2 表示伴飞星 2 号。根据表 1 中主星及伴飞星的轨道根数，在 STK 中构建双星伴飞模型，如图 6 所示，星间 VLC 系统示意图如图 7 所示。图中 DAC 表示数模转换，ADC 表示模数转换。

在伴飞星 F-1 及 F-2 之间建立星间 VLC 链路，飞行过程中需要考虑太阳的影响。对于空间观测类飞行器，由于大气层外的太阳辐射远远强于近地场景，因此避免太阳进入探测器视场角是至关重要的。在 F-1 和 F-2 之间建立矢量，同时分别建立伴飞星指向太阳的矢量，可以得到两颗伴飞星的太阳角，如图 8 所示。

图 5 所示^[21]，其中 α 为椭圆轨道的长半轴， e 为偏心率， i 为轨道倾角， w 为近地点幅角， Ω 为升交点赤经， f 为真近点角， α_0 、 e_0 、 i_0 、 w_0 、 Ω_0 和 f_0 为伴飞星的轨道根数。

基于以上分析，采用美国 AGI 公司的卫星工具软件 (Satellite Tool Kit, STK) 构建双星伴飞构型，其中：主星位于 600 km 高度接近圆形的近地低轨上；轨道偏心率为 0；轨道倾角为 97° ；升交点赤经 234° ；近地点幅角和真近点角都为 0° 。根据图 5 所示的设计流程，可得到基于水平圆编队方式的双星伴飞构型中两颗伴飞星的轨道根数，如表 1 所示。

