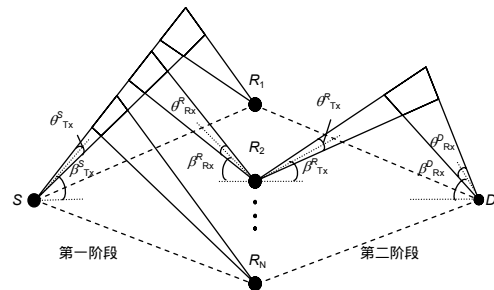




DOI: 10.12086/oe.2019.180448

装甲编队无线紫外光隐秘通信的中继选择研究

赵太飞^{1,2*}, 李永明¹, 袁麓³¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;³陕西天思信息科技有限公司, 陕西 西安 710065

摘要: 针对装甲编队在复杂战场环境下的紫外光端到端通信中断问题, 多采用中继辅助方式建立协作通信链路, 而中继选择是关键问题之一。为了提高编队之间的通信协同能力, 在解码转发协议的前提下, 结合门限决策思想, 提出了一种基于无线紫外光隐秘通信的装甲编队最佳中继选择算法。该算法结合紫外光非直视通信的优点, 根据信噪比门限和信道特性的选择策略, 对编队进行最佳中继的选择, 并在高斯噪声模型下, 分析了其误码率性能。仿真结果表明, 在根据不同的信噪比环境和中继数来选取适当的协作门限, 可获得最佳中继链路, 以及在协作通信链路动态变化时, 调整中继的接收和发射状态, 能有效提高协作中继链路的通信质量。

关键词: 无线紫外光通信; 装甲编队; 中继选择; 协作通信

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 赵太飞, 李永明, 袁麓. 装甲编队无线紫外光隐秘通信的中继选择研究[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180448

Research on relay selection of armored formations wireless UV covert communication

Zhao Taifei^{1,2*}, Li Yongming¹, Yuan Lu³¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;²Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;³Shaanxi Tiansi Information Technology Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract: In view of the end-to-end communication interruption problem of armored formations in complex battlefield environments, relay-assisted methods are often used to establish cooperative communications links, and the choice of relay is a key issue. In order to improve the communication coordination ability among formations, an optimal relay selection algorithm for armored formations based on wireless ultraviolet (UV) covert communication is proposed on the premise of decode-and-forward protocol, combined with the threshold decision idea. The algorithm combines the advantages of UV NLOS(non-line-of-sight) communication. The optimal relay selection is made for the formations according to the signal-to-noise ratio (SNR) threshold and channel characteristics selection strategy, and the bit error

收稿日期: 2018-08-27; 收到修改稿日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1433110); 陕西省重点产业链创新计划项目 (2017ZDCXL-GY-06-01, 2017ZDCXL-GY-05-03); 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 (CX1835(4)); 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, 博士, 教授, 主要从事无线光通信与网络方面的研究。E-mail: zhaotaifei@163.com

rate (BER) performance is analyzed under Gaussian noise model. The simulation results show that the optimal relay link can be obtained by selecting the appropriate cooperation threshold according to different SNR environments and relay number. Furthermore, adjusting the receiving and transmitting status of the relay, when the cooperative communications link changes dynamically, can effectively improve the communication quality of the cooperative relay link.

Keywords: wireless ultraviolet communication; armored formations; relay selection; cooperative communications

Citation: Zhao T F, Li Y M, Yuan L. Research on relay selection of armored formations wireless UV covert communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180448

1 引言

紫外光是波长范围在 10 nm ~ 400 nm 的电磁波，位于电磁波谱中可见光谱紫光区的外侧^[1-2]，其中波长在 200 nm ~ 280 nm 的范围通常称为“日盲”区^[3]。由于大气对紫外光的散射作用，使得紫外光通信具有非直视(non-line-of-sight, NLOS)、局域保密性好、抗干扰能力强^[4]等优点，成为现代信息化战争中一种新的通信方式，并在军事通信领域得到应用^[5]。

