

基于可靠性的自由空间光网络路由算法^①

尹荣荣^{②***} 刘 蕾^{***} 杨绸绸^{*} 王 静^{***}

(^{*}燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

(^{**}燕山大学河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 自由空间光(FSO)网络容易受天气等因素影响造成网络中断。为了提高光网络可靠性,同时均衡网络能耗,延长网络生命周期,首先综合考虑接收光信号强度和中断概率建立可靠性模型,利用可靠性模型对直传和中继链路方式进行对比分析,获取选择直传和中继方式的距离阈值。然后针对网络能耗均衡问题,考虑节点能量进行簇头选举,提出光学中继的能耗均衡路由算法(BEC-ORM)。最后利用 Matlab 仿真平台求取了 BEC-ORM 算法选择通信方式的距离阈值,以及最佳的簇头比例。同其他算法对比分析,结果表明该算法能有效提高自由空间光网络的可靠性和能耗均衡性。

关键词 自由空间光通信(FSOC);路由算法;可靠性;能耗均衡;距离阈值

0 引 言

自由空间光通信(free space optics communication, FSOC)是指利用红外至紫外波段的光载波,在无波导传输媒介中传输信息的技术。FSOC 系统具有通信速率高、保密性好、非授权频谱等优点^[1,2]。但是,大气湍流、大气损耗以及发射机接收机之间的对准误差均会影响接收的光信号,进而大幅降低了 FSOC 系统的通信性能。

为了提高 FSOC 系统的通信性能,文献[3]分析了实际发射功率和信号衰减对接收光功率的影响。文献[4]研究了在大气湍流及瞄准误差联合效应下,改变通信系统参数,通信性能的变化情况。文献[5]考虑接收光功率、相应的电能、质量因数等参数,对降雨环境下自由空间光学链路的性能进行了分析。文献[6]将多输入多输出方式与全光中继方式结合,提出了一种全光协作的系统结构。文献[7]将多增益组合器方法引入到分集组合中,在不需

先验信道信息和自适应增益调整的方式下,能保证提供接近最优的性能。文献[8]也通过中继方式将长链路分成短链路,提出了最优中继节点位置。文献[9]则对三跳中继的全光自由空间光链路进行实验,验证了较高信噪比下湍流变强时三跳中继能够提高系统性能。上述 FSOC 系统和链路传输方式的研究成果可以有效提高通信链路的性能,但组网时除了考虑通信链路的性能,还需要兼顾网络整体的性能。

目前对无线光网络的组网研究,主要针对节点间连接和网络能量方面。文献[10]提出了增大各节点相邻链路之间的最小角度的方法,为自由空间光(free space optics, FSO)网络提供了更高的连通性。文献[11]统一了每个节点度的边界,创建了一个具有强连接性和短直径的拓扑。文献[12]对光通信系统中的衰减系数进行了监测,利用人工神经网络估计链路衰减,提出了一种启发式的路由集生成算法。文献[13]通过最短路径多跳方式与基站(base station, BS)通信,寻求传感器间更均匀的能

① 国家留学基金(201808130258),国家自然科学基金(61802333)和河北省高等学校科学技术研究(QN2018029)资助项目。
② 女,1985年生,博士,副教授;研究方向:无线传感器网络拓扑控制,容错计算;联系人, E-mail: yrr@ysu.edu.cn
(收稿日期:2019-05-29)

量负载分布。文献[14]考虑了网络能量因素,为了提高节点生存时间,改进了分层网络路由,提出了光学高效能量多路径路由算法。然而文献[10-14]均单一考虑节点间连通或网络能量,不能保证网络长时间的可靠工作。

针对上述问题,本文考虑中断概率和接收光信号强度这 2 种性能指标建立链路可靠性模型,对直传链路和中继链路 2 种方式进行对比分析,确定选择直传或中继通信方式的距离阈值。在此基础上,选择全向天线提高网络连通性,同时考虑网络能耗提出基于光学中继的能耗均衡路由算法(a routing algorithm with balanced energy consumption by optical relay mode, BEC-ORM)。通过与其他算法仿真对比可知,该算法提升了网络可靠性和能耗均衡性,验证了 BEC-ORM 算法的有效性。

1 链路可靠性建模

FSOC 系统的可靠性与自由空间光在大气中传播特性紧密相关。因此从复合信道模型入手,求取链路接收的光信号强度和中断概率,进而考虑链路的接收光信号强度和中断概率建立链路可靠性模型,得出网络选择直传和中继方式的通信依据。

1.1 信道模型

因为大气因素对 FSOC 影响严重,同时光发射机和光接收机的对准也影响接收光信号强度,所以考虑大气湍流、大气损耗和瞄准误差这 3 种因素计算 FSOC 的通信损耗,建立包含大气湍流、大气损耗和瞄准误差的复合衰落信道模型,信道衰弱 h 可以表示为^[5]

$$h = h_l h_a h_p \quad (1)$$

式(1)中, h_l 代表大气损耗, h_a 代表大气湍流造成的损耗, h_p 代表瞄准误差造成的损耗。

大气损耗 h_l 主要包含大气的吸收和散射,表达式为

$$h_l(z) = \exp(-\sigma(\lambda)z) \quad (2)$$

式(2)中, z 为通信距离, σ 为大气衰落系数, λ 为波长。

对于大气湍流造成的损耗 h_a , 根据 Gamma-

Gamma 湍流模型, h_a 概率密度函数为^[5]