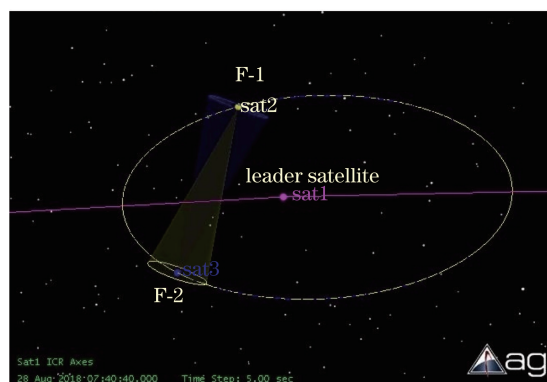


图 6 基于 STK 的双星伴飞构型

Fig. 6 Two-satellite formation flying model based on STK

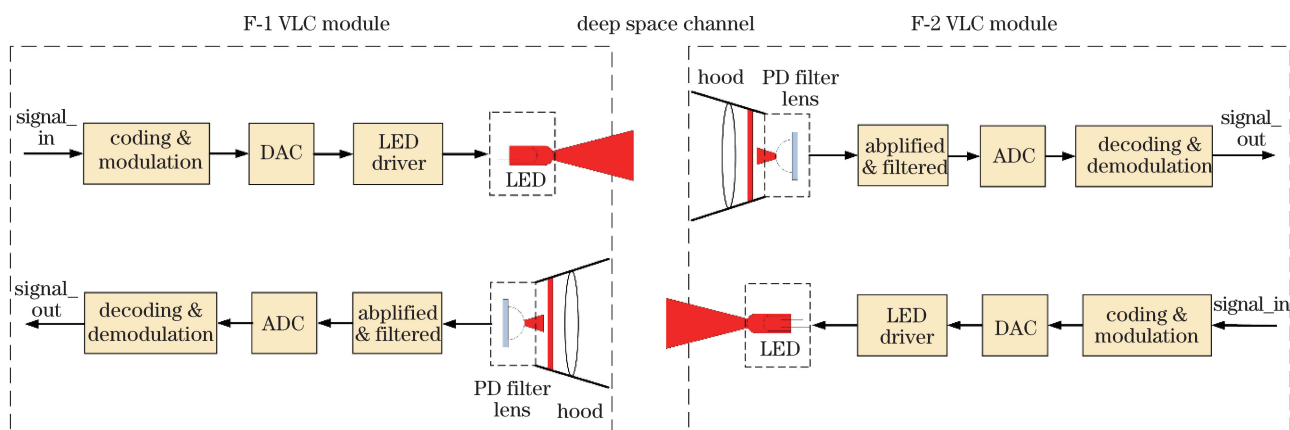


图 7 星间 VLC 链路示意图

Fig. 7 Schematic of inter-satellite VLC link

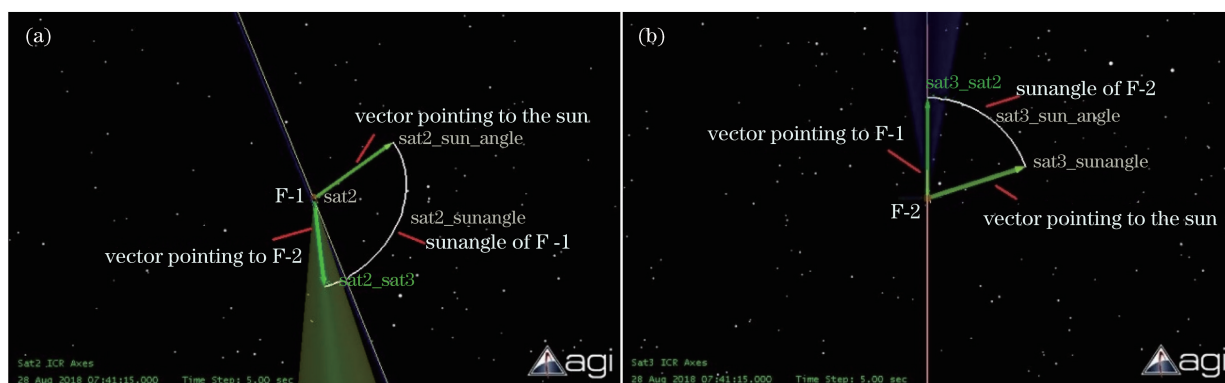


图 8 伴飞星的太阳角。(a) F-1; (b) F-2

Fig. 8 Solar angles of formation flying satellites. (a) F-1; (b) F-2

图 9 为双星伴飞构型围绕太阳飞行一年内[世界标准时(UTC)]的太阳角变化情况。由图可得, F-1 一年内的最小太阳角为 28.43° , F-2 一年内的最小太阳角为 29.14° , 均小于接收机 FOV。因此在伴飞星之间建立 VLC 链路具有可行性, 但太阳角不仅与轨道参数有关, 而且与探测器及其光学系统相

关。在轨飞行中存在太阳角小于视场角的情况, 从而造成探测饱和, 因此在接收端可以进一步减小视场角或者增加遮光罩, 并适当控制探测器的指向以避免太阳进入视场角。

为了在协同飞行中实现星间的相互通信, 对主星与 F-1、F-2 建立星间链路(ISL), 分析围绕太阳飞行一年内星间链路距离的最大值(D_{max})、最小值(D_{min})、平均值(D_{mean})与最小太阳角(θ_{min}), 结果如表 2 所示。

表 2 星间链路关键参数

Table 2 Key parameters of inter-satellite link

ISL	D_{max} /km	D_{min} /km	D_{mean} /km	θ_{min} /($^\circ$)
Leader to F-1	10.75	5.33	8.50	5.92
Leader to F-2	10.74	5.33	8.53	51.65
F-1 to F-2	17.37	8.68	13.39	28.43

3.2 深空 FSO 链路的背景光分析

在深空应用场景中, 背景噪声的主要来源是: 来自太阳和其他恒星(点)物体的背景噪声和探测器收集到的杂散光^[22]。因此深空 FSO 链路的背景光噪

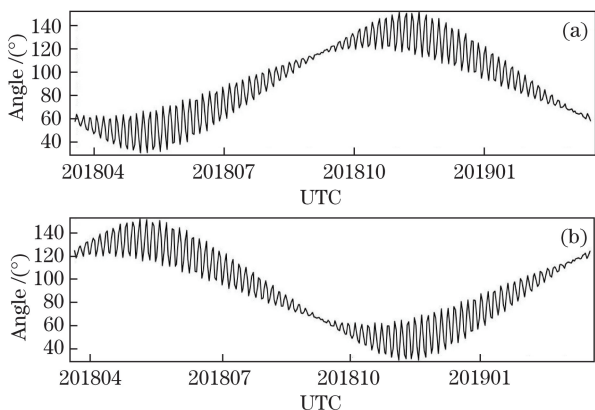


图 9 伴飞星一年内的太阳角变化。(a) F-1; (b) F-2

Fig. 9 Variations of solar angles of formation flying satellites within one year. (a) F-1; (b) F-2

