

一种面向可靠传输的数据链中继策略研究

杨光 曾斌

(海军工程大学管理工程系 武汉 430033)

摘要 数据链采用泛洪中继(Flood Relay)策略实现信息在全网的广播,该策略通过冗余发送提高传输的可靠性,但是在网络节点密集的情况下,将引起过量的泛洪开销,因此被认为是低效的。分析了数据链的双时隙中继泛洪模式,并在此基础上提出了一种面向可靠传输的 MPR(RA-MPR)策略,该策略保证在满足可靠性约束和传输时延约束等条件下,根据节点的主控关系、节点的可靠度以及节点间的邻接关系进行优选中继节点,构成具有中继功能的临时性的核心网络,该网络随着拓扑结构的变化、电磁环境的变化、节点的毁伤以及主控关系的变化而动态变化。通过算法分析和仿真,比较了该策略在不同网络规模和传输半径条件下的性能,分析结果显示该策略不仅降低了泛洪开销,而且保证了报文传输的可靠性。

关键词 数据链,泛洪中继,RA-MPR,启发式算法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Research on Reliability-aware Relay Strategy in Data Link

YANG Guang ZENG Bin

(Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract Flood relay strategy, which is used in tactical data link(TDL) to realize the broadcast of information, belongs to pure flooding which is supposed to be inefficient. The strategy improves the delivery reliability by redundancy, however, it will lead to superfluous flooding cost. The restricting conditions of the TDL broadcast relay algorithm were analyzed. Then a new relay strategy RA-MPR was proposed to guarantee optimization of relay nodes choice based on the node's reliability and adjacency while meeting the conditions of restriction on LOS, capacity, delay and equipment. Using the algorithm analysis and simulation of the RA-MPR, the performance of RA-MPR under different network scales and delivering radii was discussed.

Keywords Tactical data link, Flood relay, RA-MPR, Heuristic algorithm

1 引言

数据链多采用泛洪中继(Flood Relay)^[12]策略实现信息在全网的广播。在该中继策略中,所有的平台根据链路原理在链路上中继,并且不允许回送。该策略虽然增加了时隙开销,但是通过在多个路径上多次传输同一个报文,使得报文传输的可靠性提高^[1]。然而,该中继策略具有以下不足:(1)该中继策略属于纯泛洪(Pure Flooding),当节点第一次接收到一个广播报文时,它简单地通过本地广播将报文传输给它的所有相邻节点。在此方式下,每一个节点均是中继节点,尽管该中继策略具有简单、可靠性高的优点,但它具有很大的冗余度,在无线网络中可能造成大量的冲突和碰撞^[3]。(2)该中继策略是建立在整个网络为无中心节点结构下的策略,该策略认为所有的网络节点均为对等节点。然而,对于实际的作战环境,作战单元之间的指控关系使得网络中的节点并非为对等关系。(3)由于作战单元在作战中的角色安排及任务分配,使得节点的中继功能可能受到限制。(4)由于网络拓扑结构的动态变化以及通信链路的不稳定或失效,网络中中继节点

的可用性不确定,中继路径动态变化。中继节点的选择必须考虑其地理位置以及连通性,确保在链路出现故障的情况下,仍能完成信息的可靠传输。

如何在强干扰环境下对数据链网络中继广播协议进行优化,保证在满足可靠性约束、传输时延约束等^[4]约束条件下,尽可能少地利用中继节点,实现信息在全网的广播,并使数据链网络传输可靠性达到最高,是本文需要解决的问题。针对数据链网络中继策略的不足,本文将对数据链的泛洪中继策略进行改进,根据节点的主控关系、节点的可靠度以及节点间的邻接关系进行优选中继节点,构成具有中继功能的临时性的核心网络,该网络随着拓扑结构的变化、电磁环境的变化、节点的毁伤以及主控关系的变化而动态变化。核心网络的建立借鉴了 OLSR 协议^[5,6]中提出的 MPR(MultiPoint Relaying)多点中继思想,并在此基础上提出了新的中继广播策略,该策略既降低了泛洪开销,又最大程度地保证了报文传输的可靠性。

本文提出了一种面向可靠传输的中继广播策略 RA-MPR(Reliability-aware MPR),该策略分为 RA-MPR-N 和

本文受国家自然科学基金(基金号 71201172)资助。

杨光(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为数据链系统及装备仿真研究、电子信息系统及装备仿真;曾斌(1970—),男,博士,教授,主要研究方向为系统管理、装备管理、信息管理。