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{[(\alpha+\beta)/2]-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h_a) \quad (3)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_v(\cdot)$ 为 v 阶第 2 类修正贝塞尔函数。 α 与 β 分别表征大尺度湍流和小尺度湍流的参数, $\alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_1^2}{(1+1.11\sigma_1^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}$, $\beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_1^2}{(1+0.69\sigma_1^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}$, 其中 σ_1^2 为 Rytov 方差, $\sigma_1^2 = 1.23C_n^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{\frac{7}{6}}z^{\frac{11}{6}}$, C_n^2 为大气折射率结构常数。

瞄准误差损耗 h_p , 其概率密度函数为

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\xi_1^2}{A_0^{\xi_1}} h_p^{\xi_1-1}, 0 < h_p \leq A_0 \quad (4)$$

式(4)中, A_0 表示探测器收集到的光功率比例, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, 其中 $\text{erf}(\cdot)$ 为误差补函数, $v = \sqrt{\pi}r/(\sqrt{2}\omega_{z,1})$, $\omega_{z,1}$ 为 z 处的束腰半径, r 是一个矢量, 它表示接收机处光斑圆心相对发射机光斑圆心偏离的位移, ξ_1 表示接收端处等效波束半径与瞄准误差偏移量标准差之间的比值, $\xi_1 = \frac{\omega_{z,1,eq}}{2\sigma_s}$, σ_s 为抖动标准差, $\omega_{z,1,eq}$ 为接收器中等价束宽, $\omega_{z,1,eq}^2 = \omega_{z,1}^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$ 。

由式(1)~式(4)知, h 概率密度函数式如下^[1]:

$$f_h(h) = \int [f_{h_l h_a}(h | h_a) f_{h_a}(h_a)] dh_a \quad (5)$$

将式(2)、式(3)和式(4)代入式(5)可得:

$$f_h(h) = \frac{\alpha\beta\xi_1^2}{A_0 h_l \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_l} h \mid \begin{matrix} \xi_1^2 \\ \xi_1^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right] \quad (6)$$

其中, $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ 为 Meijer G 函数, 将 Meijer G 函数展开为级数的形式并对系数进行整合后得:

$$f_h(h) = C_1 h^{C_2} \quad (7)$$

式中,

$$C_1 = \begin{cases} \frac{\xi_1^2 (\alpha\beta)^\beta \Gamma(\alpha - \beta)}{\exp(-\sigma z \beta) A_0^\beta \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) (\xi_1^2 - \beta)} & \xi_1^2 > \beta \\ \frac{\xi_1^2 (\alpha\beta)^{\xi_1^2} \Gamma(\alpha - \xi_1^2) \Gamma(\beta - \xi_1^2)}{\exp(-\sigma z \xi_1^2) A_0^{\xi_1^2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} & \beta > \xi_1^2 \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} \beta - 1 & \xi_1^2 > \beta \\ \xi_1^2 - 1 & \beta > \xi_1^2 \end{cases}.$$

分析式(7)可知, C_1 是关于链路通信距离 z 有关的函数, 因此随着距离 z 的变化, 信道衰减 h 概率密度发生变化。

1.2 可靠性模型

通过上述获得的信道衰减概率密度函数(式(7)), 首先计算通信链路的中断概率和接收光信号强度, 然后根据接收光信号和中断概率建立链路的可靠性模型, 在此基础上分析随着距离 z 的变化, 直传和中继的链路可靠性变化情况, 以获取选择直传或中继方式的距离阈值 z_{th} 。

1.2.1 链路接收端接收的光信号

在 FSOC 系统中, 设发射光信号为 y_s , 平均值为 m_1 , 若 2 节点直接通信, 直传链路接收的光信号 y_D 为

$$y_D = h \times y_s + n_0 \quad (8)$$

其中 n_0 为节点噪声。

若 2 节点通过中继方式进行通信, 设中继节点在源节点和目的节点连线的中点处, 那么中继节点接收的光信号为 y_R , 平均值为 m_R 。

$$y_R = h \times y_s + n_0 \quad (9)$$

其中中继链路接收的光信号为

$$y_{DR} = h \times (G \times y_R + n_A) + n_0 \quad (10)$$

其中, n_A 为放大器自发辐射噪声; G 为放大增益, $G = \frac{m_2}{h \times m_1 + m_R}$, m_2 为中继节点发射光信号平均值。

1.2.2 中断概率

在 FSOC 系统中, 当链路的容量不能满足要求的传输速度时, 链路就会发生中断。而链路的容量和信噪比成正比关系, 若给定信噪比阈值, 当链路的信噪比低于该阈值时, 链路发生中断, 即每一条链路的中断概率可以记为

$$P_o = P_r(\gamma \leq \gamma_{th}) \quad (11)$$

直传链路时, 信噪比和中断概率分别为

$$\gamma = h \times m_1 \quad (12)$$

$$P_{out} = \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha \beta \gamma_{th}}{m_1 A_0 h_l} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right] \quad (13)$$

