

军车隐秘编队的无线紫外光通信最优多跳中继研究

赵太飞^{*①②} 李永明^① 许 杉^① 王世奇^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 710000)

摘 要: 无线紫外光通信成为强电磁干扰下的有效通信手段, 满足复杂战场环境下车队执行战略物资运输和弹车队隐蔽行驶时车辆间保持可靠隐秘通信的需求。在行驶中每辆车自身作为其它车辆的中继, 通过多跳方式为非视线内车辆之间建立稳定可靠的通信链路。因此, 基于紫外光单次散射模型, 该文研究了最优多跳中继问题, 理论分析了收发仰角与频谱效率的关系, 依据使频谱效率最大化原则, 得出最优跳数近似表达式。仿真结果表明, 不同距离移位范围和不同收发仰角都对应特定的最优跳数值, 与最优能量计算方法相比, 最大频谱效率计算方法在小功率传输时有更好的传输能力, 并且达到节约功率的需求。紫外光长距离通信时, 系统性能并不随着协作中继数的增加而提高, 选取合适的中继数及小发射仰角和大接收仰角的结构配置, 系统可获得较高的传输能力。

关键词: 无线紫外光通信; 多跳中继通信; 最优跳数; 频谱效率

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)11-2636-07

DOI: 10.11999/JEIT190172

Research on Optimum Multi-hop Relay of Wireless Ultraviolet Communication in Military Vehicle Secret Formation

ZHAO Taifei^{*①②} LI Yongming^① XU Shan^① WANG Shiqi^①

^①(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

^②(Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710000, China)

Abstract: Wireless ultraviolet communication becomes an effective means of communication under strong electromagnetic interference, which meets the need of reliable and secret communication between vehicles when the fleet performs strategic material transportation and the missile vehicle fleet of concealed driving vehicles in a complex battlefield environment. Each vehicle acts as a relay for other vehicles while driving, and establishes a stable and reliable communication link between non-line-of-sight vehicles through a multi-hop model. Therefore, based on the single-scattering model of ultraviolet, the optimum multi-hop relay problem is studied, and the relationship between the elevation angle of the transmitting and receiving and the spectral efficiency is theoretically analyzed. According to the principle of maximizing the spectral efficiency, the approximate expression of the optimum number of hops is obtained. The simulation results show that the optimum number of hops correspond to different distance shift range and elevation angles. Compared with the optimum energy calculation method, the proposed method has better transmission capability in low power transmission and achieves the requirement of power saving. In the long-distance ultraviolet communication, system performance does not increase with the number of cooperative relays. The system can obtain a higher transmission capacity by selecting a suitable number of relays and a small transmission elevation angle and a large receiving elevation angle.

Key words: Wireless ultraviolet communication; Multi-hop relay communication; Optimum number of hops; Spectral efficiency

收稿日期: 2019-03-21; 改回日期: 2020-03-04; 网络出版: 2020-04-21

*通信作者: 赵太飞 zhaotafei@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61971345), 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(17JF024), 西安市科学计划项目(CXY1835(4)), 陕西省重点产业链创新计划项目(2017ZDCXL-GY-06-01), 西安市碑林区科技计划项目(GX1921)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971345), The Service Local Special Plan Project of Shaanxi Province Education Department (17JF024), The Xi'an Science Project (CXY1835(4)), The Shaanxi Key Industry Chain Innovation Project (2017ZDCXL-GY-06-01), The Science and Technology Plan Project of Xi'an Beilin Area (GX1921)

1 引言

紫外(UltraViolet, UV)波长在200~280 nm的波段, 由于臭氧分子的强烈吸收作用, 使得该波段的紫外光在近地面几乎衰减为零, 称该波段为“日盲区”^[1]。无线紫外光通信主要利用该波段的紫外光作为载体, 通过大气分子、气溶胶等微粒的散射作用进行信息的传递^[2], 具有非直视(Non-Line-Of-Sight, NLOS)、高保密性、低窃听率、抗干扰能力强等优点, 特别适用于无人机编队飞行、海军舰艇编队、陆军装甲编队、导弹车车队在无线电静默和复杂环境下的军事隐秘通信^[3,4]。但由于紫外光的散射通信以及大气湍流的偏折作用, 大气信道衰减严重、接收信号微弱、具有高路径损耗等, 使得紫外光通信传输距离有限^[5]。因此, 通过多跳中继方式来延长无线紫外光通信距离成为研究的热点。