RA-MPR-R 两种中继选择算法;分析了两种算法,并采用仿真的方法比较了几种策略在不同网络规模和传输半径条件下的性能。

2 双时隙泛洪中继模式

Link-16 数据链采用视距通信,其空对空或空对舰的通信距离可达 300 海里;舰对舰的通信距离接近 25 海里,而采用中继模式进行通信,其通信距离可以达到 500 海里。另外,Link-16 数据链的指控层叠网通过时隙复用实现多组指控平台和作战平台同时交换战术命令,每个子网中都有指控平台和其指挥之下的作战平台(如作战舰艇、战斗机、导弹发射架等),由于作战平台活动范围大,一旦超出指控平台的视距范围就需要中继。

Link-16 数据链主要采用双时隙泛洪中继(Paired-slot Flood Relay)^[1,2]模式实现全网内的中继,在网络设计期间就已经专门为中继分配了时隙。如图 1 所示,在一个时隙段内接收的报文可以在下一个已预先分配的专用时隙段内进行中继,用于发送原始报文和二次发送报文的时隙称为一个时隙对,且二者之间形成的固定位移称为中继时延。最初的发送端机在传送报文后,中继端机接收到该报文,并将其存储并重新转发。在二次发送报文之前,中继端机先进行 RS 编码纠错;未进行错误校正的报文不能被二次发送。发射时隙与接收时隙组配成对。

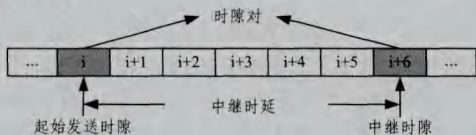


图 1 数据链中继时隙的分配

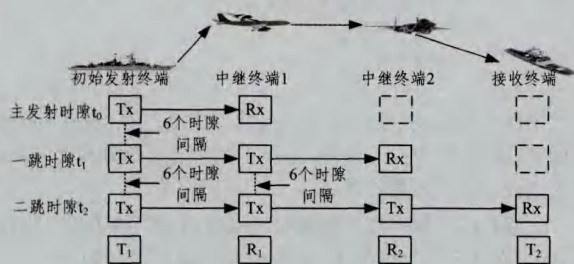


图 2 双时隙泛洪中继示例

采用双时隙泛洪中继时,网络设计中用于中继的网络参与群可以由任何设备中继。其工作过程如图 2 所示,主要分为以下步骤:

(1) 在初始发送时隙, T_1 发送原始报文, R_1 监听并接收 T_1 的报文,当 R_1 没有收到正确报文时,将报文丢弃;如果 R_1 正确接收了报文则保留该报文,此时 T_2 可能正确接收到 T_1 发送的报文,也有可能因为不在 T_1 视距范围内而不能接收该报文,或者由于信道环境影响错误接收该报文,于是将该报文丢弃。

(2) 在第一个中继时隙, T_1 再次发送该报文;如果 R_1 在初始发送时隙没有正确接收该报文,则再次监听该报文;如果在初始发送时隙正确接收到报文,则将该报文转发。 R_2 监听 R_1 转发的报文,如果正确接收则保留,如果没有正确接收则丢弃该报文,此时, T_2 可能正确接收到 T_1 发来的报文,也有可能正确接收 R_1 发送来的报文。

(3) 在第二个中继时隙, T_1 再次发送该报文,同时 R_1 和 R_2 如果保留有正确报文也转发该报文,此时, T_2 可能正确接收到 T_1 发来的报文,也有可能正确接收到 R_1 或 R_2 发送来的报文。

T_2 经过 3 个发送时隙最终能够正确接收到 T_1 发送报文的概率取决于 T_2 与 T_1 、 R_1 和 R_2 3 个节点的距离,以及 T_2 与 T_1 、 R_1 和 R_2 3 个节点间通信链路的抗干扰特性。 T_2 正确接收到 T_1 发送报文的时延取决于第一次正确接收报文的时延。

3 RA-MPR 机制

传统的 MPR 选择策略只考虑如何最小化 MPR 集,没有考虑数据链的时延和可靠性等各种约束条件的要求,为了尽可能地实现数据链传输可靠性的要求,必须在 MPR 集的选择策略中考虑节点可靠度的影响,为了使得所选出的 MPR 集能够尽可能地满足数据链通信的传输可靠性,MPR 集的选择策略需要利用节点收集的局部拓扑信息,这里是指节点和其局部拓扑范围内节点的可靠度。局部范围越大,所提供的信息越多,可以更好地指导 MPR 选择。但是用来保存和维护局部信息的开销也越大,相应的 MPR 选择的算法也会越复杂,因此协议需要在两者之间找一个折衷点,协议所选择的局部范围是二跳,这也符合数据链通信的实际。

在 RA-MPR 泛洪机制中,MPR 集的建立是初始步骤,主要包括 3 个步骤:

