第37卷 第14期 计 算 机 工 程 2011年7月
Vol.37 No.14 Computer Engineering July 2011

·网络与通信· 文章编号：1000—3428(2011)14—0079—03 文献标识码：A 中图分类号：TP393.03

空基自组网中基于负载均衡的路由策略

欧海斌，尹 艳，熊建新

(湖南文理学院计算机科学与技术学院，湖南 常德 415000)

摘 要：针对空基网中节点负载失衡以及吞吐量低下的问题，提出基于负载均衡的优化路由协议。该协议在获得位置信息的前提下，预测出通信链路的有效时间，在满足数据的时延、带宽以及链路有效性等多约束条件下，以均衡节点负载为优化目标，使得网络节点都能合理承担数据传输任务。仿真结果表明，该路由协议能够保证网络节点合理分担传输任务，充分利用链路资源，从而提高网络的吞吐量。

关键词：空基自组网；负载均衡；数据传输；吞吐量；路由协议

Routing Strategy Based on Load Balancing in Airborne Ad Hoc Network

OU Hai-bin, YIN Yan, XIONG Jian-xin

(School of Computer Science and Technology, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

【Abstract】Aiming at the problems of load imbalancing and lower throughout, this paper proposes an optimal routing strategy based on load balancing in airborne Ad Hoc network. The communication link available time is forecasted based on location information. Then the designed routing protocol need satisfy the following multi-constraints: link availability, delay and bandwidth. It considers the node load equilibrium as the optimal object in order that all the communication links assign proper packets to transmit. Simulation results show that the nodes have proper transmission loads that promote the whole network throughputs.

【Key words】airborne Ad Hoc network; load balancing; data transmission; throughput; routing protocol

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.025

1 概述

空基自组网[1]源自于Ad Hoc自组网，但又有区别：空基自组网具有视距传输特性，节点间组网灵活、快捷，自适应能力强，节点分布稀疏且相互距离较远。空基自组网主要用于完成空基平台的飞行器与地面站之间的数据传输任务。如民用飞机之间相互组网，再利用通信塔及地面站即可为乘客提供飞行途中的互联网接入服务等。但是由于受到自然环境因素的影响，该网络面临着数据传输时延过高、通信干扰大以及网络节点负载失衡等现象，因此本文对空基网中确保负载均衡的路由问题进行研究，设计出能够适应高移动环境下的空基自组网路由算法。

2 相关工作

目前，对于无线移动自组织网络的路由问题，已经有众多学者做了大量的研究工作，提出了一系列有代表性的方法，如自适应实时路由协议[2]、DSR路由协议[3]、最长路径持续时间算法[4]等。但是由于网络节点的移动性、链路的不稳定性、无线传输的不可靠性，以上的一些路由协议都不能很好地解决负载失衡问题，在数据传输的过程中经常出现严重的丢包现象。

鉴于此，本文在前人研究的基础上，结合空基自组网自身的特点，采用跨层设计的思想，利用MAC访问协议获得网络节点的位置信息，然后根据节点的移动状态参数，预测网络节点间的链路质量及稳定性，同时根据网络节点负荷状态，设计节点负载权值参量。通过最优化设计，在多条路径中选择一条恰当的路径，保证网络中各节点具有合理的链路负荷，避免出现某个节点大量数据的排队等待，从而实现整个网络的吞吐量最大化。

3 网络模型

在本文模型中，MAC协议采用TDMA的有向天线数据传输模式，在各节点的通信链路范围内采用半双工模式，每对通信链路在分配到的时隙内既可以发送数据包，也可以接收数据包。因此，用无向图的图论模型$G(V,E)$来表示空基自组网，其中，$V=\{v_1,v_2,\mathrm{L}\ ,v_n\}$是网络中节点的集合，可以代表地面站、飞行器或是其他中继设备；$E=\{e_1,e_2,\mathrm{L}\ ,e_n\}$是各节点间链路的集合，在实际链路中，根据发射功率以及有向天线等参数，各节点之间的链路可能位于通信链路范围内，也可能在通信链路范围之外。

3.1 链路有效性

链路有效性是预测2个通信节点在一定时间内仍然是有效连接时间的概率模型，它是基于通信节点的位置信息以及移动状态参量来预测的。网络中的每个节点都有自己的位置坐标信息，主要是GPS以及北斗卫星等定位技术获取的坐标信息；或者是自定义的坐标信息。

为便于分析，用二维平面坐标系来分析，由此可以扩展到三维坐标系。假设两节点A、B的初始坐标为$(0, 0)$、$(d_0, 0)$，其中，$d_0<R_C$，R_C为通信链路中的两节点使用定向天线时的有效传输距离。经过时间t后，节点A、B分别位于(x_1, y_1)、(x_2, y_2)，服从二项分布。

