

S节点首先向D节点发起一次数据传输,根据贪婪转发算法当数据到达A节点后遇到路由空洞,随后转发方式变为周边转发算法到达B点,转发方式恢复为贪婪转发发送到C节点,再次遇到路由空洞周边转发到E节点,由E贪婪转发到D节点.转发过程中,数据包将正向路径中由周边转发转为贪婪转发的节点标记为分段点(如B和E).

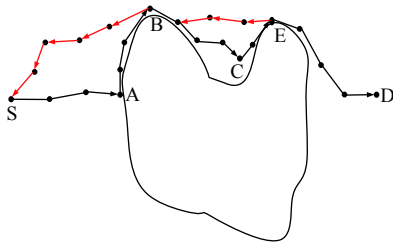


图1 路径优化过程

反向优化时,目的节点D首先读取数据包中的分段点,通过贪婪转发的方式反向发送到E节点,再从分段点中寻找下一个最近分段节点B,并发起一次贪婪转发,若转发过程中由于节点的移动性产生新的空洞,同样将更新后的路径和状态记录到数据包中.由B到S进行相同操作,不再赘述.

优化后的路径在数据传输过程中同样保留路径优化功能,当由于节点的移动导致中间节点失效时能够及时发现、及时优化.

2.2 分布式核心节点选择机制

上节中虽然引入贪婪算法来解决网络开销问题,但无法保证所选链路的稳定性,而且在移动网络中节点加入或退出时需要告知所有节点网络拓扑的变化,大大增加了节点的储存空间^[11].文章提出通过建立分布式核心节点,在核心节点中存储组播组的地址以及组成员的信息,在拓扑发生变化时只更新核心节点中的信息,而不用通知所有组成员,这样既降低了储存空间,也降低了网络开销.

2.2.1 核心节点选择标准

在贪婪算法对节点的选择上,为了能够满足更多的传输需求,需要对贪婪算法进行改进.通常,无人机在执行飞行任务时会根据航程、能量携带情况规定一定的巡航时间,当能量耗尽就退出所属机群返航,因此为了增加无人机巡航范围和巡航时间,需要尽可能的合理分配功率消耗.在通信领域,能量的消耗主要来自

于数据的发送,尽可能的避免低能量节点发送数据包是提高侦查能力的主要方法.

如图2所示,将节点的传输范围划分为三个部分,以源节点与目的节点的连线为轴方向左右各取 α 角,在此区域内接收节点与目的节点之间的欧氏距离小于发送节点与目的节点的欧氏距离,选得的接收节点为I区域最优点.由 2α 向两边继续扩张到180度,上下两部分共同组成II区域,该区域中依然有部分节点满足I区域条件,节点选择需要考虑在内.节点传输范围内的剩余部分组成III区域,在I区域和II区域都无法选择符合要求的节点时,需在该区域选择周边转发节点,此时空间传输的优势已不再作为主要标准,能量均衡显得尤为重要^[12].由此得到核心节点的选择标准:

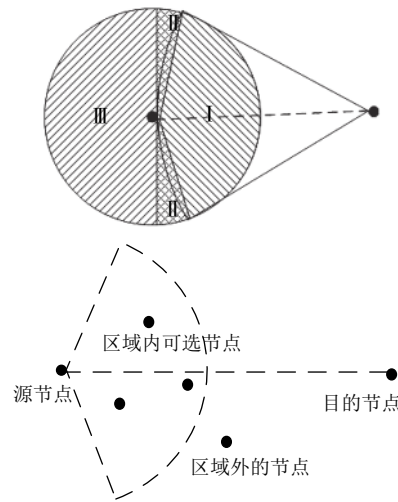


图2 节点选择范围

$$N(i) = \beta d(S, N) + (1 - \beta) E_{res} / E_{cap} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \beta = 0.6 & 0 \leq \theta < 2\alpha \\ \beta = 0.5 & 2\alpha \leq \theta < \pi \\ \beta = 0.4 & \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

其中, $N(i)$ 是核心节点的选择判据,选择可选区域内判据最大的点作为下一跳节点, β 是修正系数,根据节点所在位置取值, $d(S, N)$ 是发送节点与接收节点的距离, E_{res} 是节点的剩余能量, E_{cap} 是节点的总能量.

