移动 Ad Hoc 网络中的自适应转发分群路由协议

王 力 刘 凯 刘 亭

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了提高移动 Ad Hoc 网络的可扩展性,降低在大规模移动 Ad Hoc 网络中路由开销的增长速度,提出了一种自适应转发分群路由(AFCR,Adaptive Forwarding Cluster Routing)协议. 它采用基于最小节点标识号(ID)的移动分群算法将所有节点分为若干个一跳分群. 通过设置分群计时器,仅使用两轮控制消息就能快速部署网络的分群结构,并且可使分群同时在全网多处展开. 邻节点之间通过交换局部路由信息来建立相邻群首间的路由,而不相邻群首间的路由则利用相邻群首间的路由来建立. 基于所建立的分群网络结构和局部路由信息,该协议能够完成数据分组的自适应转发. 仿真结果表明,与 DSDV(Destination-Sequenced Distance-Vector)和 RRR-DSDV(Rapid Route Recons truction DSDV)协议相比,AFCR 协议在大规模、重业务量的情况下有效地降低了路由开销、改善了网络的传输性能.

关 键 词: 移动 Ad Hoc 网络; 路由; 可扩展性; 分群

中图分类号: TN 915.04

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)08-0990-06

Adaptive forwarding cluster routing protocol for mobile ad hoc network

Wang Li Liu Kai Liu Ting

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel routing protocol, namely adaptive forwarding cluster routing (AFCR) protocol, was proposed to improve the network scalability of a large scale mobile ad hoc network (MANET). In the AFCR protocol, nodes were divided into several 1-hop clusters by mobile clustering algorithm based on the lowest ID. With the help of clustering timer, it could quickly form cluster architecture after two rounds of control message exchange, and could form clusters simultaneously at different points in the network. Local routing information was exchanged between neighboring nodes to establish routes between cluster-heads in adjacent clusters, which were further used to propagate routing information to nonadjacent clusters to set up routes between them. Based on cluster architecture and local routing information, the proposed protocol can adaptively forward data packets between nodes. Simulation results show that compared with the destination-sequenced distance-vector (DSDV) and rapid route reconstruction DSDV (RRR-DSDV) protocols, the proposed protocol can improve network performance in the present of a large number of mobile nodes and heavy traffic load.

Key words: mobile ad hoc network; routing; scalability; clustering

移动 Ad Hoc 网络(MANET, Mobile Ad Hoc Network)是由一组带有无线收发装置的移动节点组成的无线移动通信网络,它不依赖于预设的基础设施而临时组建. 近几年,已经提出了许多与之相关的路由协议,这些协议可以分为两大类:平面结构路由协议和分层结构路由协议.

收稿日期: 2008-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60532030,10577005);国家杰出青年科学基金资助项目(60625102);北京航空航天大学"蓝天新星"计划资助项目(221235)

作者简介: 王 力(1985—),男,山西临汾人,硕士生,wangli040@163.com.

平面结构路由协议的主要优点是网络中没有特殊节点,网络流量均匀地分散在网络中.按照路由建立的方式不同,可分为先应式、按需式两类[1]:典型的先应式路由协议有目的节点序列号距离矢量(DSDV, Destination-Sequenced Distance-Vector)协议[2]、最优链路状态路由(OLSR, Optimized Link State Routing)协议[3]等;典型的按需路由协议有自组网按需距离矢量路由(AODV, Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing)协议[4]、动态源路由(DSR, Dynamic Source Routing)协议[5]等.

不过,随着网络规模的扩大,在平面结构路由协议中,网络拓扑变化会使节点为维护动态变化的路由信息而消耗更多的网络资源,导致网络的吞吐量急剧下降,端到端延时显著增大,路由开销大幅增加.分群结构路由基于其特有的分群结构能够提供更加有效的方法解决上述问题.分群路由的基本思想是将网络中节点分成不同的群,每个群至少有一个群首(负责该群所有节点路由的管理和控制),群与群之间通过网关节点进行通信.其中,网关节点是指属于一个群,而与其他群有直通链路的节点.群首与网关节点共同构成了高一层次的虚拟骨干网,路由信息的形成和传播就会被限制在有限的节点内[6],因此分群路由能够保证在大量移动节点存在的条件下仍能维持良好的网络性能[7-8].在目前的分群路由协议中,较经典的协议有群首网关交换路由(CGSR, Clusterhead Gateway Switch Routing)协议[9]、基于群的路由协议(CBRP, Cluster Based Routing Protocol)[10]等.