中继链路时, 2 条短链路的信噪比和链路中断概率分别为

$$\gamma_1 = m_1 h, \gamma_2 = m_2 h \quad (14)$$

$$P_{rout} = \Pr(\gamma_1 \leq \gamma_{th}) + \Pr(\gamma_2 \leq \gamma_{th})$$

$$= \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha \beta \gamma_{th}}{m_1 A_0 h_l} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right]$$

$$+ \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha \beta \gamma_{th}}{m_2 A_0 h_l} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right] \quad (15)$$

从式(8)~式(15)可以看出, 直传链路和中继链路的接收光信号和链路中断概率都和信道衰减 h 有关, 由于信道衰减 h 随着距离 z 的变化而变化(式(7)), 可知直传链路和中继链路的接收光信号和中断概率均随着距离 z 的变化而变化。

1.2.3 可靠性模型

在发射光信号不变的情况下, 链路接收的光信号越多, 代表链路通信越好, 而中断概率越小, 则代表链路存在的可能性越大。为此, 接收光信号越多, 中断概率越小, 链路的通信可靠性就越高。根据上述中断概率和接收光信号, 建立网络可靠性模型 F , 即为链路接收光信号和中断概率的比值, 那么直传链路的可靠性 F_D 可直接表示为

$$F_D = \frac{y_D}{P_{out}} = \frac{h \times y_s + n_0}{\frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha \beta \gamma_{th}}{m_1 A_0 h_l} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right]} \quad (16)$$

其中, 信道衰减 h 和大气损耗 h_l 都是关于距离 z 的函数。直传链路时, 随着距离 z 变大, 接收光信号越来越少, 中断概率变大, 所以距离 z 越大, 直传链路可靠性越小, 最终不再满足通信要求。此时, 需要加入中继节点, 把长链路变为短链路, 中继链路的可靠性则可以表示为

$$F_R = \frac{y_{DR}}{P_{rout}} = \frac{h \times (G \times y_R + n_A) + n_0}{\frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha \beta \gamma_{th}}{m_1 A_0 h_a} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right]}$$

$$+ \frac{h \times (G \times \gamma_R + n_A) + n_0}{\frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta\gamma_{th}}{m_2 A_0 h_l} \middle| \frac{1, \xi_1^2 + 1}{\xi_1^2, \alpha, \beta, 0} \right]} \quad (17)$$

当加入中继节点时,在短距离通信时,链路中断概率变化小,因为中继节点放大转发噪声的影响,接收光信号受影响大,所以中继链路可靠性小,而当距离一定大时,中继节点放大引入的噪声影响对链路影响较小,并且中继节点补偿了信道衰减,增大了链路接收光信号强度并且降低了中断概率,提高了链路可靠性。

1.2.4 距离阈值确定

从上述网络可靠性模型分析中可知,直传链路和中继链路的可靠性均随着通信距离的变化而变化,为此,根据通信距离 d 选择合适的通信方式(直传或中继),可达到提升网络可靠性的目的,结合式(16)和式(17)可得链路可靠性模型:

$$F = \max(F_D, F_R) \quad (18)$$

距离变化时,由直传链路和中继链路可靠性的分析可得,当距离 z 较小时, F_D 大于 F_R , 随着距离 z 增大, F_D 与 F_R 差距逐渐减小,并逐渐小于 F_R 。所以,网络存在距离阈值 z_{th} : 当 2 节点距离小于距离阈值 z_{th} 时, $F_D \geq F_R$, 选择直传链路的方式通信; 2 节点距离大于距离阈值 z_{th} 时, $F_D < F_R$, 选择中继链路的方式通信。

2 光学中继的能耗均衡路由算法 BEC-ORM

在上述链路的可靠性模型的基础上,同时考虑网络能量,提出基于光学中继的能耗均衡路由算法(BEC-ORM),该算法包含簇头选举、簇建立和簇头间通信 3 个部分。

2.1 簇头选举

为了使网络所有节点的能耗更均衡,簇头选举考虑节点的剩余能量,此过程主要包含光通信能量模型建立、节点能耗分析和簇头选举。

2.1.1 能量模型

FSOC 系统中,节点间采用 FSO 进行通信,此时

能量的消耗不仅与节点之间的距离有关,同时还与光学天线的激光扫描角度有关,如式(19)所示:

$$E_{TX}(l, z, \varphi) = E_{PX}(l, z, \varphi) + E_{TX_PE}(l) \quad (19)$$

其中, $E_{PX}(l, z, \varphi)$ 表示选用全向智能天线发送 l bit 数据所需要消耗的能量, $E_{TX_PE}(l)$ 表示对 l bit 数据的光信号进行处理元器件所消耗的能量。 $E_{PX}(l, z, \varphi)$ 和 $E_{TX_PE}(l)$ 的具体表达式分别如下:

$$E_{PX}(l, z, \varphi) = l\varepsilon\varphi z^2 \quad (20)$$

$$E_{TX_PE}(l) = lE_{TX_PE} \quad (21)$$

其中, ε 表示自由空间光波的能量系数, E_{TX_PE} 表示传输单位比特数据光电子元器件消耗的能量。将式(20)和式(21)代入式(19)可得:

$$E_{TX}(l, z, \varphi) = l\varepsilon\varphi z^2 + lE_{TX_PE} \quad (22)$$

而在光学接收端,接收单位比特数据所需要消耗的能量是 E_{RX} , 则接收 l bit 数据需要消耗的能量为

$$E_R = lE_{RX} \quad (23)$$

2.1.2 节点能耗

结合式(22)和式(23),可以计算出每一轮数据传输完成时节点的总能量消耗,每一轮数据传输时,设簇内节点均发送 1 bit 数据且节点个数为 n' , 簇头节点接收其簇内节点发送的数据,需将数据融合后发送给基站或其他节点,当簇头和其他节点通信距离适合中继通信时,寻找簇内节点充当中继节点,由上述可知每一轮的节点能量消耗 E_{CH} 可表示为

$$E_{CH} = \begin{cases} n'(E_{RX} + E_{DA}) + n'(\varepsilon\varphi z^2 + E_{TX_PE}) & \text{簇头节点} \\ \varepsilon\varphi z^2 + E_{TX_PE} + n'E_{RX} + n'(\varepsilon\varphi z^2 + E_{TX_PE}) & \text{中继节点} \\ \varepsilon\varphi z^2 + E_{TX_PE} & \text{普通节点} \end{cases} \quad (24)$$

其中 E_{DA} 为融合单位比特数据消耗的能量。节点的初始能量为 E_{total} , 每一轮数据传输后,根据节点能耗节点 E_{CH} , 计算剩余能量 $E_{residual}$ 。

2.1.3 簇头选举

为了防止网络中节点因为通信距离过长而过早死亡,簇头选举时需考虑节点剩余能量^[15]。通过上述节点能量消耗模型,得出每一轮各个节点的剩余能量,则选举公式如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/P)} \frac{E_{\text{residual}}}{E_{\text{total}}} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

其中, r 代表当前轮数, P 为簇头百分比, G 是在 r 前 $1/P$ 轮中没有担任过簇头的节点的集合, E_{residual} 为节点的剩余能量, E_{total} 为节点的初始能量。

根据式(25), 节点首先生成随机数, 如果小于预先设置的阈值 $T(n)$, 则成为临时簇头, 节点成为临时簇头后, 以 R 为半径广播 Be-Head 消息(簇头广播半径 R 的选择和簇头比例有关)。临时簇头如果没有收到其他簇头的 Be-Head 消息, 则作为簇头进行通信; 如果收到其他簇头的 Be-Head 消息, 比较剩余能量, 若剩余能量高于其他簇头节点, 则成为簇头, 否则为普通节点。

2.2 簇建立

在簇头选举完成后, 簇头广播 Be-Head 消息, 普通节点选择最近的簇头, 并发送 Join-Cluster 消息, 与该簇头进行通信。

2.3 簇头间通信

(1) 簇头向基站发送 Route Request(RREQ)消息, RREQ 包含簇头节点地址、基站地址、首跳节点地址、跳数和路由记录。

(2) RREQ 消息经中间簇头节点多次转发到达基站, 中间节点收到 RREQ 包时, 读取 RREQ 包的路由信息, 建立到簇头节点的反向路由, 并产生应答包 Route Reply(RREP), RREQ 对应的 RREP 包经多次转发更新也到达基站。

(3) 基站收到簇头节点经过多条路径传送的 RREQ 包, 根据 RREQ 中的全路由信息, 选择总跳数最小的 RREQ 包, 沿着反向路由返回其 RREP 包(如果有多个跳数最小 RREQ 包, 则选择最先到达的 RREQ 包)。

(4) 簇头节点根据收到基站返回的 RREP 包, 建立正向路由, 并插入路由表。簇头节点计算其路由表第一跳的距离 z , 并比较距离 z 与距离阈值 z_{th} 。

1) 若 $z \leq z_{th}$ 时, 簇头间通信路径不变, 采取直传通信;

2) 若 $z > z_{th}$ 时, 簇头根据与其一跳通信簇头的

ID, 计算 2 点中点坐标, 以中点为圆心, 寻找距离圆心距离最短的簇内节点, 设为 o_i , 将 o_i 加入路由表, 2 通信簇头经过节点 o_i , 采取中继通信。