2.2.2 核心节点选择方案

根据改进贪婪算法方案,源节点首先发起一次向多个组播目的节点的寻路过程,并将源节点作为第一个核心节点.路由节点的选择根据核心节点选择标准,并在数据包中记录路由发现与优化过程中 $N(i)$ 最高的节点,核心节点的选择分为以下三个优先级:

(1) 同一个节点收到来自于同一个源节点不同目的节点的 Join-Request 分组, 则将该节点作为核心节点;

(2) 不存在交叉路径时, 选择贪婪转发过程中第一个分段点作为核心节点;

(3) 既不存在交叉路径也不存在路由空洞时, 选择核心节点标准 $N(i)$ 最高的节点作为核心节点.

每一条路径上除源节点外只存在一个核心节点, 核心节点选择完成后通知源节点并获得组播网络中所有节点的路由信息.

2.3 链路抢修机制

由于节点的移动特性, 部分中间节点不再适用于路由传输, 需要重新改变路由信息, 这样不但会导致链路的断裂与部分数据的丢失, 同样会增加网络负载. 为此, 将一种基于链路生存时间的抢修机制引入算法, 在链路断裂之前发起局部链路的修复过程, 保证数据不丢失.

2.3.1 抢修发起时机

根据无线信号功率计算的地面反射模型可得:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2)$$

P_r 是无线信号的接收功率, P_t 是无线信号的发射功率, G_t 和 G_r 是发送天线和接收天线的增益, h_t 和 h_r 为发送节点和接收节点的有效高度, d 为两节点之间的水平距离. 为了简化模型将公式中的常量抽象为统一参数 k , 得到简化模型:

$$P_r = k \frac{P_t}{d^4} \quad (3)$$

假设每个节点发送的数据包功率相同, 随着距离的增加节点接收到的数据包功率降低, 节点能够接收到的数据包的最小功率为 P_{\min} , 节点通信范围为 R , 移动速度为 v , 单跳传输时间为 t_s . 为了保证链路完整性以及不新链路会造成过多的开销, 局部链路的修复在 8 跳时间内完成. 由此可以得到数据包警告功率:

$$P_{\min} = k \frac{P_t}{R^4} \quad (4)$$

$$P_{\text{warning}} = k \frac{P_t}{(R - 8t_s v)^4} \quad (5)$$

当节点数据包的接受功率处于降低状态且已触发路由警告后, 节点会根据其移动方向计算链路的生存时间. 若生存时间小于修复时间时, 发起局部抢修. 生

存时间的计算公式如下:

$$t = \left[\frac{2vd \cos \theta + \sqrt{4v^2 d^2 \cos^2 \theta - 4v^2 (d^2 - R^2)}}{2v^2} \right] / 2v^2 \quad (6)$$

2.3.2 抢修发起过程

抢修发起过程如图 3 所示, 节点 B 连续收到来自节点 A 的数据包, 接收到数据包的功率一直处于下降状态且最后一跳的接收功率大小低于警告功率时 (过程 1), 首先返回一个通知包通知上一跳节点链路处于危险状态 (过程 2), 同时转发接收到的数据包, 并等待两跳的时间 (过程 3). 在两跳时间内未收到来自下一跳节点的警告信息, 则判断该节点与上一跳节点之间链路危险, 那么向上一跳节点的前跳节点 D 发起一次贪婪转发 (过程 4). 若在两跳时间内收到来自下一跳节点的警告信息 (过程 5), 则判断为该节点与链路远离, 那么向上一跳节点返回通知包 (过程 6), 通知前跳节点发起一次向下一跳节点的贪婪转发 (过程 7).

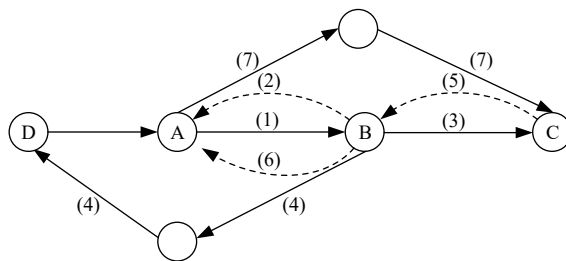


图 3 抢修发起过程

为避免路由陷入连续的更新导致负载变大, 收到链路危险通知的节点在收到来自同一源节点的寻路分组后不返回应答分组, 不参与转发.

3 分布式核心稳定路由算法

3.1 数据包格式

为了实现改进后的协议功能需要对数据包的格式进行重新定义.

当源节点需要发送数据时, 需要发送 Join-Request 分组去发现到达组播成员的路径来组建一个新的组播组. 为了实现改进贪婪机制的功能, Join-Table 分组采用与 Join-Request 分组相同的数据格式. 表 1 为改进后的数据结构. 图 4 为其数据封装结构.