装甲编队在复杂地形的战场环境中，采用紫外光通信既克服了有线通信需要铺设电缆的缺点^[6]，又由于紫外光通信具有全方位通信和地形适应性等工作特点，以及大气的强吸收作用，使紫外光通信具有低位置探测率性能，比红外光通信和射频通信等无线通信方式具有更好的隐秘传输性^[7]。而由于紫外光非直视散射通信和高路径损耗的特点，容易导致编队之间端到端的通信发生中断，接收端无法及时地接收作战任务，影响编队的作战能力。因此，为了提高紫外光端到端的通信质量，中继辅助协作通信得到研究，文献[8]研究了紫外光端到端的串行通信链路的连续多跳中继辅助协作通信的误码率和发射功率，文献[9-12]研究了紫外光端到端中加入单中继进行协作通信的误码率和中断概率。而对于并行通信链路的多中继两跳协作通信的研究较少，本文对紫外光在多中继情况下

的三节点协作通信系统，如何选择最佳中继节点进行了研究，并利用紫外光非直视散射模型对误码率性能进行分析。

2 非直视紫外光并行通信链路的单中继协作与分析

在紫外光中继辅助协作通信过程中，中继节点转发信息的方式有放大转发(amplify-and-forward, AF)协议和解码转发(decode-and-forward, DF)协议^[9-10]，通过转发协议将源节点发送的信息转发到目的节点。本文选用 DF 协议进行信息的转发，发射装置采用紫外光 LED 阵列结构^[13] 增加信息的传输正确率和传输容量。

由于紫外光 C 波段为“日盲”区，地表太阳辐射在该波段基本衰减为零，理论上太阳辐射在该波段对系统不产生干扰。紫外光通信系统的噪声主要是由收发电路引入的噪声。通过实测紫外信道的噪声基本服从高斯分布^[5,14]。

2.1 系统模型

装甲编队中基于紫外光隐秘通信的特点，该算法研究了多中继并行通信链路情况下的三节点协作通信，其系统模型如图 1 所示，假设一个源节点 S、一个目的节点 D 和 N 个中继节点 $R_i (i=1,2,\dots,N)$ 的并行通信链路系统。对于三节点协作通信系统，信息从源

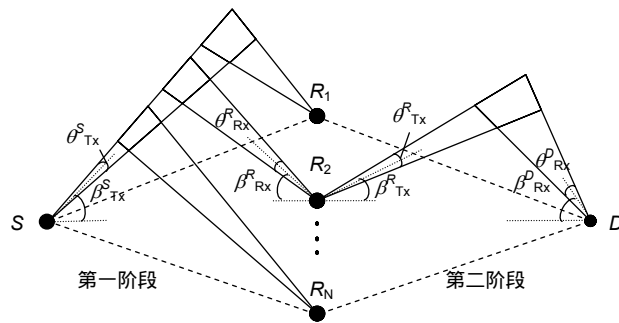


图 1 装甲编队中紫外光多中继并行链路的协作通信系统模型

Fig. 1 Cooperative communications system model of UV multi-relay parallel link in armored formation

节点通过最佳中继节点到达目的节点需两个信息传输阶段。

定义 $h_{AB}(t)$ 为 $A \rightarrow B$ 链路的信道脉冲响应^[10], 进一步定义单位能量的归一化信道脉冲响应为

$$\hat{h}_{AB}(t) = h_{AB}(t) / \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |h_{AB}(t)|^2 dt} \quad (1)$$

根据上述假设, 第一阶段, 即广播阶段, 源节点广播信息, 经光电转换后, 目的节点 D 和中继节点 R_i 接收到的信号分别为

$$y_{SD}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{G_{SD}} \sqrt{P_t} x(t) \otimes \hat{h}_{SD}(t) + n_{SD}(t) \quad (2)$$

$$y_{SR_i}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{G_{SR_i}} \sqrt{P_t} x(t) \otimes \hat{h}_{SR_i}(t) + n_{SR_i}(t) \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 是源节点发射的信号, P_t 是源节点发射功率, G_{SD} 是 $S \rightarrow D$ 链路的几何增益并归一化 $G_{SD} = 1$, G_{SR_i} 是 $S \rightarrow R_i$ 链路的几何增益, 且 $G_{SR_i} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |h_{SR_i}(t)| dt / \int_{-\infty}^{+\infty} |h_{SD}(t)| dt \right]^2$, $n_{SD}(t)$ 和 $n_{SR_i}(t)$ 分别是源到目的节点和源到第 i 个中继的相应信道的加性高斯白噪声, 都服从均值为零, 方差为 σ_n^2 的复高斯随机分布。