(1) 当对一个数据链网络进行初始配置时,网络中的每个节点通过周期性地广播其邻居节点的地址以及本节点的可靠度(见定义 4),实现自身的初始化,进而每个节点了解其一跳邻居节点的状态并且在一跳邻居表中记录该信息。该信息只在一跳的范围内广播,不能被中继转发。

(2) 本文所考虑的 QoS 参数主要是传输可靠性,因此 MPR 的选择就是在收集的局部拓扑信息的基础上,使得泛洪中继传输向具有较大传输可靠性的方向进行,从而提高搜索效率。每一个路由节点交换其一跳邻居信息,因此了解其二跳邻居节点。网络中各路由节点通过从其一跳邻居节点集中选择 MPR 节点,形成 MPR 子集。选择 MPR 子集的原则:节点所发送的分组通过 MPR 的中继,能够到达所有的二跳邻居节点,如果能够满足这一点,那么 MPR 就能实现中继广播,同时应尽量减少 MPR 的数量,最小化泛洪通信量,并最大程度地保证报文传输的可靠性。

(3) 每个路由节点通过一跳范围内广播实现对 MPR 集的通告,如果某个节点是 MPR 集的成员,它将发送节点(称为 MPR Selector)的地址记录在一个 Selector 表中,因而当该节点收到泛洪报文时,首先将报文的发送节点地址与其 Selector 表进行匹配,如果接收报文的节点为发送节点的 MPR,则接收报文的节点转发该报文,否则不转发。

4 算法描述

MPR 集的选择属于支配集问题。而对任意图的支配集问题属于 NP 完全问题,解决此类问题的算法复杂性与对应图的规模呈指数关系。常用的构造支配集的方法分为非多项式时间的精确计算和多项式时间的求近似解。主要利用逻辑运算和利用启发式规则解决支配集问题。其中,对于逻辑运

算方法,影响计算复杂度的因素包括利用分配律对积式展开,以及对结果的所有展开项进行约简。假设图的规模为 n , 每个顶点的度上限为 k , 则仅进行积式展开的操作所需要的时间复杂度为 $O(k^n)$ 。随着规模的增长,计算复杂度将呈现几级增长,可见此方法仅适用于极小规模图的支配集求解。

由于逻辑计算方法不能很好地将计算复杂度收敛在可控范围之内,随后提出的方法大多以结果的精确度换取解决问题的效率,即解决问题的结果不一定是最优的,但解决问题的过程所消耗的时间是可以忍受的,因为在大多数应用中并不需要绝对的最小支配集。按照这种思路,可以引入一定冗余顶点为代价简化解决问题的复杂度。具有代表性的是利用启发式规则计算最小连通支配集(Minimum Connected Dominating Set)。因此,本节将采用启发式算法解决 RA-MPR 中继策略问题。

本研究对数据链多点中继(MPR)的选择建立了如下模型。采用无向连接的 DGB 图(Disk Graphs with Bi-directional Links) $G=(V, E)$ 表示数据链网络在 t_0 时刻的拓扑结构。其中, V 是非空节点集,表示数据链节点集合; E 是连接节点的有向边的集合,表示数据链通信链路集合。假设网络中各节点的天线为全向天线,且视距半径相等为 r , $Eucl(u, v)$ 为节点 u 和节点 v 在欧几里德平面的距离。出于简化问题考虑,本文定义当且仅当 $Eucl(u, v) \leq 2r$ 时,即通信双方均在对方的传输半径之内时,节点 u 和 v 存在连接,并假设网络中不存在分隔区域和孤立节点。

定义 1(单位圆图, Unit-Disk Graph, UDG)^[128] 若二维平面内的点都可以与图中等半径的圆建立一一对应关系,当且仅当对应的圆相交或相切时图中的两个顶点存在连接(以边表示),这样的图即为单位圆图。为不失一般性,可以假定每个圆半径均为 r ,如图 3 所示。

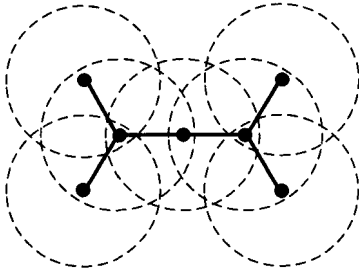


图 3 数据链网络中的单位圆图

由定义 1 可知,端机节点被抽象为具有相同半径的圆。两端机节点存在链接的充要条件为表示端机节点的两个圆相交或相切。若端机节点之间存在链接,则用连接顶点之间的边来表示。根据全向天线传输数据的特点,可以用单位圆图来表示端机节点的覆盖范围和链路状态。

定义 2(支配集, Dominating Set, DS) 图 G 的节点集 C 为支配集,若满足 $C \subseteq V$, 且 $\forall u \in V, u \in C$ 或 u 与 C 中某一节点相邻, C 中的节点称为支配点。