算法将组播组中组播成员以及地址信息储存在核心节点中, 普通转发节点只需要维护一张相邻两跳的路径信息表, 减少了由于拓扑的变化产生的路由信息

大量更新,也减少了普通转发节点的储存空间.表2为转发节点路径信息表.

表1 Join-Request/Join-Table 分组数据结构

字段名 Field names	功能 Function
序列号 Sequence	判别包是否重复接收
源节点 Source	记录源节点的 ID 和地址
目的节点 Destination	记录目的节点的 ID 和地址
核心节点 Core Node	记录核心节点的 ID 和地址
前跳发送状态 Prior Sending State	记录上一跳发送状态
分段点 Segment Point	路径分段
$N(i)$ 最大值点 NIMAX	记录 $N(i)$ 的最大值以及该点 ID 与地址

Sequence (8 bits)	Core node (8 bits)
Source (8 bits)	Destination (8 bits)
Prior sending state (8 bits)	
NIMAX (8 bits)	
Segment point (16 bits)	

图4 Join-Request/Join-Table 分组数据结构封装

表2 转发节点路径信息表

字段名 Field names	功能 Function
组播组地址 Multicast Group Address	记录所属组播组
前一跳节点 Previous Hop Node	转发节点的前跳节点
后一跳节点 Next Hop Node	转发节点的后跳节点
核心节点 Core Node	核心节点的 ID 和地址
Sop 包到达时间 Sop Arrival Time	确定路由状态

3.2 路由过程

3.2.1 正向路由建立

根据改进机制对 ODMRP 协议的路由建立过程进行优化,具体步骤如下:

(1) 源节点有数据需要发送,首先将源节点设置为核心节点,但不计入 Join-Request 分组中.设置 Core Node 字段为空, NIMAX=0;

(2) 向参与组播的目的节点发送 Join-Request 分组,并按照核心节点选择机制选择下一跳;

(3) 节点接收到 Join-Request 分组首先判断之前是否接受过来自于同一个源节点的 Join-Request 分组.如

果是,则将该节点写入 Core Node 字段.进行第(4)步;

(4) 判断选择标准中是否满足 $0 \leq \theta < \pi$. 如果是,进行第(5)步;否则,将 Prior Sending State 设置为 0,进行第(6)步;

(5) 判断 Prior Sending State 的值是否为 0,如果是,则将该节点的 ID 和地址插入到 Segment Point 字段中,进行第(6)步;若 Prior Sending State 的值为 1,直接进行第(6)步;

(6) 判断下一跳节点是否为目的节点,若是,则直接发送分组结束正向路由搭建过程;若不是,比较该节点到下一跳节点选择标准 $N(i)$ 的值与 NIMAX 的值,将较大的值计入 NIMAX 字段,并发送分组,进行第(3)步.

3.2.2 反向路由建立

根据正向路由得到的信息构建 Join-Table 分组进行反向路径的确认,具体步骤如下:

(1) 目的节点首先读取正向路径信息中是否存在核心节点,如若,则将其设定为该路径的核心节点并写入 Join-Table 分组中的 Core Node 字段,按照记录的路由发送分组,进行第(4)步,若没有则进行第(2)步;

(2) 查找 Join-Request 分组中 Segment Point 字段是否记录分段点信息,如果有,则将其设定为该路径的核心节点并写入 Join-Table 分组中的 Core Node 字段,按照记录的路由发送分组,进行第(4)步,否则,进行第(3)步;

(3) 将 NIMAX 字段中记录的节点设定为该路径的核心节点并写入 Join-Table 分组中的 Core Node 字段,按照记录的路由发送分组,进行第(4)步;

(4) 接收到 Join-Table 分组的节点首先判断自己是否为源节点,如果是,则结束反向路由建立,如果不是,进行第(5)步;

(5) 判断该节点是否为核心节点,如果是则标记为核心节点,建立核心节点路由表,记录组播组的地址及成员节点信息,进行第(6)步,否则直接进行第(6)步;

(6) 判断该节点是否为分段点,如果是则发起一个向下一个分段点的寻路过程,直到到达下一个分段点,进行第(4)步.

由于节点的移动性导致路由过程中部分节点失效,在一段时间内没有接收到 Sop 包的转发节点判断路失效主动退出组播组.