目前已有学者对紫外光多跳中继通信进行了相关研究, 文献^[6]在紫外光通信网中通过多跳中继方式增加了通信范围, 并节省了功率消耗。文献^[7]研究了紫外光多跳中继通信中节点连通问题, 适当调整节点密度、发射功率和数据速率, 使得紫外光多跳中继通信网络中中继孤立节点存在的概率趋近于零。文献^[8]针对紫外光通信中光源器件发射功率受限和大气信道衰减严重造成传输距离近的问题, 提出采用多跳中继方式构建紫外光长距离通信链路, 提高了系统功率利用率。文献^[9]研究结果表明, 选择合适的无线紫外光通信系统配置对提高多跳中继通信系统性能是至关重要的。

上述研究都是建立在节点等距离分布下的性能研究, 而对于紫外光多跳中继通信系统中节点随机分布的最优跳数问题研究较少。文献^[10]为减少无线传感器网络节点的能量消耗, 使用紫外光作为信息载体, 在等距离分布下得出了使能量消耗最低的最优跳数表达式。但研究未考虑紫外光通信系统配置问题, 而紫外光通信的整体性能高度依赖于系统配置, 特别是收发仰角^[9]。因此, 本文基于无线紫外光非直视单次散射模型, 研究了车队中车辆在随机分布状态下无线紫外光多跳中继通信的收发仰角与最优跳数的关系, 根据信道容量和路径损耗得出两者之间的近似表达式, 并分析了不同收发仰角下的系统性能。

2 无线紫外光多跳中继通信系统模型

2.1 无线紫外光非直视单次散射模型分析

由于大气对紫外光强散射作用, 使紫外光通信信道能够构成非直视通信链路。实际中紫外光通信是多次散射的, 但在短距离通信中, 单次散射传输

为主^[11], 因此本文以单次散射模型作为研究基础。紫外光单次散射模型如图1所示^[12], β_T 是发射仰角, β_R 是接收仰角, θ_T 是发散角, θ_R 是接收视场角, V 是有效散射体, θ_s 是散射角, r 是收发端基线距离。

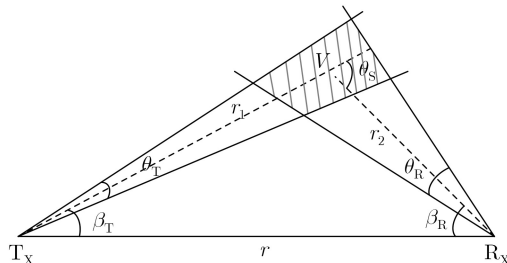


图1 无线紫外光非直视单次散射通信模型

发射端 T_X 以 β_T 和 θ_T 的角度向空间发射光信号, 光信号在有效散射体 V 内散射后, 接收端 R_X 以 β_R 和 θ_R 的角度进行光信号接收, 则紫外光单次散射通信的接收光功率为^[12]

$$P_r = \frac{P_t A_r K_s P_s \theta_R \theta_T^2 \sin(\beta_T + \beta_R)}{32\pi^3 r \sin \beta_T \left(1 - \cos \frac{\theta_T}{2}\right)} \cdot \exp \left[-\frac{K_e r (\sin \beta_T + \sin \beta_R)}{\sin(\beta_T + \beta_R)} \right] \quad (1)$$

其中, P_t 是发射光功率, A_r 是接收孔径面积, K_s 是大气散射系数, P_s 是散射角 θ_s 的相函数, K_e 是大气信道衰减系数, 且 $K_e = K_a + K_s$, K_a 是大气吸收系数。

非直视紫外光散射通信的路径损耗可表示为发射光功率与接收光功率的比值, 如式(2)所示

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{32\pi^3 r \sin \beta_T \left(1 - \cos \frac{\theta_T}{2}\right)}{A_r K_s P_s \theta_R \theta_T^2 \sin(\beta_T + \beta_R)} \cdot \exp \left[\frac{K_e r (\sin \beta_T + \sin \beta_R)}{\sin(\beta_T + \beta_R)} \right] \quad (2)$$

式(2)为路径损耗计算表达式, 只适用于收发仰角较小的状态, 当收发仰角较大时, 不再适用于分析非直视紫外光散射通信。而在实际应用中当通信距离小于1 km时, 通常采用路径损耗简化公式^[13]

$$L = \xi r^\alpha \quad (3)$$

其中, ξ 是路径损耗因子, α 是路径损耗指数, 其都是与收发仰角有关的参数。

2.2 无线紫外光多跳中继节点随机分布结构模型

本文研究的紫外光多跳通信结构模型, 考虑1维 N 跳网络结构且每跳的距离是随机性的, 其无线紫外光多跳中继节点随机分布模型如图2所示, 当 $r_1 = r_2 = \dots = r_N = d/N$ 时, 即为等距离分布。紫外光多跳中继通信系统有一个源节点 S , 一个目