为了提高路由协议的可扩展性、使协议在网络中存在大量节点的情况下仍能维持良好的性能,本文提出了一种自适应转发分群路由(AFCR, Adaptive Forwarding Cluster Routing)协议.

1　AFCR 协议

1.1　基本假设

网络中每个节点都有唯一的节点标识号(ID),节点定义为可以提供可靠无线逻辑链路的移动用户,它包括一部半双工方式工作的无线电台、数据控制器和面向用户应用的终端设备(如笔记本电脑、通话设备等),能完成无线信号的编译码和收发、共享无线信道的访问控制等工作.

每个节点都有相同的通信范围,节点间的通信链路是双向的,即如果节点 i 能收到节点 j 的分组发送,则节点 j 也能收到节点 i 的分组发送.

1.2　分群形成

在 AFCR 协议中,所有节点被划分为一跳分群(即群首与群成员之间相距一跳,能直接通信),每个群有唯一的群首和群首 ID. AFCR 协议的分群结构如图 1 所示.

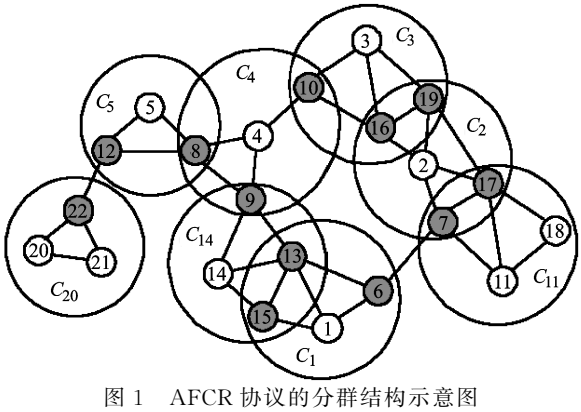

图 1　AFCR 协议的分群结构示意图

AFCR 协议采用基于最小节点 ID 的移动分群算法进行分群,其分群过程如下.

全网节点先以任意次序发送一轮控制分组初始化网络,每个节点形成邻居节点表后设置分群计时器,并执行如下算法.

1) 若本节点的 ID 在其邻节点中最小,则宣布成立新群,群号即为其 ID,然后取消计时器计时;否则保持监听至计时终止.

2) 如果节点接收到邻居节点广播的成立新群的消息则加入该群,同时将此加入消息广播给自己的邻居节点并取消计时器计时;否则保持监听直到计时器终止.

3) 在 2)中,倘若发现邻节点中比自己的 ID 小的节点都已经宣布加入其他群中,而自己又未被包括在这些群中,则宣布成立新群,同时取消分群计时器计时;否则保持监听直到计时器终止.

4) 如果节点的分群计时器计时终止,为了确定是加入一个群还是成立一个新群,此节点重置分群计时器,并向未有任何控制消息发送且节点 ID 比自己小的节点发送群状态询问包,规定收到此包的节点必须做出回应.如果它收到了上述节点的回应包,则继续执行 1)~3)中适合本节点情况的步骤.

5) 在步骤 4)中,如果节点在计时器计时终止前仍无法确定是加入一个群还是成立一个新群,则重新执行步骤 4).如果计时器再次终止,则宣布成立新群并将此消息广播给它的邻居节点.

按照上述过程,仅用两轮控制消息就能快速部署网络的分群结构.步骤 4)、5)保证了对未收

到控制消息的节点再进行确认，消除了由于分组碰撞或信道差错而造成的控制消息丢失的影响. 在此算法中，只要节点已经属于一个群(不论是是群首还是群成员)，就可以发送第二轮控制消息，这样分群可以同时在全网多处展开. 分群结束之后，每个节点形成并保存一个群成员表.

1.3 路由建立

在分群路由协议中，为了减少节点所存储的路由表的大小，无需建立到所有节点的路由，只建立到每一个群首的路由即可.

DSDV 协议是基于分布式 Bellman-Ford 算法并引进序列号机制以避免路由环路的先应式路由协议. AFCR 协议以 DSDV 协议为基础建立到群首节点的最短无环路路由.