链路有效性是在t_0时有效的链路，经过t时间后，在$t+t_0$时仍然有效的概率，为此可以表示为：

作者简介：欧海斌(1982－)，男，硕士，主研方向：移动自组网；尹 艳、熊建新，硕士

收稿日期：2011-01-17 **E-mail：**yinyan4100423@163.com

$$A_{\text{link}}(t;d_0)=pr(x^2+y_2\leqslant R_C,T;D_0)=\sum_{X=-R_C}^{R_C}\sum_{x^2+y^2\leqslant R_C^2}f(x,y,t;d_0)=\frac{1}{4^{2t}}\sum_{X=-R_C}^{R_C}\sum_{x^2+y^2\leqslant R_C^2}\sum_{x_1=-t}^{t}\sum_{|x_1|+|y_1|\leqslant t}C_t^{\frac{t-x_1+y_1}{2}}C_t^{\frac{t-x_1-y_1}{2}}\cdot C_t^{\frac{t-(x_1+x-d_0)+(y+y_1)}{2}}C_t^{\frac{t-(x_1+x-d_0)-(y+y_1)}{2}} \tag{1}$$

根据相关文献分析[5]，经过 t 时间后，当两节点间的通信链路相对距离小于 $0.9R_C$ 时，链路的有效性几乎等于 1；当通信链路相对距离接近于 R_C 时，链路的有效性将变得非常低。该结论可以推广到三维坐标系，为此，有结论：空间坐标中的网络节点间的任意有效通信链路，如果经过 t 时间后，链路中两节点间的相对距离仍然小于 $0.9R_C$，则该链路仍然有效。

3.2 节点负载

为了合理调度使用链路资源，在保证 QoS 的前提下，合理选择传输路径，使得网络资源得到合理使用，设计的路由协议应该考虑网络节点的负荷，保证各节点均有传输任务，而又不发生排队拥塞的情况。为此，在 TDMA 模式的自组网中，用时隙未使用率来定义网络节点的负荷。

定义 在一个 $G_C(V, E)$网络中，对于 $v_i\in V$，从当前时隙到所有确定已分配时隙之间的总时隙数为 N_B，在这些时隙中未使用的时隙数为 N_I，则该网络节点的时隙未使用率 $P_{\text{idle}}(v,t)=N_I/N_B$，节点负载为 $1-N_I/N_B$。

3.3 路由优化模型

本文路由算法的优化目标是在满足传输数据的不同 QoS 要求的前提下，尽可能大地利用各节点资源，使得每个节点能均衡承担一部分传输任务，而又不使部分节点的负载过重，从而使得整个网络的吞吐量达到最优。为此，建立多约束集合下数学模型：

(1)路径有效时间

路径有效时间是一条路径 P 中所有的链路节点都能够在彼此的通信链路范围内的持续时间，也就是路径中的首尾相连的通信链路节点经过时间 t 后，相对距离仍然小于 $0.9R_C$。它是凹性度量参数，由路径中最小的链路的持续时间决定，可以表示为：

$$T_{\text{valid}}(P,t)=\min_{e\in P}(LT_{\text{valid}}(e,t)) \tag{2}$$

(2)路径节点空闲率

路径节点空闲率是路径中的所有节点时隙未使用的情况，根据节点负载的定义，路径节点空闲率可以表示为：

$$P_{\text{idle}}(P,t)=\prod_{v\in P}P_{\text{idle}}(v,t)=\prod_{v\in P}\left(1-\frac{N_I(v,t)}{\max(N_B(v,t))}\right) \tag{3}$$

其中，v 为路径 P 的中间节点。显然，如果所选路径 P 中的空闲节点较多，则整个路径空闲率较大，说明此条路径的排队等候的时间较短；相反则说明该路径相对之下有较长的等候时间。

(3)带宽

路径带宽是凹性度量参数，由路径中某条最小的通信链路带宽决定，则有：

$$B(P,t)=\min_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{n}\{B(e_{ij},t)x_{ij}\} \tag{4}$$