定义 3(连通支配集, Connected Dominating Set, CDS) 若节点集 C 为连通无向图 G 的支配集,且由 C 导出的子图为连通图,则称 C 为连通支配集。节点数目最少的连通支配集称为图 G 的最小连通支配集。若节点 v 在 C 中,或与 C 中某一节点相邻,则称节点 v 被 C 覆盖。

基于连通支配集的概念,数据链网络中的中继广播策略

可以描述为:给定一个连通无向图 $G=(V, E)$, 设广播源节点为 S , 求图 G 的包含 S 的最小连通支配集。

定义 4(节点可靠度) 数据链节点能实现报文的正确接收必须满足以下条件:1)该节点在通信时没有被毁伤;2)该节点与源节点的链路保持连通;3)该节点能够正确接收源节点的报文。因此在图 G 中节点 u 的可靠度为 $Rel(S, u; G) = Arr(u) \cdot Conn(S, u) \cdot (1 - Dam(u))$, 其中 $Dam(u)$ 表示节点 u 的毁伤概率, $Conn(S, u)$ 为源节点与节点 u 之间链路的连通概率, $Arr(u)$ 为源节点发送的报文正确到达节点 u 且满足时延约束条件的概率,即报文交付概率。

根据以上假设条件以及相关定义,在图 G 上可定义相关函数。符号说明如下:

- (1) $R=[r_w]$: 节点 u 和节点 v 之间的传输可靠度约束;
- (2) $D=[t_w]$: 节点 u 和节点 v 之间的时延约束;
- (3) $H=[h_w]$: 节点 u 和节点 v 之间的最大跳数约束;
- (4) $Rel(u, v; G)$: 图 G 中节点 u 到 v 之间的报文传输可靠度;
- (5) $Delay(u, v; G)$: 图 G 中节点 u 到 v 之间的报文传输时延;
- (6) $H(u, v; G)$: 图 G 中节点 u 到 v 之间的报文传输跳数;
- (7) $\{T_u\}$: 网络节点的容量集合;
- (8) $N(v)$: 节点 v 的开放邻节点集合, $u \in N(v)$ 当且仅当 $e(u, v) \in E$;
- (9) $N^2(v)$: 节点 v 的开放二跳邻节点集合, $u \in N^2(v)$ 当 $u \in N(N(v))$ 且 $u \notin N(v)$;
- (10) $share(u, v)$: 图 G 中节点 u 和 v 的共有邻接节点集, $share(u, v) = N(u) \cap N(v)$;
- (11) $MPR(v)$: 节点 v 在算法选择下的多点中继集, $MPR(v) \subseteq N(v)$;
- (12) $U(v)$: v 的暴露节点,表示 $N^2(v)$ 中在 v 看来目前尚不能被已选转发节点覆盖的节点;
- (13) d_w : 节点 u 到 v 之间传输可靠度的权值。

问题:给定中继站的拓扑 G' , 在满足组网约束、可靠性约束和时延约束的条件下,设计网络拓扑,使网络泛洪通信量尽可能小,并最大程度地保证报文传输的可靠性。对于 Link-16 数据链网络,其时隙的分配以及中继跳数都是在网络设计之初就确定,因此,本算法主要解决的问题是如何在网络拓扑变化及干扰条件下确定网络的 MPR 集,以实现以下目标函数:

$$\min(|MPR(v)|) \text{ s. t. } N^2(v) \subseteq N(MPR(v)) \quad (1)$$

$$\max \sum_{u \in V} \sum_{v \in V, v \neq u} d_w Rel(u, v; G) \quad (2)$$

$$\text{满足约束条件为} \\ \text{s. t. } T_i + \sum_{Eart(G, i) \in R_i} T_j \leq 100 \quad (3)$$

$$Rel(u, v; G) \geq r_w \quad (4)$$

$$Delay(u, v; G) \leq t_w \quad (5)$$

$$H(u, v; G) \leq h_w \quad (6)$$

目标是如何在保证网络连通性的条件下,最大程度地优化中继节点个数,并在此基础上最大程度地满足网络的传输可靠性。

- (1) 优先考虑 MPR 集节点个数的中继策略(RA-MPR-N) 初始时, $U(v) = N^2(v)$, $B(v) = N(v)$, $MPR(v) = \emptyset$ 。

Step 1 对节点 $i \in B(v)$, 计算 $S_i = N(i) \cap U(v)$;

Step 2 若存在节点 $w \in U(v)$, 在 $N(v)$ 中仅有 $v' \in N(w)$, 即 $N(w) \cap N(v) = \{v'\}$, 则将 v' 加入 $MPR(v)$;