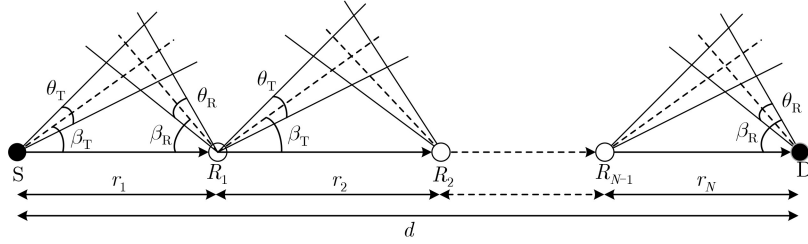


图2 无线紫外光多跳中继节点随机分布模型

的节点D, $N-1$ 个中继节点 R_i ($i=1, 2, \dots, N-1$), 且 R_i 随机分布在S到D的距离范围内。假设所有节点采用半双工通信方式, 考虑经典 N 跳时分解码转发协议, 每个中继节点 R_i 接收 R_{i-1} 发送的信息, 并解码转发到 R_{i+1} 节点。

假设中继节点位置是独立随机变量, 并设 X_i 是第 i 个中继节点在S到D间的随机位置, 则 X_i 的概率密度函数为^[14]

$$f(X_i) = \begin{cases} \frac{1}{r\delta}, & r\left(i - \frac{\delta}{2}\right) \leq X_i \leq r\left(i + \frac{\delta}{2}\right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $r=d/N$ 是等分距离, d 是S到D的实际距离, $\delta \in [0, 1]$ 是随机偏移范围, 其表征中继节点位置的随机性或者不确定性。

定义 $r_i = X_i - X_{i-1}$ ($i=2, 3, \dots, N-1$), 特别地, $r_1 = X_1$, $r_N = d - X_{N-1}$, 则 r_i 的累积分布函数表示为对于 $i=1$ 或 N 时,

$$F(r_i) = \begin{cases} 0, & r_i \leq r\left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \\ \frac{1}{r\delta} \left(r_i - r\left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \right), & r\left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \leq r_i \leq r\left(1 + \frac{\delta}{2}\right) \\ 1, & r_i \geq r\left(1 + \frac{\delta}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

对于 $i=2, 3, \dots, N-1$ 时,

$$F(r_i) = \begin{cases} 0, & r_i \leq r(1 - \delta) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r\delta} \right)^2 [r_i - r(1 - \delta)]^2, & r(1 - \delta) \leq r_i \leq r \\ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r\delta} \right)^2 [r(1 + \delta) - r_i]^2, & r \leq r_i \leq r(1 + \delta) \\ 1, & r_i \geq r(1 + \delta) \end{cases} \quad (6)$$

3 无线紫外光多跳中继节点随机分布最优跳数分析

根据紫外光NLOS单次散射模型, 其紫外光通信在量子极限条件下的信噪比为^[12]

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{\eta_f \eta_r P_t \lambda}{2hcBL} = \mu \xi^{-1} r^{-\alpha} \quad (7)$$

其中, $\mu = \frac{\eta_f \eta_r P_t \lambda}{2hcB}$, η_f 和 η_r 分别表示滤光片透过率和光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT)探测效率, λ 是紫外波长, h 是普朗克常数, c 是光速, $B = \frac{K_e c}{2\pi}$ 是紫外光通信信道带宽。

利用香农公式可以计算出紫外光NLOS通信的信道容量^[12], 则紫外光单跳通信的频谱效率为

$$\eta_{\text{sh}} = \log_2(1 + \mu \xi^{-1} d^{-\alpha}) \quad (8)$$

在源节点到目的节点等距离分布 N 跳通信传输时, 假设在任何时间点上只有一个节点进行传输, 即在接收端无干扰, 且每个节点在 $1/N$ 时间传输相同的信息量, 则每跳频谱效率是单跳通信的 N 倍, 其等距离分布的频谱效率为

$$\eta_{\text{eq}} = \frac{1}{N} \log_2 \left(1 + \mu \xi^{-1} \left(\frac{d}{N} \right)^{-\alpha} \right) \quad (9)$$