算法流程如图 1 所示。

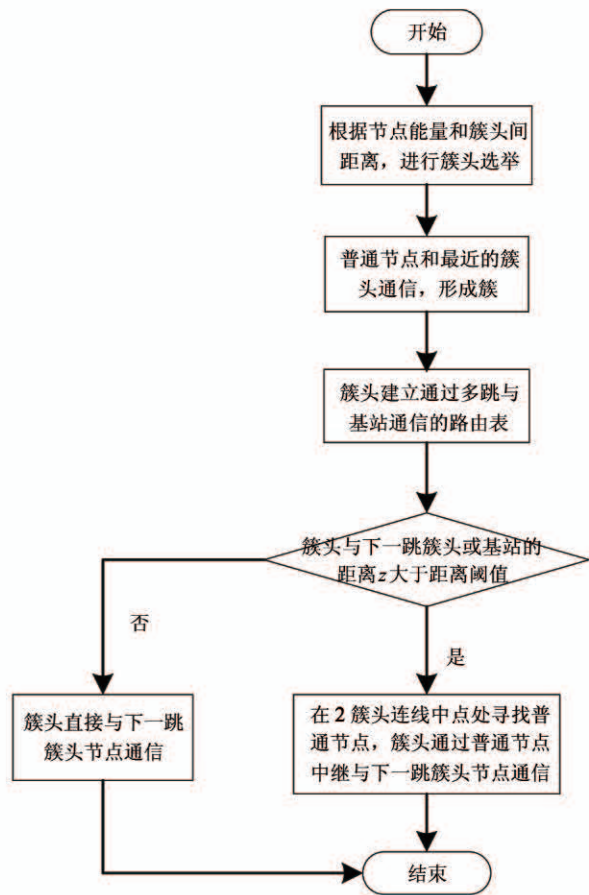


图 1 算法流程图

BEC-ORM 算法依据剩余能量选取簇头, 有利于均衡自由空间光网络的能耗; 利用接收光信号和中断概率建立的可靠性模型控制簇头之间以及簇头和基站之间的通信距离, 有利于提高自由空间光网络的可靠性。

3 仿真分析

为了验证 BEC-ORM 算法的有效性, 将 OBE-ORM 算法与光学高效能量多路径路由算法(optical efficient energy multi-path routing protocol, OEEM-RP)^[14]和簇头半径自适应层次型路由算法(cluster-head range adaptive adjustment clustering routing,

CRACR)^[16]进行仿真比较。仿真实验主要包括 2 个方面:一方面对 OBE-ORM 算法中直传链路和中继链路的可靠性变化进行分析,验证并求解距离阈值 z_{th} , 并分析该算法在不同簇头比例下的网络能耗,确定算法的最佳簇头比例;另一方面对比分析 OBE-ORM 算法、CRACR 算法和 OEEMRP 算法在网

络可靠性、能耗均衡性能的变化情况。仿真实验中节点随机分布在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的方形监测区域, sink 节点能量不限且位于监测区域外($50\text{m}, 125\text{m}$), 每一次仿真结果均为 50 次实验的平均效果图,具体实验环境参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	取值	参数	取值
大气衰减系数 σ_1^1	0.43 dB/km	信噪比阈值 γ_{th}	1 dB
Rytov 方差 σ_1^2	4	节点初始能量 E_{total}	0.02 J
归一化波束宽度 $w_{z,1}/r_1$	16	光电子器件能量损耗 E_{TX_PE}	4 pJ/bit
归一化抖动 σ_s/r_1	4	数据融合能量消耗 E_{DA}	5 nJ/bit
光学自由度 M	100	能量系数 ε	4 pJ/bit/m ²
SN 平均透射光信号 m_1	5.0×10^5	接收数据能量消耗 E_{RX}	60 pJ/bit
RN 平均透射光信号 m_2	5.0×10^5		

3.1 距离阈值

BEC-ORM 算法的簇头间通信存在直传和中继 2 种方式。根据直传链路和中继链路可靠性的理论分析可知,存在距离阈值 z_{th} , 在 2 簇头间距离小于距离阈值 z_{th} 时,直传链路优于中继链路;在 2 簇头间距离大于距离阈值 z_{th} 时,中继链路优于直传链路。根据式(16)和式(17),对直传和中继链路随着距离变化,可靠性变化情况进行仿真验证,得出距离阈值 z_{th} 。图 2 给出了随着距离 z 的变化,直传链路和中继链路的可靠性变化情况。

从图 2 中可以看出,直传链路和中继链路的可靠性都是随着距离变大先增大后减小,直传链路的可靠性最高值大于中继链路,并且它们在 $z = 0.3\text{ km}$ 处相交。在小于 0.3 km 距离时,直传链路可靠性要好于中继链路,在大于 0.3 km 距离时,中继链路可靠性则好于直传链路。这是因为通信链路受大气等影响,随着距离的增大,链路中断概率会逐渐增大,同时接收光信号也会减少。当传输距离较小时,加入中继节点,会引入背景噪声和放大自发辐射噪声,这些噪声对链路的影响较大;当传输距离较大时,加入中继节点,长链路变短链路,接收光信号经放大转发变多,同时中继节点引入的这些噪声对性能的影响被抵消。故根据仿真结果可知,存在距离阈值 $z_{th} = 0.3\text{ km}$,当距离 z 在 $(0, z_{th})$ 范围内采取直传链路

进行通信,而在 (z_{th}, z) 范围内采取中继链路进行通信。由图 2 还可以看出,直传链路的可靠性在 z_{th} 之后依然快速下降且在 0.4 km 后衰减变缓,为此设定节点最大通信范围 $z_{max} = 0.4\text{ km}$, 同时在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的仿真区域内,为了较好地验证直传与中继传输差异,本文将节点距离阈值 z_{th} 和最大通信范围 z_{max} 均进行了缩小处理,即 $z_{th} = 30\text{ m}$, $z_{max} = 40\text{ m}$ 。