声可表示为

$$P_{bg} = P_{bg_sun} + P_{bg_star}, \quad (13)$$

式中: P_{bg_sun} 为由太阳引入的背景光噪声; P_{bg_star} 为由恒星引入的背景光噪声。

在地面 FSO 链路中, 来自其他天体(如恒星)的背景辐射由于太弱通常被忽略, 但在深空 FSO 链路中, 该类背景噪声造成的影响较大, 因此需进一步分析。由恒星引入的背景光噪声可表示为

$$P_{bg_star} = N_{FOV} \cdot P_{NEP} \cdot \sqrt{B}, \quad (14)$$

$$N_{FOV} = 6.57 \times \exp(1.08M_r) \times \frac{1 - \cos(\psi_c/2)}{2}, \quad (15)$$

$$M_r = \frac{P_{NEP} \cdot \sqrt{B}}{A}, \quad (16)$$

式中: N_{FOV} 为进入接收端 FOV 且平均照度大于 M_r 的恒星数^[23]; P_{NEP} 为探测器的噪声等效功率; M_r 为接收端光电探测器的最小可探测照度^[24]。

相比于其他星体, 太阳对于卫星探测系统的影

响较大, 通常需要避开太阳工作, 但太阳或者其他星体引入的杂散光干扰不可避免。接收端入瞳面上的背景辐照度可近似表示为^[25]

$$M_{bg_sun} = M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (17)$$

式中: $M_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内太阳表面的辐射出射度; r 为太阳半径; R 为太阳到卫星的平均距离。对于近地轨道卫星, R 可近似为平均日地距离。

假设星间 VLC 链路采用峰值波长为 650 nm 的红光 LED 及相应 10 nm 带宽的窄带滤光片, 并在接收端采用通光口径为 28 cm 的聚光透镜。对于 600 km 高度的近地轨道卫星, 太阳正入射下系统入瞳口径处的辐照度为 16 W/m², 通过商用软件 LightTools 建立光学系统模型, 分析了探测器上的杂散光强度分布。由表 2 可知, 双星伴飞构型中的最小太阳角在 5.92°~51.65°内, 图 10 给出了临界情况下探测器的背景光功率分布, 图 11 所示为不同太阳角对背景光功率的影响。

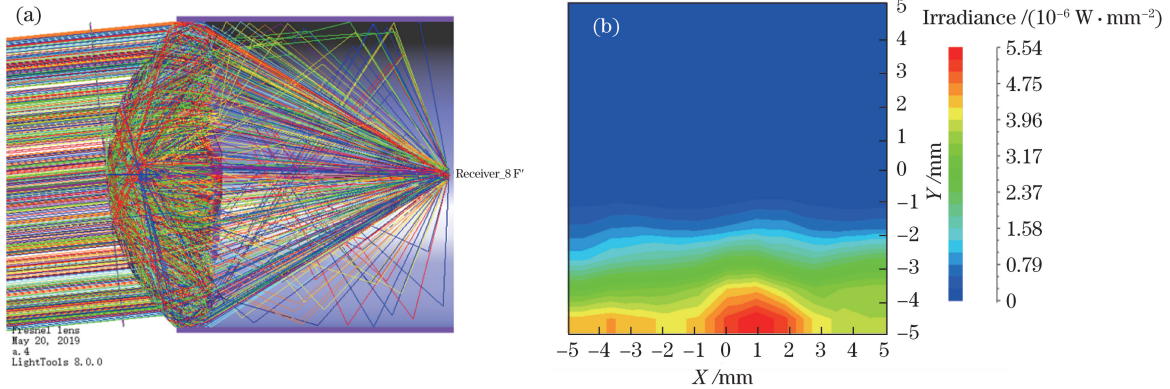


图 10 临界情况下的背景光功率分布。(a) 5.92°太阳角入射;(b)探测器照度分布

Fig. 10 Distributions of background light powers in critical cases. (a) 5.92° solar angle incidence; (b) illuminance distribution of detector