从式(9)可以看出频谱效率与跳数和收发仰角有关, 因此研究使用近似理想路径路由计算方法^[15], 通过最大化频谱效率得到紫外光多跳中继通信系统节点等距离分布下的最优跳数近似表达式为

$$N_{\text{op}} = \operatorname{argmax} \eta_{\text{eq}} \approx \left\lceil \left(\frac{2^\varepsilon - 1}{\gamma} \right)^{1/\alpha} \right\rceil_+ \quad (10)$$

其中, $\varepsilon = \frac{\alpha + w(-\alpha e^{-\alpha})}{\ln 2}$ 是仅取决于路径损耗指数的常数, $w(\cdot)$ 是郎伯 W 函数的主分支^[16], $\gamma = \mu \xi^{-1} d^{-\alpha}$ 是单跳情况下的接收信噪比。

从式(10)可以看出最优跳数受到收发仰角的影响, 在基于等距离分布的分析下, 对中继节点随机分布时最优跳数进行了分析。在节点随机分布时, 系统性能将取决于 N 跳中最长的一跳^[17], 则在此情况下频谱效率度量将是最长一跳距离上的平均值, 如式(11)所示

$$\bar{\eta} = \mathbb{E}_{r_{\max}} \left[\frac{1}{N} \log_2(1 + \mu \xi^{-1} r_{\max}^{-\alpha}) \right] \quad (11)$$

其中, $r_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} r_i$, $\mathbb{E}[\cdot]$ 是期望算子。

为了求解节点随机分布下最优跳数值, 要求

得 $\bar{\eta}$ 的闭合表达式, 由式(5)和式(6)的累积分布函数可得

$$r \leq r_{\max} \leq r(1 + \delta) \quad (12)$$

对式(11)应用Jensen不等式 $E[f(x)] \geq f(E[x])$, 则式(11)变换如式(13)所示

$$E[\log_2(1 + \mu\xi^{-1}r_{\max}^{-\alpha})] \geq \log_2(1 + \mu\xi^{-1}(E[r_{\max}])^{-\alpha}) \quad (13)$$

根据式(13), 联合式(11)和式(12)求解得到 $\bar{\eta}$ 的上下界

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \log_2(1 + \mu\xi^{-1} \left(\frac{d}{N}(1 + \delta)\right)^{-\alpha}) &\leq \bar{\eta} \\ &\leq \frac{1}{N} \log_2 \left(1 + \mu\xi^{-1} \left(\frac{d}{N}\right)^{-\alpha}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

根据等距离分布最优跳数近似值的分析过程, 求解式(14)的 $\bar{\eta}$ 下界最大化, 即节点随机分布的最优跳数近似求解式如式(15)所示

$$N'_{\text{op}} \approx \left[\left(\frac{2^\varepsilon - 1}{\gamma'} \right)^{1/\alpha} \right]_+ \quad (15)$$

其中, $\gamma' = \mu\xi^{-1}d^{-\alpha}(1 + \delta)^{-\alpha}$ 是最大距离单跳情况下节点随机分布的接收信噪比。

在节点随机分布情况下, 通过式(15)求解得到的最优跳数值是源节点到目的节点多跳中继通信中的最大值。当 $\delta = 0$ 时, 式(15)等于式(10), 最优跳数值达到最小值, 即紫外光通信链路的频谱效率有最大值。

4 仿真结果及分析

4.1 仿真实验参数设置

通常在车队中车辆与车辆之间的距离根据车速应保持在30~100 m, 而整个车队的最大距离不超过1~3 km^[18]。基于此参数规定和最优跳数的分析, 对节点等距离分布和随机分布的两种情况进行了仿真分析。其仿真实验的主要参数见表1。

4.2 节点等距离分布最优跳数仿真分析

在车队中车辆等间隔匀速运动时, 通常满足节

点等距离分布状态, 即 $\delta = 0$ 。根据不同收发仰角下 ξ 和 α 的取值分析^[14], 在 $P_t=30$ mW, $d=500$ m和等距离分布情况下, 本文对 $\beta_T < \beta_R$, $\beta_T = \beta_R$ 和 $\beta_T > \beta_R$ 3种不同状态的收发仰角的单跳通信、多跳通信和最优跳通信进行了仿真, 在 $d=500$ m的多跳通信中, 设定最大通信跳数为9跳, 即车队有10辆车辆, 其他仿真参数如表1所示, 分析了3种通信方式的性能。从图3、图4和图5可以看出, 当发射功率大于18 mW时, 针对不同的收发仰角求得的最优跳数值都要比单跳通信和9跳通信获得较好的通信传输能力。