路由抢修发起的时机与过程在 2.3 节中已有叙述,

在此不再赘述。

4 仿真分析

本文使用 opnet^[13]进行仿真,在场景配置中,为使得最终的仿真结果更加直观,将本文协议分布式核心稳定路由协议命名为 DKSR(Distribute Kernel Stable Routing)。为了验证算法的优化性能,选择与组播路由中性能较好的 ODMRP^[14]路由协议以及同样针对 ODMRP 进行改进的变核心组播协议 VCMP(Variable Core Multicast route Protocol^[15])算法从平均端到端时延、分组交付率和网络开销三个方面进行比较,并对不同节点密度下的协议性能进行仿真。VCMP 算法通过在源节点与目的节点之间设置单个核心节点的方式建立路由,源节点与核心节点之间通过单播协议传输,由核心节点将数据洪泛给目的节点。主要仿真参数见表 3。

表 3 主要仿真参数设置

参数	值
仿真区域	1000 km×1000 km
节点数量	60、70、80、90、100、110
通信覆盖范围	200 km
MAC 协议	SPMA
移动速度	200 m/s

图 5 显示的是 ODMRP 协议、VCMP 协议以及 DKSR 协议在不同节点密度下平均端到端时延的变化趋势。可以看出,比较于 ODMRP 协议,VCMP 协议以及 DKSR 协议具有更加明显的优势。这是因为 VCMP 协议以及 DKSR 协议都通过贪婪算法对 ODMRP 协议的路由发现过程进行了改进,能够更快的寻找到组播成员节点。比较于 VCMP 协议,在节点密度较小的情况下,DKSR 协议的端到端时延稍有增加,这是因为该协议在路由发现过程中会通过反向优化来减少路由绕行,随着节点数目的增加,链路的稳定性优势突出,优化效果更加明显。VCMP 协议采用单一的路由发现方式,随着节点数目增加,链路不稳定因素增多导致核心节点频繁更新。因此,DKSR 协议具有更好的网络扩展性。

图 6 显示的是 ODMRP 协议、VCMP 协议以及 DKSR 协议在不同节点密度下分组交付率的变化趋势。可以看出,比较于 ODMRP 协议和 VCMP 协议,DKSR 协议的分组交付率优势更加明显。这是因为 DKSR 协议能够选择一条更加稳定的路由,并且能够随着网络拓扑的变化及时的修复路径,保证节点能够准确的交付。

而 VCMP 协议对核心节点的选取和变化条件单一,路径的修复不及时,因此导致部分数据丢失,交付率下降。

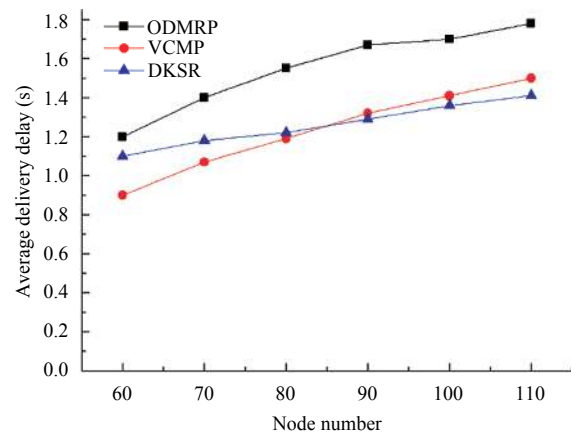


图 5 平均端到端时延

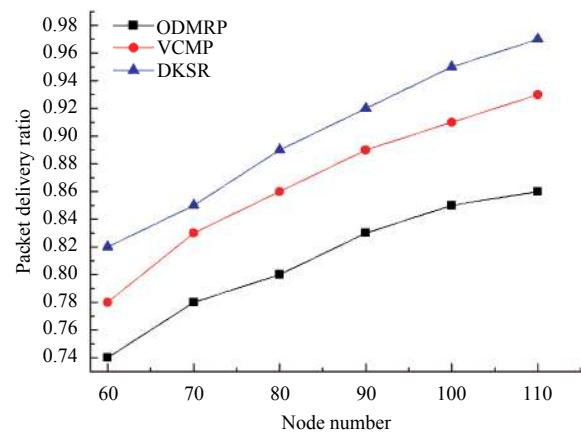


图 6 分组交付率

图 7 显示的是 ODMRP 协议、VCMP 协议以及 DKSR 协议在不同节点密度下网络负载的变化趋势。可以看出 ODMRP 协议、VCMP 协议以及 DKSR 协议在网络负载上相差不大。虽然在节点密度不大的情况下,VCMP 协议以及 DKSR 协议对于路径优化信息的引入导致网络负载稍有增加,但是但随着网络节点密度的增大,对路径的优化效果明显,多余的节点传输减少,网络负载降低,而 ODMRP 协议通过洪泛的方式建立路由大大增加了网络的负载。DKSR 协议通过稳定算法以及核心节点选择机制建立稳定链路,并且通过抢修机制保证链路有效性,减少了由于链路断裂导致重新建立链路,从而降低了网络负载,因此随着节点密度的增大曲线趋于稳定。而 VCMP 协议会因为拓扑的变化部分链路失效,从而网络负载上升。