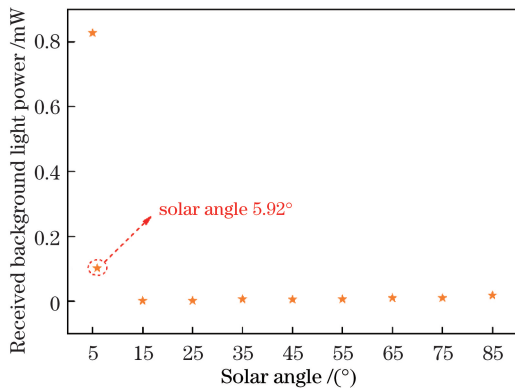


图 11 不同太阳角下的背景光功率

Fig. 11 Background light powers at different solar angles

由图 10 和图 11 可见, 由于设置的接收端视场角小于太阳临界入射角, 临界情况下探测器的背景光功率相比 5°入射时降低了 87.5%。同时当太阳角为 15°时, 由太阳辐射引入的杂散光降低至 10 μW 以下, 相比于地面场景引入的背景光功率降低了 75%。考虑到双星伴飞构型在轨飞行的大部分时间里, 太阳角大于 15°, 因此深空 VLC 相比于地面室外应用具有更高的信噪比。

3.3 发射机功率预算

针对中短距离星间链路, 给出了深空场景下室外 VLC 系统性能的数值仿真, 发射端采用中心波长为 650 nm 的红光 LED, 为了降低远距离传输的

几何损耗,通过二次光学设计将其半功率角设计为 1° 。对比强度调制/直接检测(IM/DD)方案中常见的调制技术,包括开关键控(OOK)、脉冲幅度调制(PAM)、脉冲位置调制(PPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM),得到系统信噪比与误码率性能的关系曲线,如图12所示,在同一信噪比数值下,8-PPM调制方案具有最低的误码率,功率利用率较高,适用于功率受限的空间应用平台。

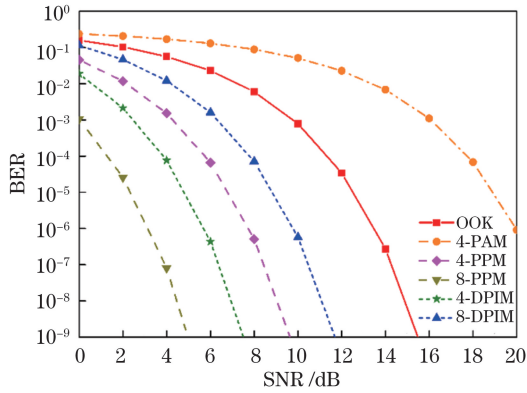


图12 不同调制方案下的误码率与信噪比关系曲线

Fig. 12 BER as a function of SNR under different modulation schemes

对于独立同分布(IID)系统, L -PPM调制的误码率 P_{BER} 可表示为^[26]

$$P_{BER} = \frac{L}{2} \cdot Q\left(\sqrt{R_{SN} \cdot \frac{L \cdot \ln L}{2}}\right), \quad (18)$$

式中: $Q(\cdot)$ 表示 Q 函数; L 表示PPM符号的时隙数。

联立(1)式、(2)式、(7)式和(18)式,可获得信噪比、距离、发射光功率、数据率等参数与系统误码率的关系。通过数值仿真分析了经1~20 km自由空

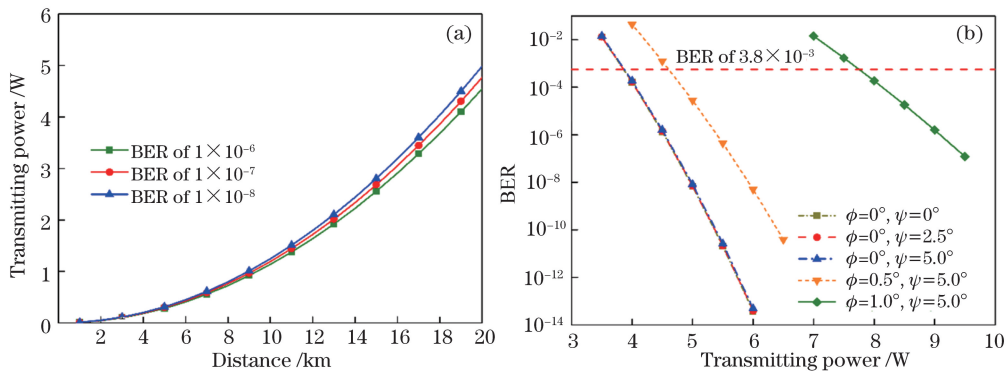


图13 深空场景下的性能分析。(a)不同误码率下发射功率与传输距离的关系曲线;