第二阶段, 源节点停止广播信息, 中继节点将从源节点接收的信号解码转发到目的节点, 经光电转换后, 目的节点从中继节点接收到的信号为

$$y_{R_iD}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{G_{R_iD}} \sqrt{P_r} \hat{x}_R(t) \otimes \hat{h}_{R_iD}(t) + n_{R_iD}(t) \quad (4)$$

式中: $\hat{x}_R(t)$ 是能正确解码源节点信息的中继对 $x(t)$ 译码后得到的信号, G_{R_iD} 是 $R_i \rightarrow D$ 链路的几何增益, 且 $G_{R_iD} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |h_{R_iD}(t)| dt / \int_{-\infty}^{+\infty} |h_{SD}(t)| dt \right]^2$, n_{R_iD} 是第 i 个中继到目的节点之间相应信道的加性高斯白噪声, 服从均值为零、方差为 σ_n^2 的复高斯随机分布。

2.2 最佳中继节点选择算法

在中继选择的过程中, 源到中继的通信链路质量很关键, 若该条通信链路质量较差, 则不管采用何种协作协议, 中继的转发均失去意义。为了选择可靠节点, 需在中继节点设置合适的信噪比门限。中继在第一阶段收到源节点广播的信息后, 若要正确解码, 则需 $S \rightarrow R_i$ 链路的接收信噪比 γ_{SR_i} 大于预置信噪比门限 γ_{th} , 则候选中继集合为

$$\Omega_n = \{R_i : \gamma_{SR_i} \geq \gamma_{th}\} \quad (n \in N) \quad (5)$$

其源-中继链路信噪比为 $\gamma_{SR_i} = P_t G_{SR_i} |H_{SR_i}|^2 / 4\sigma_n^2$, 且 $\hat{h}_{SR_i} \xleftrightarrow{\text{FFT}} H_{SR_i}$, 当满足式(5)时, 将中继 R_i 放入 Ω_n 。

设当 N 个中继中存在满足式(5)的候选中继时, 分析第二阶段。在基于加性高斯白噪声信道下, 对无线

紫外光通信信道的误码率进行分析。不考虑信号衰落等其他因数, 只考虑收发电路引入的噪声及大气物理信道。在二进制启闭键控(on-off keying, OOK)调制方式下, 信噪比较高时, 码间干扰只发生在相邻比特之间时, 其误码率为^[15]

$$P_e = \frac{1}{2} Q[D_{SNR}(2h_0 - 1)] \quad (6)$$

式中: $Q(\cdot)$ 是经典的 Q 函数, D_{SNR} (digital signal-to-noise ratio) 是接收端的数字信噪比, h_0 是 $h_k = g(t) \otimes h_{AB}(t) \otimes r(t)|_{t=kT}$ 信道归一化系数向量的第一个值, h_k 是信道离散冲激脉冲响应^[16], 满足归一化条件 $\sum_k h_k = 1$, $g(t)$ 是发射滤波器, $r(t)$ 是接收滤波器, T 是比特周期。

根据文献[15]和文献[16]的分析, 只有 $h_0 > 0.5$, 才可能取得比较低的误码率, 且 h_0 越大, 误码率越小。因此, 在候选中继与目的节点之间进行通信时, 目的节点通过信道状态 $h_0^{R_iD} (R_i \in \Omega_n)$ 选择最佳通信链路。这样, 在非直视紫外光并行通信链路的多中继协作通信系统中, 由式(5)和候选中继到目的节点的信道状态, 建立三节点协作通信的最佳中继节点选择策略:

$$R_b = \arg \max_{R_i \in \Omega_n} \{h_0^{R_iD} > 0.5\} \quad (7)$$

式中 $h_0^{R_iD}$ 是候选中继到目的节点 (R_iD) 链路的信道归一化系数向量的第一个值。

综上所述, 最佳中继选择算法流程图如图 2 所示。

当目的节点改变时, 重复上述中继选择算法的步骤, 选择最佳中继。此外, 在完成上述步骤后, 为进一步提高系统资源利用率, 将被去掉的中继节点所占用的资源分配给被选中中继节点链路。