Step 3 $MPR(v) = MPR(v) \cup v'$, $B(v) = B(v) - v'$, $U(v) = N^2(v) - N(v')$, 对节点 $i \in B(v)$, 重新计算 $S_i = N(i) \cap U(v)$;

Step 4 重复 Step 2、Step 3, 直到不存在 w ;

Step 5 在 $B(v)$ 中寻找 k , 使得 $|S_k| = \max\{|S_i| \mid i \in B(v)\}$, 当出现多个符合节点 k 时, 选择 $Rel(v, u; G')$ 较大的节点加入 $MPR(v)$;

Step 6 $MPR(v) = MPR(v) \cup k$, $B(v) = B(v) - k$, $U(v) = N^2(v) - N(k)$, 对节点 $i \in B(v)$, 重新计算 $S_i = N(i) \cap U(v)$;

Step 7 若 $U(v) = \emptyset$, 算法结束, 否则重复执行 Step 5、Step 6。

从以上流程可以看出, 算法首先选择必定属于 $MPR(v)$ 的邻节点, 缺少了这些节点, v 就无法保证最终覆盖其二跳邻节点集合。此后, 算法采用贪心原则依次挑选能够最多覆盖集合 K 内节点。随着算法的执行, 暴露节点逐渐减少, 直至为空集, 算法结束。可见初始暴露节点集的势越小, v 越可能更加合理且精简地选择下一跳转发节点。

此外, 将目标设定为在保证网络连通性的条件下, 最大程度地满足网络的传输可靠性, 并在此基础上最大程度地优化中继节点个数。算法如下所示。

(2) 优先考虑可靠性的中继策略 (RA-MPR-R)

初始时, $U(v) = N^2(v)$, $B(v) = N(v)$, $MPR(v) = \emptyset$ 。

Step 1 对节点 $i \in B(v)$, 计算 $S_i = N(i) \cap U(v)$;

Step 2 若存在节点 $w \in U(v)$, 在 $N(v)$ 中仅有 $v' \in N(w)$, 即 $N(w) \cap N(v) = \{v'\}$, 则将 v' 加入 $MPR(v)$;

Step 3 $MPR(v) = MPR(v) \cup v'$, $B(v) = B(v) - v'$, $U(v) = N^2(v) - N(v')$, 对节点 $i \in B(v)$, 重新计算 $S_i = N(i) \cap U(v)$;

Step 4 重复 Step 2、Step 3, 直到不存在 w ;

Step 5 在 $B(v)$ 中寻找 k , 选择 $Rel(v, u; G')$ 较大的节点加入 $MPR(v)$, 当出现多个符合节点 k 时, 选择 $|S_k| = \max\{|S_i| \mid i \in B(v)\}$;

Step 6 $MPR(v) = MPR(v) \cup k$, $B(v) = B(v) - k$, $U(v) = N^2(v) - N(k)$, 对节点 $i \in B(v)$, 重新计算 $S_i = N(i) \cap U(v)$;

Step 7 若 $U(v) = \emptyset$, 算法结束, 否则重复执行 Step 5、Step 6。

5 仿真结果分析

仿真试验采用 OPNET 工具实现, 比较在不用网络规模和传输半径的条件下 RA-MPR-N 和 RA-MPR-R 两种启发式算法的性能。在 $l \times l$ 的网格上随机生成 n 个节点, 每一个节点都落在网格坐标上。为这些节点定义一个覆盖半径 r , 在节点 v 的覆盖半径内的所有节点都将视为 v 的一跳邻居。对于每个随机生成的拓扑结构, RA-MPR-N 和 RA-MPR-R 都执行 100 次, 对其仿真结果进行统计以获取其平均值。主要的性能指标包括:

(1) 平均可靠性, 采用网络的平均报文交付概率来衡量, 即数据链网络中所有报文从源节点正确到达各目的节点且满

足时延约束条件的概率的平均值, 定义为 $R_i = P_r / (P_t \cdot (N_{nde} - 1))$, 其中, P_r 是用户实际接收到的非重复广播报文个数, P_t 是所有源节点产生的广播报文总数, N_{nde} 是节点总数。

(2) MPR 集的节点数百分比, 即 MPR 集的节点数占网络一跳邻居节点的百分比。

(3) 传输开销, 为传输一个用户报文, 平均每个节点的开销, 即所有节点发送的报文总数 (包括广播报文和广播协议的控制报文) 与所有源节点产生的广播报文总数的比, 定义为 $C_i = P_v / (P_t \cdot N_{nde})$, 其中, P_v 是协议运行过程中所有节点发送的报文总数。