另外, 对比分析了相同最优跳数值下的不同收发仰角的频谱效率。从图6(a)和图6(b)可以看出, 在相同最优跳数值下, 紫外光通信的收发仰角对通

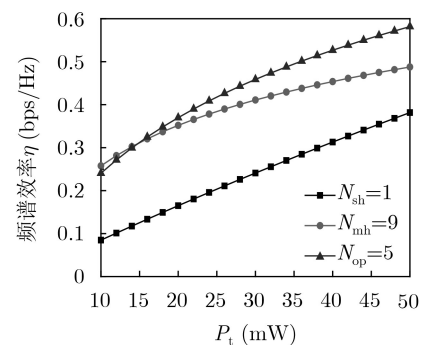


图3 $\beta_T=10^\circ$, $\beta_R=40^\circ$ 的3种通信方式对比

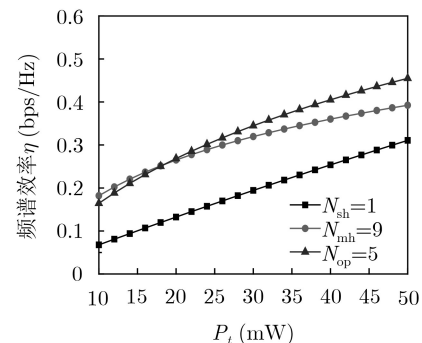


图4 $\beta_T=\beta_R=30^\circ$ 的3种通信方式对比

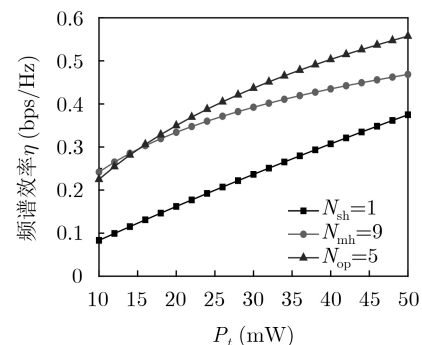
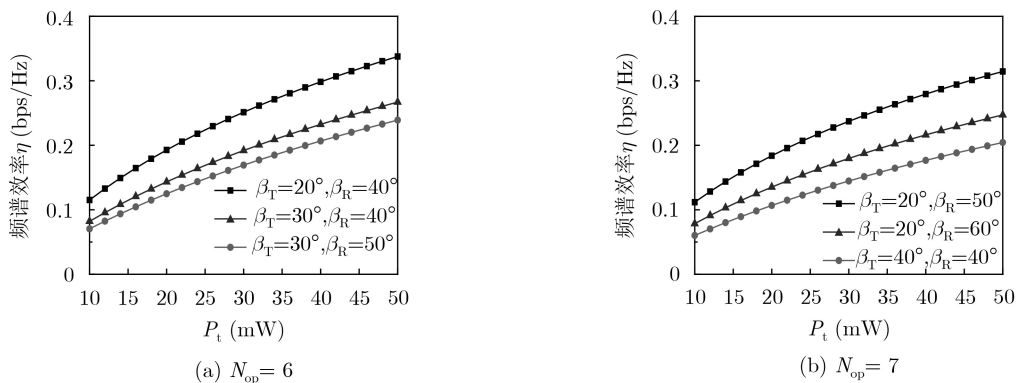


图5 $\beta_T=40^\circ$, $\beta_R=20^\circ$ 的3种通信方式对比

表1 系统主要仿真参数

参数	数值
紫外波长	260 nm
PMT探测效率	0.3
滤光片透过率	0.6
吸收系数	$0.802 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
米氏散射系数	$0.284 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
瑞利散射系数	$0.266 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
普朗克常数h	6.6×10^{-34}

图6 相同 N_{op} 下的不同收发仰角频谱效率

信传输能力有着较大的影响。并且在紫外光多跳中继通信系统中, 当有相同跳数时, 使用小发射仰角和大接收仰角, 能够使紫外光多跳通信系统获得更好的通信性能。

基于等距离分布模型的分析结果, 将本文等距离分布下的最大频谱效率计算方法与最优能量计算方法进行对比分析。在 $\beta_T < \beta_R$ 的紫外光几何结构配置下, 不同方法下最优跳数和通信传输能力的对比情况如图7和图8所示。从图7可以看出两种方法的效果能够基本达到一致。当发射仰角固定时, 增大接收仰角角度, 其最优跳数随着通信距离的增加, 最大频谱效率计算方法比最优能量计算方法的跳数值多一个数量级。