(b) 20 km处不同收发角度下误码率与发射功率的关系

Fig. 13 Performance analysis in deep space scenes. (a) Transmitting power as a function of transmission distance under different BERs; (b) BER as a function of transmitting power at different transmitting and receiving angles when transmission distance is 20 km

间信道传输后,对于给定通信指标下发射机所需的最小功率预算,具体仿真参数如表3所示。

表3 星间VLC链路仿真参数

Table 3 Simulation parameters of inter-satellite VLC link

Parameter	Value
Peak wavelength of LED λ /nm	650
Half power angle of LED /($^\circ$)	1
Bandwidth /MHz	300
Modulation scheme	8-PPM
Photodiode responsivity /($A \cdot W^{-1}$)	0.53
Field of view at receiver /($^\circ$)	5
Refractive index of a lens at a PD	1.5
Gain of an optical filter $T_s(\phi)$ /dB	1
Detector physical area of a PD /($A \cdot m^{-2}$)	0.62
Noise equivalent power of receiver /($pW \cdot Hz^{-1/2}$)	0.02
Input current noise density I_n /($pA \cdot Hz^{-1/2}$)	3.7
Absolute temperature /K	298
Load resistance /k Ω	10
Other propagation losses /dB	2

在深空场景中,不同误码率下发射功率与距离的关系如图13(a)所示。由图可得,当距离从1 km变为20 km时,在 1×10^{-6} 的误码率下300 MHz带宽传输所需的发射功率至少为0.01~4.55 W,但所需的发射功率将随误码率的降低而增加。仿真结果表明,在数据传输速率为112.5 Mbit/s、误码率为 1×10^{-6} 的情况下,20 km距离内系统所需的发射光功率至少为4.55 W。图13(b)所示为传输距离20 km时,不同的收发角度下系统误码率与发射功率的关系。由图可得,接收端视场内光信号以不同

入射角入射对于系统发射功率的影响较小,而发射端由于采用功率半角较小的 LED 光源,光源出射角对于系统发射功率有较大的影响。当接收端入射角 γ 为 5° 时,为了满足 7% 硬判决前向纠错编码 (FEC) 的 BER 门限 (3.8×10^{-3}),LED 的辐射角 ϕ 分别为 $0^\circ, 0.5^\circ, 1.0^\circ$ 时系统所需要的发射功率分别为 3.88, 4.72, 7.86 W。

4 基于 SIMO-VLC 的分集检测技术

空间碎片是人类空间活动的产物。尺寸大于

10 cm 的空间碎片约有 1.9 万个;尺寸在 1~10 cm 之间的空间碎片约有 50 多万个;尺寸小于 1 cm 的空间碎片约有 0.3~0.4 亿个。信道中的空间碎片数量众多,可能导致星间 VLC 链路的深度衰落和通信中断。空间分集技术采用多个发射/接收孔径,不仅可以缓解长距离信道衰落,同时通过进一步降低障碍物暂时阻挡可见光束的可能性,可以显著提升光无线通信 (OWC) 系统的链路容量和可靠性^[20]。星间链路的 SIMO-VLC 系统模型如图 14 所示。