(4)时延

路径时延包括链路时延以及链路中节点的处理时延，可以表示为：

$$Delay(P,t)=\sum_{e\in P}Delay(e,t)+\sum_{v\in P}Delay(v,t) \tag{5}$$

综上所述，可得最优路径 P 需要满足的多个约束条件有：(1) $T_{\text{valid}}(P,t)\leqslant M_1$；(2) $P_{\text{idle}}(P,t)\geqslant M_2$；(3) $B(P,t)\leqslant M_3$；(4) $Delay(P,t)\leqslant M_4$。其中，条件(1)是路径有效时间约束；条件(2)是路径中的节点忙闲约束，目的是尽可能地降低某些核心链路节点的负荷，优化路径分布，使得网络中的空闲链路能够分担部分约束条件要求不高的数据传输任务，降低高负荷链路的瓶颈限制，从而使整体网络的吞吐量达到最优；条件(3)是路径带宽约束；条件(4)是路径时延约束。M_1、M_2、M_3 和 M_4 的值根据不同应用环境中数据传输的不同 QoS 要求进行设置，限于篇幅不再详述。

4 多约束最优路由策略

根据以上的路由优化模型，本文提出了基于负载均衡的链路容量最优路由策略(Optimal Router Strategy of Link Capacity based on load balancing, ORSLC)。

Step1 开始时，源节点首先查找是否有目标节点的位置信息(TL)，如果 TL 值不存在，则采用泛洪路由的方式，向本子网边缘节点的有限区域发起路由请求。如果某个边缘节点保存有 TL 值，则向该有限区域发起路由请求，同时向本网络的源节点响应应答报文；否则向邻网络发起路由请求。

Step2 当网络中的节点收到路由请求时，判断目标节点是否本节点。如果不是，则转 Step3；如果是，则转 Step4。

Step3 当网络节点判断本节点不是目标节点时，检查路由请求报文中的路径和目标节点，根据本节点已有信息(如 $P_{\text{idle}}(v,t)$、$Delay(p,t)$等)，判断路径是否合理，如检查到路径中的某些节点信息过时，造成某条通信链路已经不可靠(断裂)，则向源节点返回一条路径错误报文，并及时更新路径中某些节点的错误信息。如果路径合理，则计算出上一节点与本节点的 $T_{\text{valid}}(p,t)$，并更新到路由请求报文中，同时添加上本节点的负荷信息和位置、状态信息，然后把该路由请求报文转发到路径中的下一节点。本节点同时保存并更新该路径中所有节点的状态信息。

Step4 当网络节点判断本节点是目标节点时，先根据前一节点的信息计算出 $T_{\text{valid}}(p,t)$值；然后根据源节点与本节点及本条路由请求报文相关信息，找出源节点到本节点的可能路径，根据约束条件(1)~条件(4)，依次预判出几条最佳的路径；然后等待其他路由请求报文，并同时更新最佳的可选路径。在设定的等待时间到以后，目标节点根据约束条件判定可选的路径，最后以链路中节点负荷来判定最优路径，同时预留一条备用路径，以保证在路径中断的情况下能够迅速建立新的路径。在选定路径后，目标节点根据传输数据的容量及相关路径节点的信息来预约反向路径中的节点的相应时隙。路由响应报文更新完相关信息后，向所选路径的反向路径节点发出路由响应报文。

Step5 该路径中的相关节点在接到响应报文后，更新参数信息并完成相应的时隙预约后，依次转发响应报文。源节点在收到路由响应报文后，就完成了路由请求的相关程序，进入传输数据程序。

5 性能分析与仿真实验

5.1 性能分析

结论 1 基于负载均衡的链路容量最优路由协议(ORSLC)所建立的路径在网内不存在回路。

证明：根据本算法的路由策略可知，源节点在寻找 A 条可选路径时，是基于各节点在网络中的位置信息确定的，在

同一条路径中，使用同一条路径编号，必定不会找到 2 次经过同一个坐标位置的网络节点。命题得证。

结论 2 基于位置信息的链路容量最优路由协议(ORSLC)的计算复杂度为 $O(4An)$，其中，A 为可选路径的数量；n 为网络的节点数。

证明：对于网络节点数为 n 的网络，则 2 个不同节点间的路径最大长度为 n，根据约束条件的数量，计算可选路径权值向量的运算次数不超过 $4n$ 次。对于 A 条可选路径，总的计算量不超过 $4An$ 次，所以基于负载均衡的链路容量最优路由协议的计算复杂度为 $O(4An)$。命题得证。

5.2　仿真实验

为了评价本文提出的 ORSLC 路由协议的性能，采用仿真软件 OPNET 进行性能仿真，仿真中与经典的自组网协议 AODV 做了对比分析。模拟环境设置为：移动节点数为 20 个，其中，5 个节点位置固定，作为地面站；拓扑区域为 20 km×20 km；数据包大小为 2 KB；信道带宽为 11 Mb/s；仿真时间为 600 s。