图8是根据图7中 $d=600$ m时的最优跳数的分界点值的性能对比。此时, 最大频谱效率计算方法最优跳数为6, 最优能量计算方法最优跳数为5。从图8可以看出, 当采用小功率传输时, 最大频谱效率计算方法的通信传输能力优于最优能量计算方法, 同时也达到节约功率的需求。在等距离分布模型下, 当源节点到目的节点的通信距离确定时, 根据无线紫外光通信的收发仰角得到适当的中继数, 能够使整体通信传输能力达到最大。

4.3 节点随机分布最优跳数仿真分析

当车队在行驶中根据路况和调配信息, 随时调

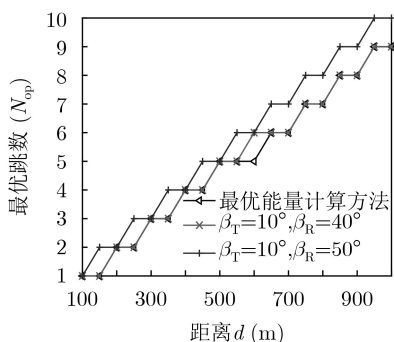


图7 最优跳数对比

整车速, 此过程导致车队处于非匀速状态, 不再满足等距离分布。本节对节点随机分布下的最优跳数进行了仿真分析。主要仿真参数如表1所示, 在发射功率 $P_t=30$ mW, S到D的距离 $d=500$ m下, 对比分析了不同随机偏移范围下的不同收发仰角的频谱效率与跳数的关系。从图9(a)、图9(b)、图9(c)和图9(d)可以看出, 在紫外光多跳通信系统中, 随着 δ 的增加系统总体性能呈下降趋势。并且不同收发仰角在不同随机偏移范围下, 都存在一个使总体系统的频谱效率下界达到最大值的最优跳数值。通过图9进一步可以看出在紫外光中继通信系统中, 使用小发射仰角和大接收仰角系统配置, 能够使紫外光多跳通信系统获得更好的传输能力。

为进一步说明随机分布模型的实际应用, 本文在 $P_t=30$ mW和 $\delta=0.2$ 下, 对比分析了 $\beta_T < \beta_R$ 和 $\beta_T > \beta_R$ 下的收发端距离变化的频谱效率与跳数的关系, 如图10所示。从图10可以看出, 频谱效率随着跳数的增加存在最大值, 并且随着S到D距离的增加, 当达到最优跳数时, 频谱效率不再随着跳数的增加有较大的变化。进一步说明当紫外光长距离通信时, 并不是跳数越多其通信性能就越好。