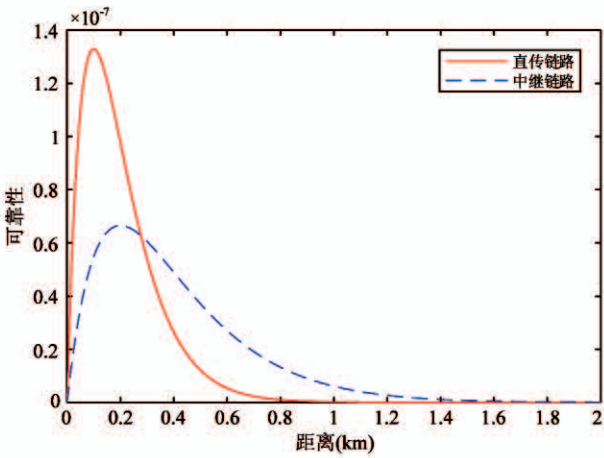


图 2 直传链路和中继链路可靠性对比图

3.2 最优簇头比例

分簇结构中簇头个数的多少,会影响网络的能耗,从而影响网络生命周期。根据 BEC-ORM 算法的节点能量消耗模型(式(24))计算节点的剩余能

量,将每个节点剩余能量相加得出网络的总剩余能量,网络总剩余能量在一定程度上能够反映网络的生命周期。鉴于分簇算法中,簇头比例 p 最优为 3% ~ 6%^[17],但 BEC-ORM 算法在 3% 的簇头比例下,簇头个数太少,构建的网络会寻找很多的簇内节点进行中继,使得网络能耗过大,所以下面仿真分析在 4%、5% 和 6% 3 种簇头比例下,BEC-ORM 算法在 20 轮内的网络总剩余能量情况,结果如图 3 所示。

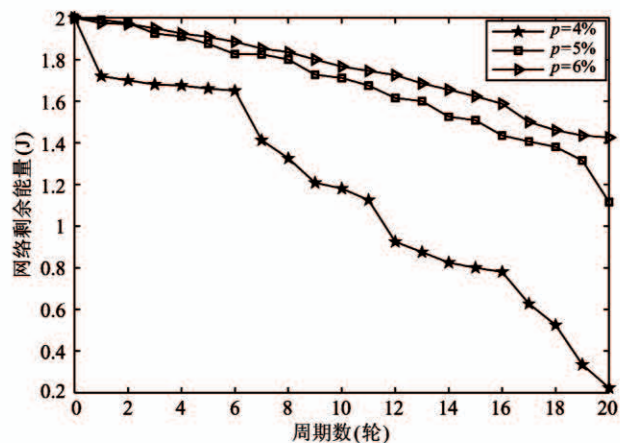


图 3 网络剩余能量对比图

从图 3 中可以看出,随着轮数的增加,在 4%、5% 和 6% 3 种簇头比例下,网络总剩余能量均减少,并且簇头比例越大,网络总剩余能量越多。这是因为簇头比例较小时,BEC-ORM 算法为了保证可靠性,引入较多中继节点,增大了网络能耗,随着簇头比例的增多,该算法簇头间通信距离在较远时加入中继节点减小通信距离,并且引入较少中继,这样就大大地减少了网络能耗。所以 BEC-ORM 算法簇头比例选择 $p=6\%$ 时网络总剩余能量达到最优。

3.3 可靠性

下面对 BEC-ORM 算法、CRACR 算法和 OEEMRP 算法进行可靠性对比。图 4 给出了 3 种算法构建的网络中簇头间和簇头到基站的通信链路的平均可靠性情况。

由图 4 可知,BEC-ORM 算法的网络可靠性最优,OEEMRP 算法次之,CRACR 算法最低。这是因为自由空间光通信受大气、对准误差等影响,随着距离变大,通信链路很容易中断,并且接收的光信号减

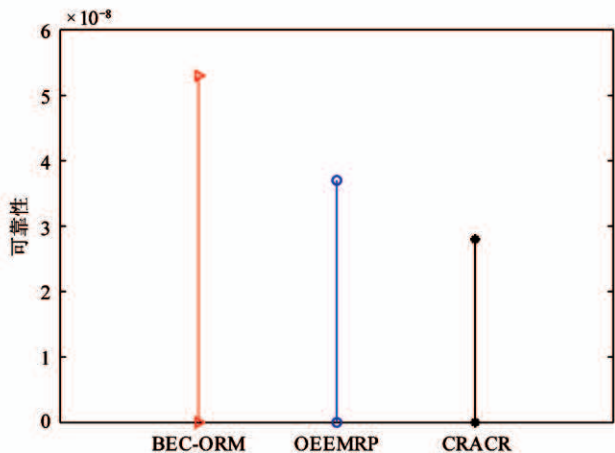


图 4 可靠性对比图

弱,链路的可靠性从而降低。而 OEEMRP 算法和 BEC-ORM 算法都引入了中继方式将长链路变为短链路通信,削弱了大气等因素的影响;但 CRACR 算法采用基站直接通信,受大气等影响严重。对比 OEEMRP 算法,BEC-ORM 算法考虑了中断概率和接收光信号 2 个方面,控制簇头间和基站通信距离,进一步提高了网络可靠性。