2.3 误码率分析

针对高斯噪声信道模型下的紫外光并行通信链路的单中继协作传输误码率的分析, 主要指两部分: 源到中继节点信息传输阶段和中继节点到目的节点的转发阶段。因此, 在 DF 最佳中继协作通信过程中, 其中继协作传输链路的误码率(bit error rate, BER)由式(8)表示^[10]:

$$P_e^{SRD} = (1 - P_e^{R_iD}) P_e^{SR_i} + (1 - P_e^{SR_i}) P_e^{R_iD} \quad (8)$$

式中: $P_e^{SR_i}$ 和 $P_e^{R_iD}$ 分别是源到中继节点和该中继节点到目的节点的误码率。其中每一跳链路误码率由式(6)进一步计算得:

$$P_e^\ell = \frac{1}{2} Q\left[\frac{P_t^\ell}{\sqrt{N_0 R_c L}} (2h_0^\ell - 1)\right] \quad (9)$$

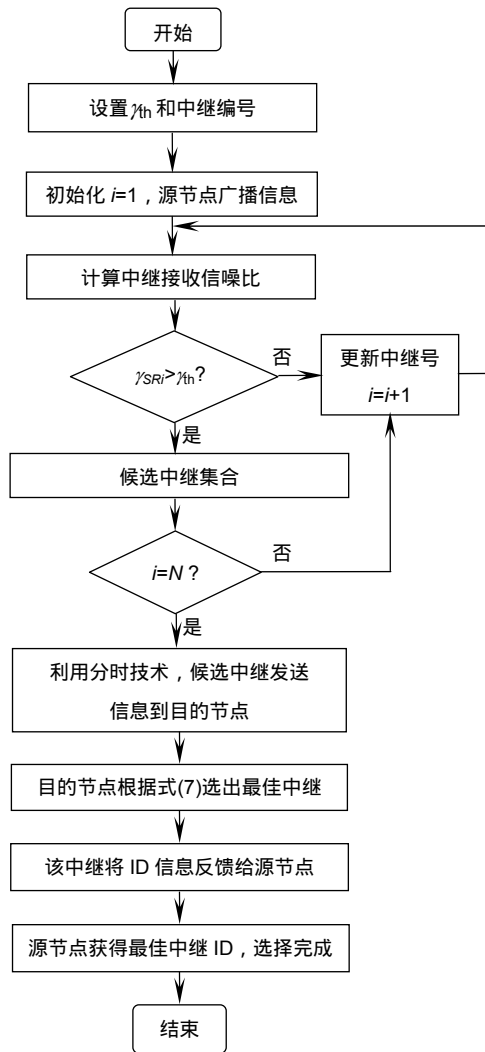


图 2 最佳中继选择算法流程图

Fig. 2 Optimal relay selection algorithm flow chart

式中： P_i^c 是每一跳链路的发射功率，其中 ℓ 代表着 SR_i 链路或者 R_iD 链路， L 是路径损耗， R_c 是数据速率，

N_0 是噪声功率谱密度。

噪声功率谱密度可由式(10)计算得出^[17]：

$$N_0 = q\zeta N_n (hc / \lambda) , \quad (10)$$

式中： q 是电子电量，取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， ζ 是光电倍增管 PMT 的响应率，取 62 A/W ， N_n 是噪声光子计数率，可设为 14500 s^{-1} ， h 是 Planck 常数，取 6.6×10^{-34} ， c 是光速， λ 是紫外波长。

3 仿真结果与分析

为了降低系统开销及算法复杂度，本文假定在等功率分配和编队之间相对静止的条件下，进行仿真分析。其中，系统主要仿真参数如表 1 所示。

图 3 给出了在等功率分配时，中继个数 $N=4$ ，门限 $\gamma_{th}=10 \text{ dB}$ 条件下，系统在直接传输、随机选择和 SR 门限三种传输方案下的误码率比较。由图 3 可以观察到，随机选择方案和 SR 门限方案的误码率性能都大大的优于直接传输方案，说明中继协作通信可有效改善系统的传输质量。SR 门限中继选择方案优于随机中继选择方案，进一步说明在中继选择过程中，由于设定了中继节点的接收信噪比门限，提高了中继节点解码的正确率，所以误码率性能优于随机中继选择方案。