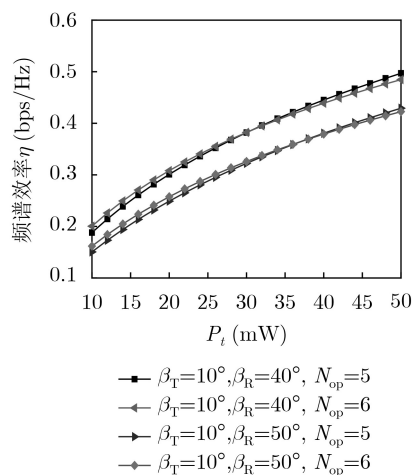


图8 两种方法传输能力对比

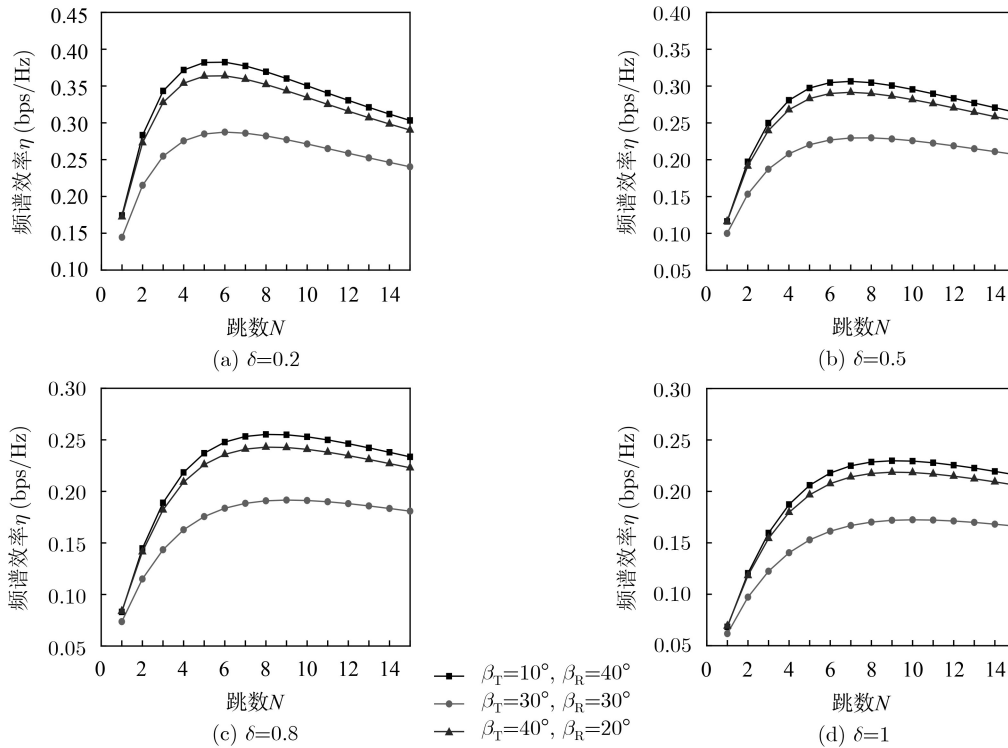


图9 不同距离移位范围的频谱效率

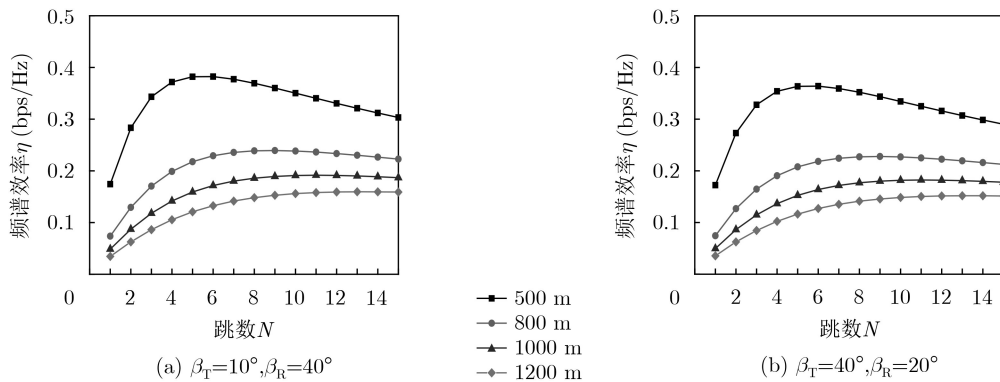


图10 不同S到D距离的频谱效率

5 结束语

本文针对车队中车辆在等距离和随机分布状态下的最优跳数进行了研究。基于非直视紫外光单次散射模型、信道容量和路径损耗，依据使频谱效率最大化原则，得出计算收发仰角与频谱效率的近似关系表达式。通过分析等距离分布最优跳数，求得随机分布的最优跳数近似表达式。仿真结果表明，收发仰角影响着紫外光多跳中继通信系统的最优跳数。不同随机偏移范围和不同收发仰角都对应特定的最优跳数，与最优能量计算方法相比，最大频谱效率计算方法在发射功率小于25 mW时有更好的信息传输能力，并达到节约功率的需求。在紫外光长距离通信时，选取合适的中继数及小发射仰角和大接收仰角的几何结构配置，不仅能够提高车队间

无线紫外光多跳中继通信系统的传输能力，也满足车队间保持稳定可靠的隐秘通信需求。

参考文献

- [1] WU Menglong, HAN Dahai, ZHANG Xiang, *et al.* Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5422–5430. doi: [10.1364/OE.22.005422](https://doi.org/10.1364/OE.22.005422).
- [2] XU Changming, ZHANG Hongming, and CHENG Julian. Effects of haze particles and fog droplets on NLOS ultraviolet communication channels[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23259–23269. doi: [10.1364/OE.23.023259](https://doi.org/10.1364/OE.23.023259).
- [3] ZHAO Taifei, GAO Yingying, and ZHANG Ying. An area coverage algorithm for non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *Photonic Network*