下面讨论不同的网络规模和传输半径对算法性能的影响。

(1) 不同网络规模的影响

由于不同的网络场景的区域是相同的, 因此网络规模的增大意味着节点密集程度的增大。节点密集带来两种影响, 1) 节点之间的传输路径更短; 2) 无线信道上发生冲突和碰撞的概率更高。本节模拟了 3 个不同的网络规模来比较 RA-MPR-N 和 RA-MPR-R 的性能。试验中在 500×500 的网络分别随机生成的节点数 $n=20, 60, 100$, 取节点的传输半径为 $r=300$ 。

图 4 所示为不同中继广播策略的平均可靠性在不同网络规模下的比较。随着网络密集程度的增大, 对于双时隙泛洪中继策略, 由于其具有较高的广播冗余度, 因此网络密集程度的增大使得因信道碰撞而丢失的广播报文增多, 从而其平均可靠性下降; 对于 RA-MPR-N 策略, MPR 节点往往成为广播报文传输中的关键节点, 它是否能正确接收到广播报文对协议性能具有较大影响, 因而在网络拓扑变化较为频繁的情况下, RA-MPR-N 具有最低的平均可靠性; RA-MPR-R 通过改变规则弥补了 RA-MPR-N 在节点可靠度不高的情况下的不足, 因而其平均可靠性较 RA-MPR-N 高。

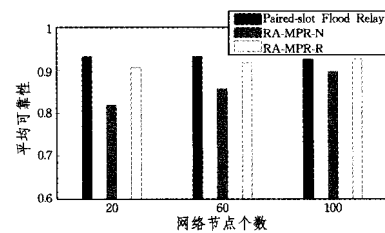


图 4 不同网络规模下的平均可靠性

图 5 所示为不同中继广播策略的 MPR 集节点数百分比在不同网络规模下的比较。对于双时隙泛洪策略, 无论网络规模如何改变, 某一节点的所有一跳节点都为其 MPR 集节点, 因此其 MPR 集节点数百分比始终为 100%; 而对于 RA-MPR-N 和 RA-MPR-R 两种策略, 由于随着网络规模增大, 其网络节点密集程度增大, 对于同一目的节点, 其可用的冗余传输路径增多; 对于任意一跳节点, 其包含的源节点的二跳节点个数增多。根据 RA-MPR-N 和 RA-MPR-R 策略的 MPR 集选择规则可知, 随着网络节点密集程度增大, 其 MPR 集节点数百分比将下降, 且 RA-MPR-R 策略相对于 RA-MPR-N 策略, 其 MPR 集节点数百分比下降趋势更快。

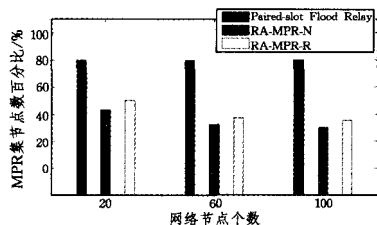


图5 不同网络规模下的MPR集的节点数百分比

图6所示为不同中继广播策略的传输开销在不同网络规模下的比较。相对于双时隙泛洪中继, RA-MPR-N和RA-MPR-R能得到较小的MPR集, 优化中继节点个数能大量减少冗余传输操作, 因而得到较低的传输开销。RA-MPR-N策略在中继节点选择规则中优先考虑MPR节点个数的优化, 能得到较小的网络连通支配集, 因此相对于RA-MPR-R具有更小的传输开销。RA-MPR-R中引入的机制使得更多的节点充当中继节点, 因而传输开销增大。由此看来, 当网络规模不是很大时, 网络节点数是RA-MPR-N和RA-MPR-R的性能的重要影响因子, 当网络规模大到一定程度时, 网络节点数对结果影响较小。

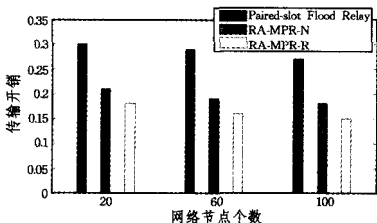


图6 不同网络规模下的传输开销

(2)不同传输半径的影响

在数据链网络中, 节点的传输半径是报文传输性能的重要因素, 本节讨论不同的传输半径对双时隙泛洪中继策略以及RA-MPR-N、RA-MPR-R策略的性能影响。试验中在500×500的网络分别随机生成20个节点, 取节点的传输半径 $r=300, 325, 350, 375, 400$ 。