根据文献[18]给出的信噪比仿真分析，图 4 给出不同门限值的误码率性能曲线，该仿真结果显示：同一协作门限条件下，系统误码率随信噪比的升高而降低。当信噪比一定时，随着协作门限的提高，根据式(5)可知，会造成候选中继集合 Ω_i 减小，即从中继节点到目的节点的链路可选择性减少，而由式(7)可知，这会降低最佳 RD 通信链路被选择的概率。因此，给定中继节点数和信噪比时，系统的误码率将随着协作门限的提高而升高。

表 1 系统主要仿真参数

Table 1 Main simulation parameters of system

参数	值
紫外波长/nm	260
发射功率/mW	10
接收孔径面积/cm ²	1.8
吸收系数/km ⁻¹	0.802
米氏散射系数/km ⁻¹	0.284
瑞利散射系数/km ⁻¹	0.266
$\beta_{Tx}^S, \theta_{Tx}^S, \theta_{Tx}^R$ (°)	30, 15, 15
$\beta_{Rx}^S, \theta_{Rx}^S$ (°)	40, 60
数据速率 R_c /(kbit·s ⁻¹)	1

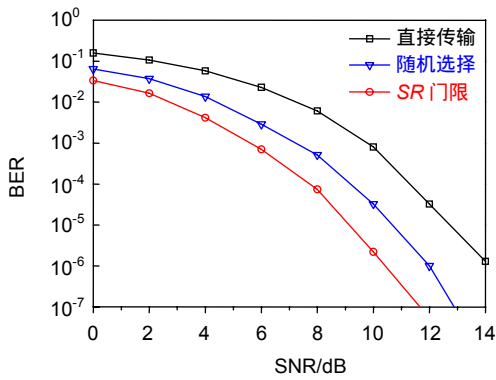


图3 不同传输方案误码率曲线(门限 10 dB, N=4)

Fig. 3 BER curves for different transmission schemes (threshold 10 dB, N=4) armored formation

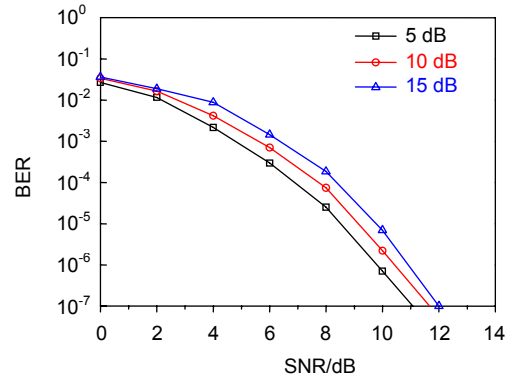


图4 不同门限的误码率曲线 (N=4)

Fig. 4 BER curves for different thresholds (N=4) armored formation

图5是在 $\gamma_{th}=10$ dB 情况下,中继节点数与误码率的关系,当给定一信噪比时,从图中可以看到 $N=6$ 时的误码率性能优于 $N=3$ 。因为,当中继节点较少,而选取的门限值较大时,由式(5)可知,这会降低中继节点被选择的概率或者中继节点不会被选择,导致转发

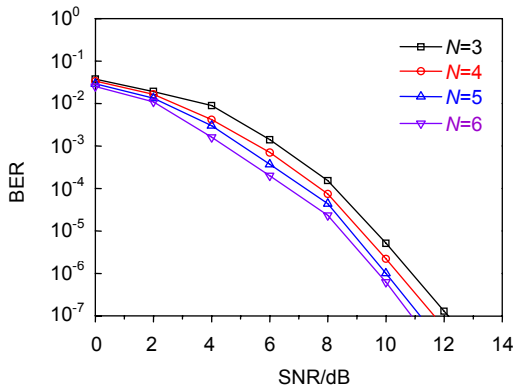


图5 中继节点数与误码率的曲线(门限 10 dB)

Fig. 5 The number of relay nodes and the BER curves (threshold 10 dB) armored formation

过程失败,进而降低了系统整体的误码率性能。

从图4和图5的仿真结果进一步得到,当给定一信噪比时,根据信噪比环境和中继节点数目,适当地调整门限值,获得一最优门限,能够使系统整体获得较好的误码率性能。

表2、表3和表4统计了不同SD距离下的不同的中继接收仰角 β_{Rx}^R 、接收视场角 θ_{Rx}^R 和发射仰角 β_{Tx}^R 状态下,最佳误码率的中继位置。