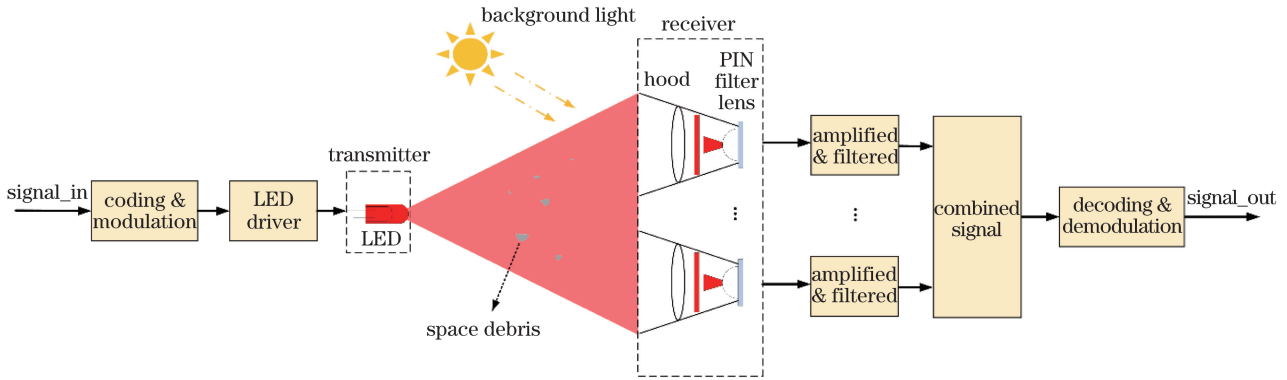


图 14 星间链路的 SIMO-VLC 系统框图

Fig. 14 Schematic of SIMO-VLC system for inter-satellite link

在单输入多输出 (SIMO) 的接收机分集情况下,多路信号通过一定的合并算法进行合并,包括选择合并 (SC)、等增益合并 (EGC) 以及最大比合并 (MRC)^[27]。假设接收端有 N_R 个支路,在 SC 算法中,从 N_R 个支路中选择接收光功率或 SNR 最大的接收信号作为输出,可得最大信噪比为

$$R_{SN_SC} = \max[R_{SN}(i)] = \max\left[\frac{\gamma^2 P_r^2(i)}{\sigma_i^2}\right], \quad (19)$$

式中: $R_{SN}(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N_R$) 为各支路的信噪比; σ_i^2 为接收端第 i 个探测前端的噪声方差; $P_r(i)$ 为各支路接收到的光功率。在 EGC 算法中,所有支路的信号以相同的加权系数进行合并,合并后输出的平均信噪比可表示为

$$R_{SN_EGC} = \frac{\gamma^2}{N_R \sigma^2} \left[\sum_{i=1}^{N_R} P_r(i) \right]^2, \quad (20)$$

式中: σ^2 为接收端噪声的方差总和。在 MRC 算法中,各支路信号的加权系数由所对应的信噪比决定,高 SNR 支路比低 SNR 支路具有更大的加权系数。最大比合并后的 SNR 为各支路 SNR 之和,因此, MRC 算法中,支路信号合并后输出的平均信噪比可表示为

$$R_{SN_MRC} = \frac{\gamma^2}{N_R \sigma^2} \sum_{i=1}^{N_R} [P_r(i)]^2 = \sum_{i=1}^{N_R} R_{SN}(i). \quad (21)$$

图 15 给出了 SIMO-VLC 系统中,传输距离为 20 km 且接收支路 N_R 分别为 2 和 4 时,不同合并算法下系统误码率与发射功率的关系。由图可得, MRC 算法与 EGC 算法性能相近,均优于 SC 算法, MRC 使合并后接收端的信噪比达到最大。为了实现相同的误码率, SIMO 方案相比 SISO 方案所需的发射功率显著降低,且随着接收端支路数的增加而降低。为了满足 7% 硬判决前向纠错编码 (FEC) 的 BER 门限 (3.8×10^{-3}), SISO、SIMO-SC、SIMO-EGC 和 SIMO-MRC 系统所需要的发射功率分别为 3.88, 1.99, 1.62, 1.59 W。图中 Tx 表示发射支路, Rx 表示接收支路。

对于以上 3 种合并方案, SC 是最简单的,因为它仅处理分集支路中的一个,但容易造成资源冗余; MRC 获得了最佳性能,但通常需要复杂的接收系统; EGC 易于实现,且性能接近于 MRC,常用于实际的工程应用中。图 16 所示为 SIMO-VLC 系统中,该系统采用 EGC 合并算法下系统误码率与传输距离的关系。由图可得,当发射功率为 2 W 时,在 3.8×10^{-3} 的 BER 门限下 SISO 系统和 2-EGC、3-EGC、4-EGC 的传输距离分别为 14.2, 22.2, 24.6, 26.6 km; 在 1×10^{-6} 的 BER 门限下 SISO 系统和