图7所示为不同中继广播策略的平均可靠性在不同传输半径下的比较。随着传输半径的增大, 对于双时隙泛洪中继策略, 由于传输半径增大, 使得源节点的一跳节点个数增多, 因此其冗余传输操作增多, 从而其平均可靠性提高; 对于RA-MPR-N和RA-MPR-R策略, 由于传输半径增大, 使得源节点的一跳节点个数增多, 而二跳节点的个数减少, 需要中继转发操作而获得源节点报文的节点个数减少, 因此其平均可靠性得到提高。另外, 由于可选中继节点的增多, 且RA-MPR-R策略以优化节点可靠度为主要目标, 因此其平均可靠性的增大趋势较RA-MPR-N策略更大。

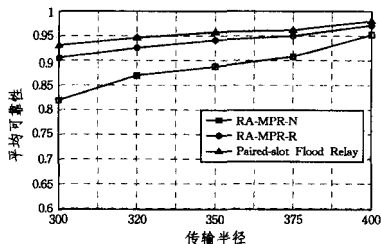


图7 不同传输半径下的平均可靠性

图8所示为不同中继广播策略的MPR集节点数百分比在不同传输半径下的比较。随着传输半径的增大, 双时隙泛

洪中继策略的MPR集节点数百分比始终为100%; 对于RA-MPR-N和RA-MPR-R策略, 由于传输半径增大, 使得源节点的一跳节点个数增多, 而二跳节点的个数减少, 因此需要中继转发操作而获得源节点报文的节点个数减少, 其MPR集节点数百分比将极大地减小。另外, 由于可选中继节点的增多, RA-MPR-N策略以优化MPR集节点数为主要目标, 因此其冗余传输操作将更少, 其传输开销始终较RA-MPR-R策略更小。

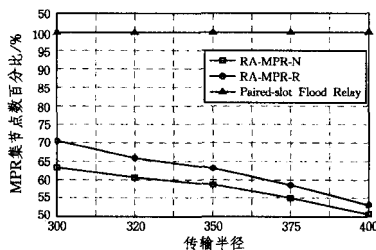


图8 不同传输半径下的MPR集节点数百分比

图9所示为不同中继广播策略的传输开销在不同传输半径下的比较。对于双时隙泛洪中继策略, 由于传输半径增大, 使得源节点的一跳节点个数增多, 因此其冗余传输操作增多, 从而传输开销增大; 对于RA-MPR-N和RA-MPR-R策略, 由于传输半径增大, 使得源节点的一跳节点个数增多, 而二跳节点的个数减少, 因此冗余传输操作减少, 其传输开销得到提高。另外由于可选中继节点的增多, 且RA-MPR-R策略以优化节点可靠度为主要目标, 因此其平均可靠性的增大趋势较RA-MPR-N策略更大。这体现了两种算法优先考虑的目标不同。

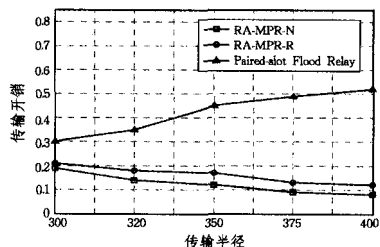


图9 不同传输半径下的传输开销

结束语 中继传输可以通过冗余传输提高信息传输的可靠性, 并且可以扩展通信视距, 因此在新型数据链中得到了广泛应用。数据链主要通过泛洪中继策略实现了战术信息的广播发送, 通过多路径机制抵御单条路径的失效, 保证数据传输的可靠性。虽然冗余发送可以提高传输的可靠性, 但是在网络节点密集的情况下, 过量的冗余发送将引起冲突和碰撞。如何在强干扰环境下对数据链网络中继广播协议进行优化, 保证在满足时延约束和传输可靠度约束条件下, 尽可能少地利用中继节点, 实现信息在全网的广播, 并使数据链网络传输可靠性达到最优, 是本文需要解决的问题。本文对数据链的泛洪中继策略进行改进, 根据节点是否具有中继功能、节点的主控关系、节点的可靠度以及节点间的邻接关系进行优选中继节点, 并将其构成具有中继功能的临时性的核心网络, 该网络随着拓扑结构的变化、电磁环境的变化、节点的毁伤以及主控关系的变化而动态变化。核心网络的建立借鉴了MPR思想, 并在此基础上提出了新的中继广播协议RA-MPR, 该协议既降低了泛洪开销, 又保证了报文传输的可靠性。

(下转第284页)

因此假设 TRNC 策略和 TRNNC 策略中瓶颈区域之外节点的数据传输模型和能量消耗模型是相同的,因而使用网络编码能够提高整个无线传感器网络的吞吐量,改善网络的能量利用率。