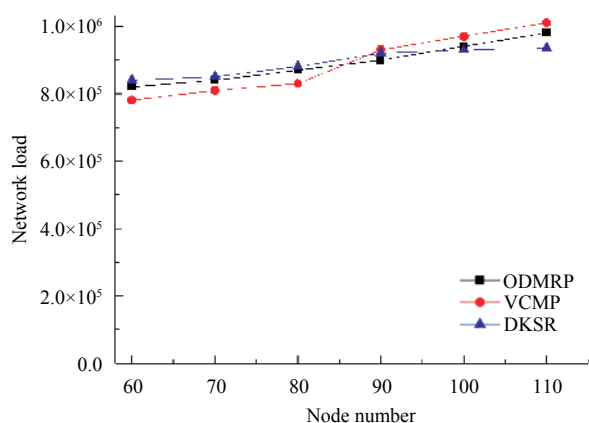


图7 网络开销

5 结语

本文针对组播路由的建立问题提出改进算法,改进贪婪选择机制以减少路由发现过程中的数据洪泛以及路由空洞,考虑到成员节点负载能力有限提出了核心节点选择算法,以减少储存空间,同时提出通过链路抢修机制提前修复危险链路保证路径的有效性和交付率.仿真实验证明,DKSR协议能够很好的提升组播网络的性能,虽然造成了网络负载的稍有增加,但在可接受范围内对网络性能做出明显优化,能够达到多无人机联合通信需求.

参考文献

- 1 Sun SM, Han L, Han S. GRMR: Greedy regional multicast routing for wireless sensor networks. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2016, (1): 21–29.
- 2 Wu SB, Candan KS. Demand-scalable geographic multicasting in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2007, 30(14–15): 2931–2953.
- 3 Dhurandher SK, Sharma DK, Woungang I, *et al.* An energy-efficient history-based routing scheme for opportunistic networks. *International Journal of Communication Systems*, 2017, 30(7): e2989. [doi: 10.1002/dac.v30.7]
- 4 Kim T, Park H, Jin MS, *et al.* Energy-balancing multicast routing protocol for wireless sensor networks. *Proceedings of*

- the 4th IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian, China. 2008. 1–5.
- 5 Li LY, Li CL. QoS multicast routing protocol in hierarchical wireless MANET. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008, 51(2): 196–212. [doi: 10.1007/s11432-008-0019-z]
- 6 Cui JQ, Zhang WL, Huang F, *et al.* Hierarchical adaptive recovery algorithm in mobile ALM. *Proceeding of the 3rd CCF Internet Conference of China*. Shanghai, China. 2015. 95–105.
- 7 伍龙昶, 石英, 张焕清, 等. 基于下一跳前向转发节点密度的 GPSR 改进协议. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2017, 41(3): 474–478, 483. [doi: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.03.023]
- 8 Subramaniam K, Tamilselvan L. Predictive energy efficient and reliable multicast routing in MANET. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2015, 9(9): 706–714. [doi: 10.19026/rjaset.9.2615]
- 9 Li LY, Jiang WC, He Y, *et al.* A geographic location routing method for energy balance in wireless sensor networks. *Computer Engineering & Science*, 2017, 39(10): 1847–1853.
- 10 Chen DZ, Varshney PK. A survey of void handling techniques for geographic routing in wireless networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, 9(1): 50–67.
- 11 Konstantopoulos C, Gavalas D, Pantziou G. Clustering in mobile ad hoc networks through neighborhood stability-based mobility prediction. *Computer Networks*, 2008, 52(9): 1797–1824. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.01.018]
- 12 Zhang ZX, Xiao D, Wang JB. Research of energy management strategy for fuel cell hybrid power system of multi-rotor unmanned aerial vehicle. *Information Technology and Network Security*, 2018, 37(1): 122–126.
- 13 陈敏. OPNET 网络仿真. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 14 Wang XY. Simulation and analysis of OBAMP and ODMRP in mobile ad hoc networks. *Experimental Technology and Management*, 2015, 32(4): 141–143, 165.
- 15 Wu MF, Le HB. Optimization of ODMRP and simulation. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(18): 5558–5561.