- Communications*, 2016, 32(2): 269–280. doi: [10.1007/s11107-016-0622-7](https://doi.org/10.1007/s11107-016-0622-7).
- [4] YUAN Renzhi and MA Jianshe. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. *China Communications*, 2016, 13(6): 63–75. doi: [10.1109/CC.2016.7513203](https://doi.org/10.1109/CC.2016.7513203).
- [5] 张曦文, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向MAC协议[J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 451–455. doi: [10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.032](https://doi.org/10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.032).
ZHANG Xiwen, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, *et al.* Multi-channel directional media access control protocol for airborne ultraviolet communication based on space division multiplexing[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 451–455. doi: [10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.032](https://doi.org/10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.032).
- [6] HE Qunfeng, XU Zhengyuan, and BRIAN S. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications[C]. MILCOM 2010 Military Communications Conference, San Jose, USA, 2010: 1588–1593. doi: [10.1109/MILCOM.2010.5680180](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2010.5680180).
- [7] VAVOULAS A, SANDALIDIS H G, and VAROUTAS D. Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(9): 750–757. doi: [10.1364/JOCN.3.000750](https://doi.org/10.1364/JOCN.3.000750).
- [8] 李济波, 吴晓军, 王红星, 等. 紫外光非直视通信抗干扰中继链路方法及其功率需求分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030601. doi: [10.3788/LOP52.030601](https://doi.org/10.3788/LOP52.030601).
LI Jibo, WU Xiaojun, WANG Hongxing, *et al.* Anti-interference relayed link method and power requirement analysis for ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030601. doi: [10.3788/LOP52.030601](https://doi.org/10.3788/LOP52.030601).
- [9] ARDAKANI M H, HEIDARPOUR A R, and UYSAL M. Performance analysis of relay-assisted NLOS ultraviolet communications over turbulence channels[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(1): 109–118. doi: [10.1364/JOCN.9.000109](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000109).
- [10] 柯熙政, 陈锦妮. 紫外光无线传感器网络节能的研究与仿真[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 251–255. doi: [10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.028](https://doi.org/10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.028).
KE Xizheng and CHEN Jinni. Research of energy-saving wireless sensor network based on UV light[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 251–255. doi: [10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.028](https://doi.org/10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.028).
- [11] 何华, 柯熙政, 赵太飞. 紫外光非视距单次散射链路模型的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3148–3152. doi: [10.3788/AOS20103011.3148](https://doi.org/10.3788/AOS20103011.3148).
HE Hua, KE Xizheng, and ZHAO Taifei. Research of ultraviolet non-line-of-sight single scattering link model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3148–3152. doi: [10.3788/AOS20103011.3148](https://doi.org/10.3788/AOS20103011.3148).
- [12] 赵太飞, 金丹, 宋鹏. 无线紫外光非直视通信信道容量估算与分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605001. doi: [10.3788/CJL201542.0605001](https://doi.org/10.3788/CJL201542.0605001).
ZHAO Taifei, JIN Dan, and SONG Peng. Channel capacity estimation and analysis of wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0605001. doi: [10.3788/CJL201542.0605001](https://doi.org/10.3788/CJL201542.0605001).
- [13] CHEN Gang, XU Zhengyuan, DING Haipeng, *et al.* Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3929–3940. doi: [10.1364/OE.17.003929](https://doi.org/10.1364/OE.17.003929).
- [14] FENG Hao and CIMINI L J. On the optimum number of hops in a multi-hop linear network with randomly located nodes[C]. 2012 IEEE International Conference on Communications, Ottawa, Canada, 2012: 2329–2333. doi: [10.1109/ICC.2012.6363752](https://doi.org/10.1109/ICC.2012.6363752).
- [15] CHEN Deqiang, HAENGGI M, and LANEMAN J N. Distributed spectrum-efficient routing algorithms in wireless networks[C]. The 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems, Baltimore, USA, 2007: 5297–5305. doi: [10.1109/CISS.2007.4298387](https://doi.org/10.1109/CISS.2007.4298387).
- [16] CORLESS R M, GONNET G H, HARE D E G, *et al.* On the lambert W function[J]. *Advances in Computational Mathematics*, 1996, 5(1): 329–359. doi: [10.1007/BF02124750](https://doi.org/10.1007/BF02124750).
- [17] 朱秉诚. 自由空间光通信中继系统研究[D]. [博士学位论文], 东南大学, 2015: 19–22.
ZHU Bingcheng. Free-space optical communications with relays[D]. [Ph.D. dissertation], Southeast University, 2015: 19–22.
- [18] 王智. 部队车队行驶的注意事项[J]. *汽车运用*, 2007(1): 34. doi: [10.3969/j.issn.1002-8374.2007.01.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8374.2007.01.028).
WANG Zhi. Precautions for troop convoy driving[J]. *Auto Application*, 2007(1): 34. doi: [10.3969/j.issn.1002-8374.2007.01.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8374.2007.01.028).
- 赵太飞: 男, 1978年生, 教授, 研究方向为通信网络、无线光通信技术。
李永明: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为无线紫外光中继通信网络。
许 杉: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为无人机蜂群、无线紫外光通信网络。
王世奇: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为无线紫外光探测气溶胶技术。

责任编辑: 马秀强