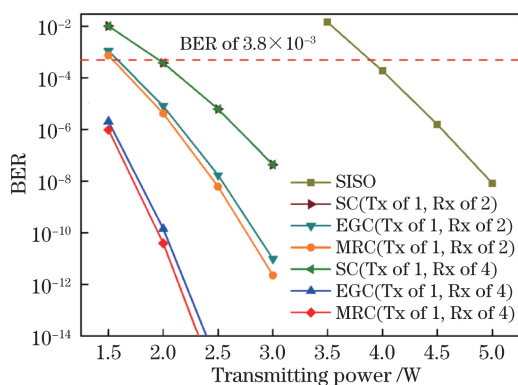


图 15 不同分集检测方案下误码率与发射功率的关系

Fig. 15 BER as a function of transmitting power under different diversity detection schemes

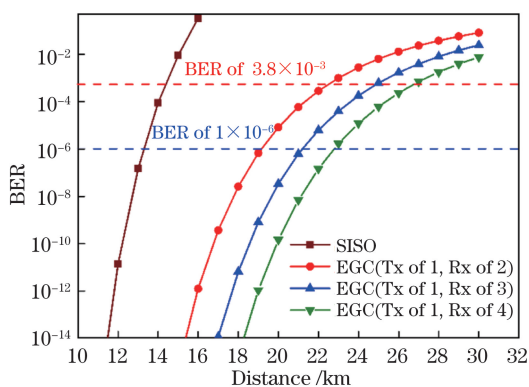


图 16 EGC 合并算法下误码率与传输距离的关系

Fig. 16 BER as a function of transmission distance under EGC merging algorithm

2-EGC、3-EGC、4-EGC 的传输距离分别为 13.4, 19, 21.2, 22.6 km。因此相比 SISO 系统,采用基于 SIMO 的分集检测方案可以获得更长的传输距离,且通信距离随着接收支路的增加而增加。

5 结 论

在采用 STK 构建双星伴飞构型的基础上,定量分析了太阳及恒星引入的背景光噪声,对中短距离星间 VLC 链路进行研究与仿真。结果表明:双星伴飞构型的最小太阳角在 $5.92^\circ \sim 51.65^\circ$ 范围内,对于 FOV 为 5° 的接收机,临界情况下太阳引入的杂散光约为 $102 \mu\text{W}$ 。在轨飞行的大部分时段中,由太阳辐射引入的杂散光功率降低至 $10 \mu\text{W}$ 以下,相比于地面场景引入的背景光功率降低了 75%。在数据传输速率为 112.5 Mbit/s、误码率为 1×10^{-6} 的情况下,在 20 km 距离内系统所需的发射光功率至少为 4.55 W。为了提高链路容量和可靠性,构建基于星间链路的 SIMO-VLC 系统,并通过数值仿真评估了不同分集合并算法对于链路性能的影响。结果

表明:在满足 7% 硬判决 FEC 的 BER 门限 3.8×10^{-3} 的情况下,SISO、SIMO-SC、SIMO-EGC 和 SIMO-MRC 系统所需要的发射功率分别为 3.88, 1.99, 1.62, 1.59 W。当发射功率为 2 W 时,在 3.8×10^{-3} 的 BER 门限下 SISO 系统和 2-EGC、3-EGC、4-EGC 的传输距离分别为 14.2, 22.2, 24.6, 26.6 km。因此相比 SISO 系统,采用基于 SIMO 的分集检测方案可以获得更好的性能,且所需发射功率和通信距离随着接收支路的增加而增加。