图6给出了源节点到目的节点距离1 km时的仿真结果曲线图,其中(a) $\theta_{Rx}^R = 60^\circ$, $\beta_{Tx}^R = 30^\circ$, (b) $\beta_{Rx}^R = 40^\circ$, $\beta_{Tx}^R = 30^\circ$, (c) $\beta_{Rx}^R = 40^\circ$, $\theta_{Rx}^R = 60^\circ$,其他参数同表1。从表2、表3、表4和图6得到,中继位置靠近源端的误码率性能优于靠近目的端。对于中继节点而言,当接收仰角、接收视场角和发射仰角发生改变时,其最佳误码率性能的中继位置将发生改变。进一步说明,根据中继节点的接收仰角、接收视场角和发射仰角来调整中继节点到源节点的距离,能够使系统获得最佳传输性能,进一步提高紫外光协作通信的能力。

表2 $\theta_{Rx}^R=60^\circ$, $\beta_{Tx}^R=30^\circ$ 不同中继接收仰角的最佳中继位置

Table 2 Optimal relay location for different relay receiving apex angle for $\theta_{Rx}^R=60^\circ$, $\beta_{Tx}^R=30^\circ$ m

中继接收仰角/(°)	SD=600	SD=800	SD=1000
30	200	300	400
40	200	300	300
45	200	200	300
60	150	200	300

表 3 $\beta_{Rx}^R=40^\circ, \theta_{Tx}^R=30^\circ$ 不同中继接收视场角的最佳中继位置

Table 3 Optimal relay location for different relay receiving FOV for $\beta_{Rx}^R=40^\circ, \theta_{Tx}^R=30^\circ$ m

中继接收视场角/(°)	SD=600	SD=800	SD=1000
45	200	200	300
60	200	300	300
80	250	300	400

表 4 $\beta_{Rx}^R=40^\circ, \theta_{Rx}^R=60^\circ$ 不同中继发射仰角的最佳中继位置

Table 4 Optimal relay location for different relay transmitter apex angle for $\beta_{Rx}^R=40^\circ, \theta_{Rx}^R=60^\circ$ m

中继发射仰角/(°)	SD=600	SD=800	SD=1000
30	200	300	300
40	250	300	400
45	250	400	400
60	300	400	500