(1)各节点平均利用率

各节点平均利用率定义为网络节点在一段时间内使用时隙与总时隙的比值。显然比值越大，说明节点的利用率越高；如果某个节点的利用率一直处于高位，则说明该节点有可能处于过载状态，存在数据排队等待的现象。图 1 是节点平均利用率的仿真结果。

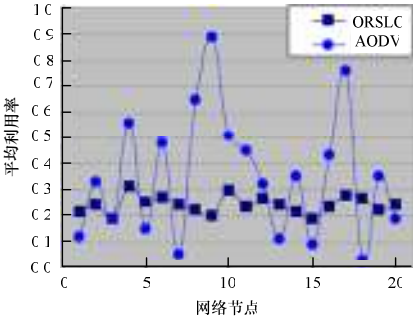


图 1　节点平均利用率

从图 1 可以看出，ORSLC 路由协议的链路平均利用率要均匀一些，网络中的各节点均能够分担一些数据传输任务，从而使得各节点负荷较轻，不会出现拥塞的情况。而 AODV 路由协议却出现了节点负荷分布不均的现象，使得某些节点的传输任务过重，有可能出现排队等候的现象。

(2)归一化路由开销

归一化路由开销是指用于路由控制的数据包与总接收到的数据包的比值，仿真结果如图 2 所示。

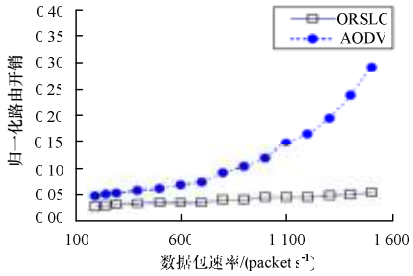


图 2　归一化路由开销

图 2 给出了在不同速率下的网络路由开销性能。可以看出，在 AODV 路由协议中，当数据包速率较小的时候，网路总体负荷不是很重；随着传输数据的增加，网络中某些节点的负荷开始加重，造成某些路径中断概率加大，从而使得路由开销不断增加。而 ORSLC 路由协议合理分配了各节点的传输任务，没有造成路径中拥塞现象的出现，从而减少了路由开销。

(3)端到端传输时延

图 3 给出了数据传输时延的仿真结果。

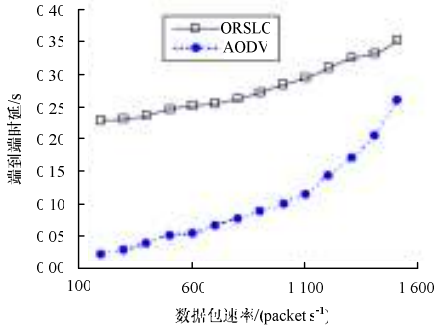


图 3　端到端传输时延

从图 3 中可以看出，AODV 路由协议的传输时延明显好一点，但是随着传输数据包的增加，网络的负荷开始增加，使得数据的传输时延明显加大。而 ORSLC 路由协议的传输时延相对要差一点，但是在满足传输数据的 QoS 要求的前提下，能够充分利用网络节点的传输能力，提高链路的总体利用率，能够保证其他有特殊要求的节点传输数据，而且还提高了网络的容量。

6　结束语

本文根据空基自组网的组网特点，在已知网络节点位置信息的情况下，通过预测链路有效时间，以通信链路容量最优为目标，用通信链路负载均衡来衡量网络的整体性能。仿真结果表明，提出的 ORSLC 路由策略能够均衡通信网络节点的负载，从而使得网络的整体吞吐量达到最优。

未来的工作包括以下 2 个方面：(1)对空基自组网中通信干扰进行分析，研究可靠性与安全性高的传输协议；(2)对本文提出的多种约束条件做进一步优化处理，以提高路由策略的效果和效率。

参考文献

[1] Guo Zhonghai, Chen Yongguang. A Token Cycle Scheduling of MAC Protocols for TDMA Based Airborne Ad Hoc Network[C]// Proc. of IEEE IC-BNMT'09. Beijing, China: [s. n.], 2009: 28-32.

[2] 陈　迅，唐红雨. 无线传感器网络自适应实时路由协议[J]. 计算机工程, 2008, 34(16): 25-27.

[3] Johnson D, Hu Y, Maltz D. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4[S]. RFC 4728, 2007.

[4] 肖百龙，郭　伟，刘　军，等. 移动自组织网络基于链路稳定性的伪流言路由算法[J]. 通信学报, 2008, 29(6): 26-33.

[5] Lim G, Shin K, Kim J S, et al. Signal Strength-based Link Stability Estimation in Ad Hoc Wireless Networks[J]. Electronics Letters, 2003, 39(5): 485-486.

编辑　任吉慧