参 考 文 献

- [1] Carpenter J R, Leitner J, Folta D, *et al.* Benchmark problems for spacecraft formation flying missions[C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August 11-14, 2003, Austin, Texas, USA. Reston: AIAA Publications, 2003: 5364.
- [2] Zhang T, Fu Q, Jiang H L, *et al.* Effects of transmitting and receiving energy efficiency on the performance of co-focal reflective type laser communication networking antenna system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1206002.
张涛, 付强, 姜会林, 等. 能量收发效率对共焦点反射式光通信组网天线系统性能的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1206002.
- [3] Wood L, Ivancic W, Dörpelkus K P. Using light-emitting diodes for intersatellite links[C] // 2010 IEEE Aerospace Conference, March 6-13, 2010, Big Sky, MT. New York: IEEE, 2010: 11258517.
- [4] Zafar F, Bakaul M, Parthiban R. Laser-diode-based visible light communication: toward gigabit class communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 144-151.
- [5] Shen T. Optical wireless communication for mobile platforms[D]. Maryland, USA: University of Maryland, College Park, 2016.
- [6] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [7] Wang J A, Che Y, Guo L Y, *et al.* LED layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506002.
王加安, 车英, 郭林扬, 等. 室内可见光通信系统光源 LED 布局优化与性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506002.
- [8] Bian R, Tavakkolnia I, Haas H. 15.73 Gb/s visible light communication with off-the-shelf LEDs[J].

- Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2418-2424.
- [9] Chen H, Guan W P, Li S M, *et al.* Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using modified genetic algorithm[J]. Optics Communications, 2018, 413: 103-120.
- [10] Béchadergue B, Chassagne L, Guan H Y. Experimental comparison of pulse-amplitude and spatial modulations for vehicle-to-vehicle visible light communication in platoon configurations[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24790-24802.
- [11] Wang F M, Liu Y F, Jiang F Y, *et al.* High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception[J]. Optics Communications, 2018, 425: 106-112.
- [12] Nakajima A, Sako N, Kamemura M, *et al.* ShindaiSat: a visible light communication experimental micro-satellite [C]//Proceedings of the International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 9-12, 2012, Ajaccio, Corsica, France. Koganei: NICT, 2012: 12-1.
- [13] Zhang M L, Yuan X G, Huang Y Q. A 10.7 km visible light communications experiment[C]//2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), July 5-8, 2016, Vienna, Austria. New York: IEEE, 2016: 231-234.
- [14] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [15] Căilean A M, Dimian M. Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2681-2703.
- [16] Zhao J Q, Xu Y F, Li J H, *et al.* Turbulence channel modeling of visible light communication under strong background noise and diversity receiving technologies [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0301001.
赵嘉琦, 许银帆, 李洁慧, 等. 强背景光下可见光大气湍流信道建模及分集接收技术 [J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0301001.
- [17] Wan M, Su Y, Yang R, *et al.* Improvement of signal to noise ratio in astronomical objects detection in daytime[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(12): 1151-1154.
- 万敏, 苏毅, 杨锐, 等. 提高白天观测星体信噪比的方法研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(12): 1151-1154.
- [18] ESA Navipedia. Satellite formation flying [OL]. (2018-09-07)[2019-05-10]. [http://www.navipedia.net/index.php/Satellite Formation Flying](http://www.navipedia.net/index.php/Satellite%20Formation%20Flying).
- [19] Kumar K D, Bang H C, Tahk M J. Satellite formation flying using along-track thrust[J]. Acta Astronautica, 2007, 61(7/8): 553-564.
- [20] Clohessy W H, Wiltshire R S. Terminal guidance system for satellite rendezvous[J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1960, 27(9): 653-658.
- [21] Ling L, Zhang T, Zheng W B. Visible analysis of orbital target in formation-flying satellites based on space-based optical observation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s112004.
凌丽, 张涛, 郑伟波. 基于编队星座的在轨目标天基光学观测可见性分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s112004.
- [22] Kaushal H, Kaddoum G. Free space optical communication: challenges and mitigation techniques [J/OL]. (2015-06-16)[2019-05-10]. <https://arxiv.org/abs/1506.04836>.
- [23] Li J. Research on key technologies of APS star sensor [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2005.
李杰. APS 星敏感器关键技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2005.
- [24] Liu Z Y, Hu Y, Zhang L, *et al.* Power calculation and communication distance equivalent demonstration for optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s2): 188-190.
刘智颖, 胡源, 张磊, 等. 光通信中的功率计算与通信距离等效验证 [J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 188-190.
- [25] Zhou S C. Introduction to advanced infrared photoelectric engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014.
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [26] Borah D K, Boucouvalas A C, Davis C C, *et al.* A review of communication-oriented optical wireless systems[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012: 91.
- [27] Liu W H, Xu Z Y, Yang L Q. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence[J]. Photonics Research, 2015, 3(3): 48-53.