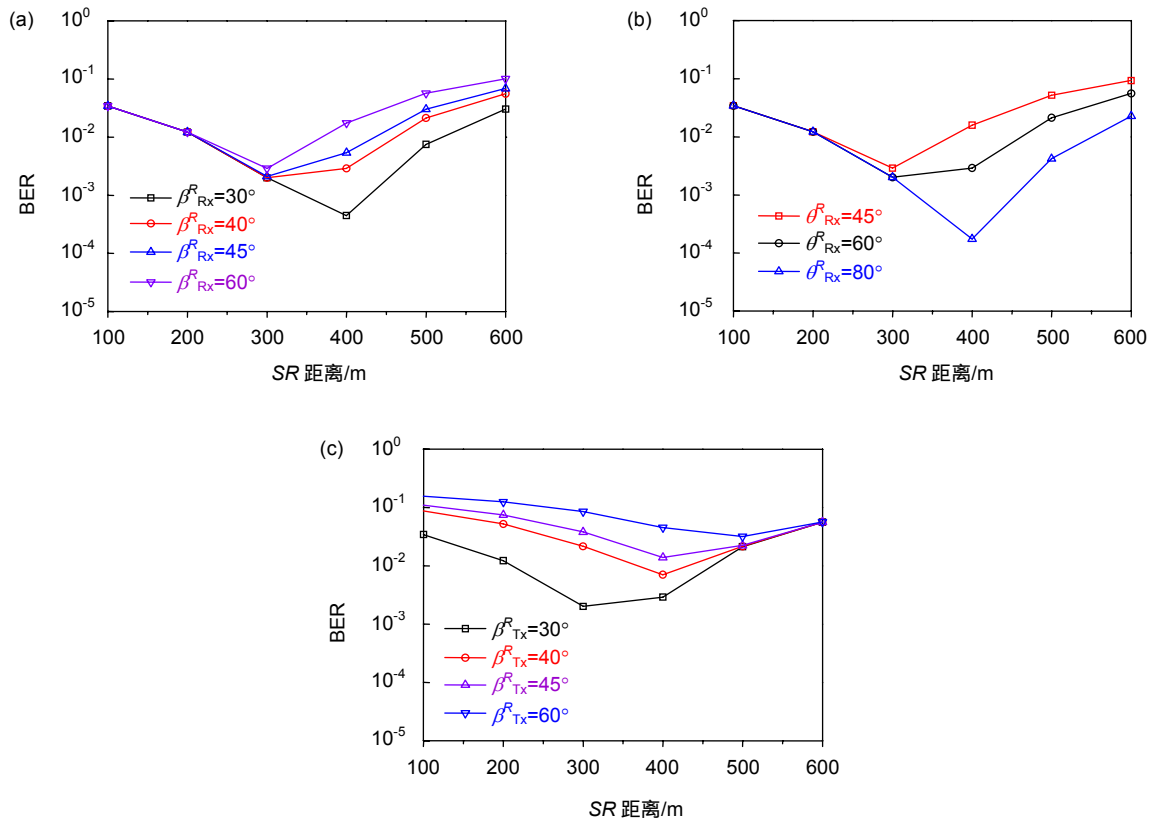


图 6 最佳误码率的中继位置曲线。(a) 中继接收仰角; (b) 中继接收视场角; (c) 中继发射仰角

Fig. 6 Relay location curves with optimal BER. (a) Relay receiving apex angle; (b) Relay receiving FOV; (c) Relay transmitter apex angle

4 结论

针对装甲编队的非直视紫外光多中继并行链路的协作通信系统,为选择可靠的单中继节点,本文提出

一种基于 SR 门限和 RD 信道特性的最佳中继选择算法,并分析了误码率性能。由仿真结果可知,紫外光协作通信系统的误码率性能受到门限、中继几何结构和中继位置的影响。在较高信噪比和候选中继节点较

少条件下, 可适当降低协作门限, 以提高系统误码率性能。因此, 该算法可根据不同的信噪比环境和中继节点数来选取适当的协作门限, 选择最佳中继建立非直视紫外光中继协作通信链路。在中继窄接收仰角和发射仰角以及宽视场角时, 则更靠近源节点的中继变得更可取。因此, 当协作通信链路动态变化时, 根据协作中继节点到源节点的距离, 调整协作中继节点的接收和发射状态, 能够使协作通信系统获得最佳误码率性能, 增强协作通信链路的抗毁性, 满足装甲编队在复杂战场环境下的通信需求。

参考文献

- [1] Zhao T F, Wang X R, Ke X Z. Design and performance analysis of multi-LEDs UV communication system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(6): 1544–1549.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 多 LED 紫外光通信系统设计与性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(6): 1544–1549.
- [2] 许强. 军用紫外探测技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [3] Vavoulas A, Sandalidis H G, Varoutas D. Connectivity issues for ultraviolet UV-C networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, **3**(3): 199–205.
- [4] Zhao T F, Gao Y Y, Zhang Y. An area coverage algorithm for non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, **32**(2): 269–280.
- [5] Wu M L. Research on key techniques of broadband optical wireless communications[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
武梦龙. 宽带无线光通信关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [6] Ding Y, Fan J T, Tong S F, et al. Approach of distance improving of atmospheric UV communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1047–1052.
丁莹, 范静涛, 佟首峰, 等. 大气信道紫外光通信系统通信距离的增程方法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1047–1052.
- [7] Tang Y, Ni G Q, Zhang L J, et al. Study of single scatter model in NLOS UV communication[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 759–762, 765.
唐义, 倪国强, 张丽君, 等. 非直视紫外光通信单次散射传输模型研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(5): 759–762, 765.
- [8] He Q F, Xu Z Y, Brian M S. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications[C]//*Proceedings of Milcom 2010 Military Communications Conference*, San Jose, CA, USA, 2010: 1588–1593.
- [9] Gong C, Xu Z Y. Non-line of sight optical wireless relaying with the photon counting receiver: a count-and-forward protocol[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, **14**(1): 376–388.
- [10] Ardakani M H, Uysal M. Relay-assisted OFDM for ultraviolet communications: performance analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, **16**(1): 607–618.
- [11] Ardakani M H, Heidarpour A R, 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.
- [12] Ardakani M H, Uysal M. Relay-assisted OFDM for NLOS ultraviolet communication[C]//*Proceedings of the 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks*, Budapest, Hungary, 2015: 1–4.
- [13] He Q F, Xu Z Y, Sadler B M. Performance of short-range non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12226–12238.
- [14] Chen G, Xu Z Y, Ding H P, 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.
- [15] Luo C. The study of signal processing and design of base band system for non-line-of-sight optical communication[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Center for Space Science and Applied Research), 2011.
罗畅. 非视距光通信信号处理研究与基带系统设计[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2011.
- [16] Kahn J M, Krause W J, Carruthers J B, et al. Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, **43**(2–4): 1613–1623.
- [17] Zhao M Y. Characteristics of atmospheric propagation and modulation research for UV communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
赵明宇. 紫外光通信大气传输特性和调制技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [18] Zhang A L. Research on the performance of wireless ultraviolet communication link[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
张爱利. 无线紫外光通信链路性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.