由图 5 和图 6 可得,通过对比 NTRNC 策略和 TRNC 策略瓶颈区域节点平均每秒消耗的能量随着节点负责将数据包发送给汇聚节点,事件 p 在瓶颈区域 $B1$ 转发数据包的比例 q 的变化情况,在都使用了网络编码的情况下,使用根据节点传输范围进行分层的 TRNC 策略的瓶颈区域内节点平均消耗的能量明显小于不分层的 NTRNC 策略,因此,合理减少节点的传输范围有助于节省瓶颈区域内节点的能耗。同理,我们假设 TRNC 策略和 NTRNC 策略中瓶颈区域之外节点的数据传输模型和能量消耗模型是相同的,因而合理地减少节点的传输范围有利于节省无线传感器网络的能量消耗,提高网络的能量利用率。

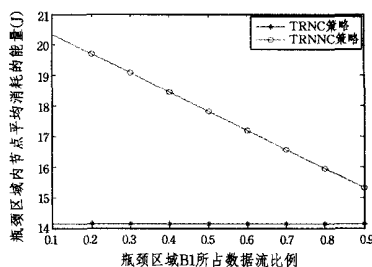


图 5 使用相同网络编码时平均能耗随 B1 所占数据流比例的变化

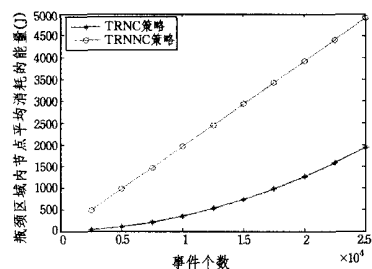


图 6 使用相同网络编码时平均能耗随事件个数的变化

结束语 本文通过分析无线传感器网络节点传输范围对能耗的影响,并结合网络编码技术,提出了在瓶颈区域中使用双层网络编码的 TRNC 策略。TRNC 策略不仅提高了网络的能量效率和可靠性,还改善了网络的吞吐量,降低了网络的传输延迟。理论分析和数值模拟显示,TRNC 策略节能效率比较高。

参考文献

[1] Wang Qing-hua, Zhang T. Bottleneck zone analysis in energy-constrained wireless sensor networks[J]. IEEE communications

letters, 2009, 13(6): 423-425

[2] Padmanabh K, Roy R. Bottleneck around Base Station in Wireless Sensor Network and its Solution[C]//Proc of Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services. San Jose: IEEE Press, 2006: 1-5

[3] 卢先领,王莹莹,王洪斌,等. 无线传感器网络能量均衡的非均匀分簇算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(5): 78-81

[4] Mihail L S, Rudra D. Benefits of Multiple Battery Levels for the Lifetime of Large Wireless Sensor Networks[C]//Proc of 4th International IFIP-TC6 Networking Conference. Berlin: Springer Verlag Press, 2005: 1440-1444

[5] Padmanabh K, Gupta P, Roy R. Transmission range management for lifetime maximization in wireless sensor network[C]//Proc of 2008 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems. Edinburgh: IEEE Press, 2008: 138-142

[6] Cheng Rei-heng, Huang Chi-ming. The impact of the transmission power range on energy consumption for wireless sensor networks[C]//Proc of Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Danang: IEEE Press, 2013: 77-81

[7] Ahlswede R, Cai Ning, Li S Y R, et al. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216

[8] Sachin K, Hariharan R, Hu Wen-jun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]//Proc of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2006: 243-254

[9] Hou I H, Tsai Yu-en, Abdelzaher T F, et al. Adapcode: adaptive network coding for code updates in wireless sensor networks[C]//Proc of The 27th Conference on Computer Communications. Phoenix: IEEE Press, 2008: 13-18

[10] Lorenzo K, Emre A, Katerina A, et al. Sensecode: network coding for reliable sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, 9(2): 1-13

[11] Rout R R, Ghosh S K. Enhancement of Lifetime using Duty Cycle and Network Coding in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 656-667

[12] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks [C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Phoenix: IEEE Press, 2000: 4-7

[13] Hill J L, Culler D E. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks[J]. IEEE MICRO, 2002, 22(6): 12-24

(上接第 257 页)

参考文献

[1] Yanni P. Modeling Comm Planning and Advanced Datalinks in the DIS Environment [C]//Simulation Interoperability Workshops, 1997

[2] Air Land Sea Application Center. Introduction to Tactical Digital Information Link J and Quick Reference Guide[R], 2000

[3] Ni S, Tseng Y, Chen Y, et al. The Broadcast Storm Problem in a

Mobile Ad Hoc Network[C]//ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 1999: 151-162

[4] JTIDS/MIDS. Spectrum users guide (Version 1.1)[R]. United States of America Department of Defense, 2000

[5] Jacquet P, Muhlethaler P, Clausen T, et al. Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks[C]//IEEE International Multi Topic Conference, 2001. 2001: 62-68

[6] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol(OLSR)[M]. IETF RFC3626, 2003