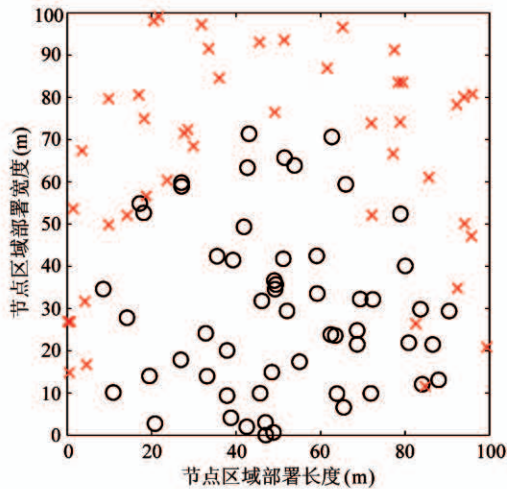
3.4 能耗均衡

对 BEC-ORM 算法、CRACR 算法和 OEEMRP 算法进行能耗均衡性对比,通过对比死亡节点分布和运行时间增加时每轮能耗变化情况,验证 BEC-ORM 算法能耗均衡性。

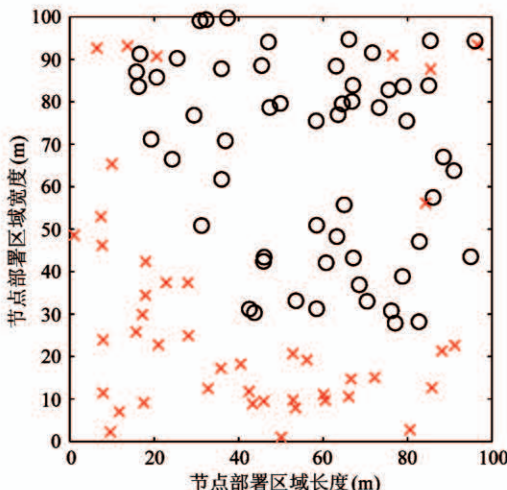
3.4.1 死亡节点分布

死亡节点的分布越均匀,网络能耗则越均衡。因此对 BEC-ORM 算法、CRACR 算法和 OEEMRP 算法死亡节点数约为总节点数 50% 时的分布进行对比,图 5 给出了 3 种算法构建的网络中死亡节点分布情况。这里死亡节点是节点剩余能量为 0 的节点,其中 $\circ$ 代表正常工作节点, $\times$ 代表死亡节点。

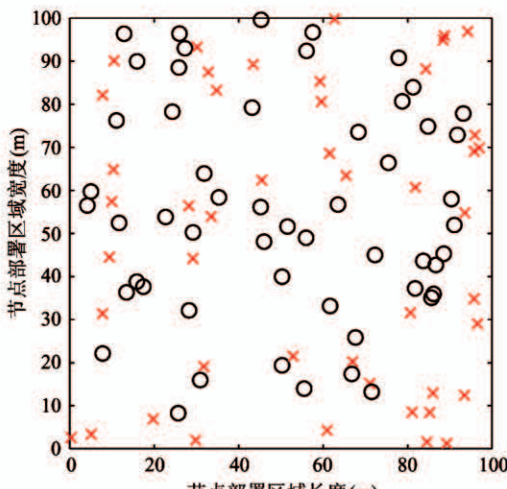
从图 5 可知,BEC-ORM 算法的死亡节点分布最均匀,OEEMRP 算法死亡节点分布均匀程度次之,CRACR 算法死亡节点分布最不均匀。这是因为 OEEMRP 算法和 BEC-ORM 算法都引入了多跳通信,但 CRACR 算法采用直接基站通信,距离基站远的节点能耗过大,节点过快死亡,从而死亡节点分布最不均匀。对比 OEEMRP 算法,BEC-ORM 算法考虑中断概率和接收光信号 2 个方面,控制簇头间和



(a) OEMRP 算法



(b) CRACR 算法



(c) OBE-ORM 算法

图 5 死亡节点分布对比图

基站通信距离,并且簇头选举时考虑节点剩余能量,能耗更均衡,进而死亡节点分布最均匀。

3.4.2 网络每轮能量总消耗

对 BEC-ORM 算法、CRACR 算法和 OEMRP 算法进行每轮能耗变化对比,网络能耗越小越均衡,网络生命周期则越长。图 6 给出了 3 种算法构建的网络中在 20 轮内每轮能耗的变化情况。