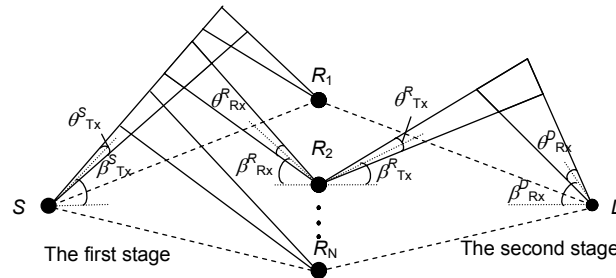
Research on relay selection of armored formations wireless UV covert communication

Zhao Taifei^{1,2*}, Li Yongming¹, Yuan Lu³

¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

³Shaanxi Tiansi Information Technology Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710065, China



Cooperative communications system model of UV multi-relay parallel link in armored formation

Overview: In the battlefield environment of complex terrain, the use of ultraviolet (UV) communication in armored formations overcomes the shortcomings of cable laying. And due to the strong absorption of atmosphere, UV communication have low identification rate performance, which has better covert transmission performance than other wireless communication modes such as infrared optical communication and radio frequency communication. Because of the serious attenuation of the UV atmospheric channel and high path loss, the end-to-end communication between the formations is easily interrupted, and the receiving end cannot receive the combat missions in time, which affects the combat capability of the formation. In order to improve the cooperative communications ability between the armored formations and the end-to-end communication quality of UV, how to select a reliable single relay node for the cooperative communications system of the UV NLOS (non-line-of-sight) multi-relay parallel link is studied.

The optimal relay selection algorithm for armored formations based on wireless UV covert communication is proposed on the premise of decode-and-forward protocol, combined with the threshold decision idea. The algorithm combines the advantages of UV NLOS communication. The optimal relay selection is made for the formations according to the signal to noise ratio (SNR) threshold and channel characteristics selection strategy, and the bit error rate (BER) performance is analyzed under Gaussian noise model. It can be seen from the simulation results that the BER performance of the UV cooperative communications system is affected by the threshold, the relay geometry and the relay position. Under the condition of higher signal to noise ratio and fewer candidate relay nodes, the cooperation threshold can be appropriately reduced to improve the system BER performance. Therefore, the algorithm can select appropriate coordination thresholds according to different SNR environments and the number of relay nodes, and select the best relay to establish a UV NLOS relay cooperative communications link. When the relay node selects a narrow transmitter and receiving apex angle as well as a wide receiving FOV, the relay closer to the source node becomes preferable. Therefore, when the cooperative communications link changes dynamically, the receiving and transmitting states of the relay node is adjusted according to the distance from the cooperative relay node to the source node. This enables the cooperative communications system to obtain the best BER performance, enhance the invulnerability of the cooperative communications links, and meet the communication needs of armored formations in complex battlefield environments.

Citation: Zhao T F, Li Y M, Yuan L. Research on relay selection of armored formations wireless UV covert communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(5): 180448

Supported by National Natural Science Foundation of China(U1433110), Shaanxi Province Key Industrial Chain Innovation Plan Project (2017ZDCXL-GY-06-01, 2017ZDCXL-GY-05-03), Service Local Special Plan Project of Shaanxi Province Education Department (17JF024), Xi'an Science Plan Project (CXY1835(4)), and Open Foundation of Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province (17kftk04)

* E-mail: zhaotaifei@163.com