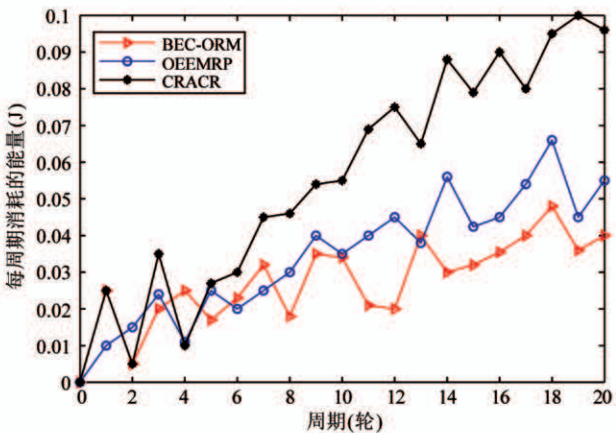


图 6 每轮能量消耗对比图

从图 6 可知,随着轮数的增加,3 种算法每轮的能耗都有增大趋势。在 0 ~ 7 轮,BEC-ORM 算法算法和 OEMRP 算法能耗相近,CRACR 算法能耗变化较大,从第 8 轮开始,BEC-ORM 算法每轮能耗变化最小,OEMRP 算法次之,CRACR 算法每轮能耗变化最大。这主要是因为网络拓扑影响网络的每轮能耗及能耗均衡性,BEC-ORM 算法和 OEMRP 算法的簇头都通过中继方式,经多跳传输数据给基站,对于离基站远的簇头,缩短了通信距离,减少了它们的能耗,与距离基站近的簇的能耗差距变小,进而平衡了全网的能量,而 CRACR 算法采用簇头直接与基站通信的方式,距离基站较远的簇头消耗过大,增加了每轮网络能耗,同时网络能耗均衡也越差。对比 OEMRP 算法,BEC-ORM 算法簇头选举考虑了节点能量和簇头间距,控制了簇头个数变化和分布,根据可靠性模型,控制了通信距离,进一步减少了网络能耗,提高了网络能耗均衡性。

4 结 论

对于自由空间光网络,链路可靠性和网络能耗均衡性是其工作的重要前提。本文通过中断概率和接收光信号强度 2 个方面构建网络可靠性模型,再结合多跳通信和簇头选举方式减少和均衡网络能耗,提出光学中继的能耗均衡路由算法(BE-ORM)。通过与其他算法的可靠性、死亡节点分布和每轮能量消耗的对比仿真,验证了 BE-ORM 算法构建的自由空间光网络具有可靠性高、能耗少且能耗更均衡的特点。

参考文献

- [1] 李千, 吴志勇, 高世杰, 等. APD 阵列探测器在自由空间光通信上的应用研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(1):10-17
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, 4(1):1518-1547
- [3] M Singh. Simulative analysis of 10 Gbps high seed free space optical communication link[J]. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016, 9(3):139-144
- [4] 韩立强, 游雅晖. 全光双跳自由空间光通信系统的性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 25(3): 93-100
- [5] Immadi G, Narayana M V, Kotamraju S K, et al. Estimating the performance of free space optical link under adverse weather conditions by using various models[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 13: 1603-1613
- [6] Wang J B, Chen M, Wang J Y, et al. Performance analysis for free-space optical communications using parallel all-optical relays over composite channels[J]. *IET Communications*, 2014, 8(9):1437-1446
- [7] Vineeta D, Devi C, Vinod C. High availability cooperative free space optical communication link with various diversity combining methods [J]. *IET Optoelectronics*, 2018, 12(4):208-214
- [8] Najafi M, Jamali V, Schober R. Optimal relay selection for the parallel hybrid RF/FSO relay channel: non-buffer-aided and buffer-aided designs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(7):2794-2810
- [9] Nor N A M, Ghassemlooy Z, Bohata J, et al. Experimental investigation of all-optical relay-assisted 10 Gb/s FSO link over the atmospheric turbulence channel[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(1):45-53
- [10] Hu Z, Verma P, James Sluss J. Improved reliability of free-space optical mesh networks through topology design [J]. *Journal of Optical Networking*, 2008, 7(5):436-448
- [11] Gurumohan P C, Hui J. Topology design for free space optical networks [C] // The International Conference on Computer Communications and Networks, Dallas, USA, 2003:576-579
- [12] Yang Z, Gu R, Dong T, et al. An artificial neural network based attenuation tomography in free space optical network[C] //2018 International Conference on Networking and Network Applications, Xi'an, China, 2019:52-57
- [13] Xie R, Tong F, Yang W H, et al. An energy considered routing protocol of free space optical sensor network [C] //2011 4th IFIP International Conference on New Technologies, Paris, France, 2011: 1-5
- [14] Zhang N. An algorithm of wireless sensor network based on free space optical communication [J]. *International Journal of Online Engineering*, 2017, 13(7):108-119
- [15] 钟达夫, 薛晶晶, 何锋, 等. 基于距离分区的多级异构无线传感器网络成簇算法[J]. 高技术通讯, 2017, 27(6):530-536
- [16] 石为人, 柏荡, 高鹏, 等. 无线传感器网络簇头半径自适应调节路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8):1779-1785
- [17] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C] //Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, USA, 2000: 3005-3014

A routing algorithm based on reliability for free space optical network

Yin Rongrong^{***}, Liu Lei^{***}, Yang Chouchou^{*}, Wang Jing^{***}

(^{*} School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(^{**} The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Free space optical network is easily interrupted by weather and other factors. In order to improve the reliability of the optical network and balance the energy consumption of the network, extend the life cycle of the network, the reliability model is established by considering the intensity of the received optical signal and the probability of interruption. The reliability model is used to compare and analyze the direct transmission and relay link modes, and to obtain the distance threshold for selecting the direct transmission and relay modes. Then, aiming at the problem of energy consumption balancing, considering the energy of nodes to select cluster heads, a routing algorithm with balanced energy consumption by optical relay mode(BEC-ORM) is proposed. Finally, the Matlab simulation platform is used to get the distance threshold of BEC-ORM algorithm to choose communication mode and the best cluster head ratio. The simulation results show that the algorithm can effectively improve the reliability and energy consumption balance of free space optical network.

Key words: free space optical communication (FSOC), routing algorithm, reliability, energy balance, distance threshold