为了避免群首变化的影响，增强整个网络的鲁棒性以及能够自适应地转发数据分组，AFCR 协议采用了分布式控制方式来保存路由信息，即每个节点根据接收到的路由信息建立到所有群首的路由. 随着网络规模和业务量的增加，为了降低路由开销的增长速率，AFCR 协议采用的路由建立算法如下.

1.3.1 相邻群间的路由

如前所述，在 AFCR 协议中，所有节点被划分为一跳分群，则网络中的每个节点或者是群首，或者能够直接与所属群群首通信，所以相邻的两个群首之间的路由最多为三跳(例如图 1 中的 C20-C5)，因此每个节点只需广播到群首两跳范围内的路由来建立相邻群群首之间的路由，这样，网络中的所有节点都会保存到相邻群首的路由. 这样的跳数限制和仅到群首的路由信息限制将有效的减小转发路由分组的大小和数量，从而能有效地控制网络路由开销的增长速度.

1.3.2 不相邻群间的路由

利用已建立好的相邻群之间的路由来建立不相邻群之间的路由. 由 1.3.1 可知，每个群首都已保存到达相邻群首的路由信息，这些信息将通过已建立好的相邻群首之间的路由向其他群首转发. 由于在 1.3.1 中，已限定节点只转发两跳以内的群首路由信息，所以在此部分需设定由群首首先向群成员转发不相邻群首的路由信息. 为减少在转发不相邻群路由信息的过程中所涉及到的节点，群首将指定一个到相邻群首的下一跳节点转发这些信息给相邻群的群首或到相邻群群首的下一跳节点.

综上所述，AFCR 协议通过以下两步建立路由：首先，相邻群的群首间路由通过交换相邻节点间的局部路由信息建立；然后，利用这些“骨干路由”建立不相邻群之间的路由. 这种路由建立方法将避免发送冗余信息，减小路由包的大小及在此过程中所涉及到的节点数目. 这些都将明显降低在大规模和重业务条件下的网络开销. 群间路由建立完成之后，将会形成一个群首路由表.

1.4 分群和路由维护

在 MANET 中，节点的移动或失效等情况造成通信链路的断接和网络拓扑的变化，这在分群后表现为节点经常加入或离开群或群首更替，影响分群结构乃至网络通信的稳定，这将引入了较大的通信和计算开销，进而严重影响其他网络性能，如端到端吞吐量、时延、分组丢弃率和各类资源管理利用等. 因此，对于分群路由协议，分群和路由维护工作分为分群保持和路由保持.

1.4.1 分群保持

分群保持主要由群首完成，其主要内容有以下两点.

1) 群成员的管理. 群成员管理的主要目的是确保群首和群成员关系得到及时更新，对节点的加入和退出进行管理. 节点的加入采取的是采取主动方式，即新节点广播一个加入群的信息，群首将其作为新的群成员加入自己群成员表中，同时更新自己的序列号并广播该信息. 节点退出采取了主动和被动两种方式. 群首如果发现与自己的群成员之间的链路失效，则将该群成员从自己群成员表中删除，并广播寻找该群成员的路由信息. 群成员如果发现与自己的群首之间的链路失效，则自动解除与群首的关系，并重新分群(加入一个新群或者成立一个新群)，同时将该消息通告给自己的邻居节点.

2) 群的消亡和合并. 群的消亡和合并即决定群首地位的放弃与否. 由于 AFCR 协议中规定两个群首不能直接通信，为了保持群首的稳定性和以较少的分群数覆盖所有节点，只有以下两种情况才修改群首：一是当一个群首进入另一个群首通信范围，需要进行群的合并，此时决定哪个群首放弃群首地位的依据首先是群成员数目的大小，其次是节点的 ID 大小；二是当一个节点与所有的群都失去联系时，需要生成新的群.

1.4.2 路由保持

当通过链路层检测检测到网络拓扑变化时，协议采用快速路由重建 DSDV(RRR-DSDV，Rapid Route Reconstruction DSDV)协议[11]的路由重建机制来维护到群首的路由，即当链路中断导致路由失效时，它通过局部范围内的信息交换

在检测出链路中断的节点的一跳范围内进行失效路由的信息发布和重建;当一跳范围内的路由重建不成功时,它按需逐步扩大失效路由信息发布和重建的范围,快速重用已有路由信息来修复失效的路由.

1.5　数据分组的自适应转发

AFCR 协议基于局部路由信息和分群网络结构完成数据分组的自适应转发.其数据分组的自适应转发流程图如图 2 所示.

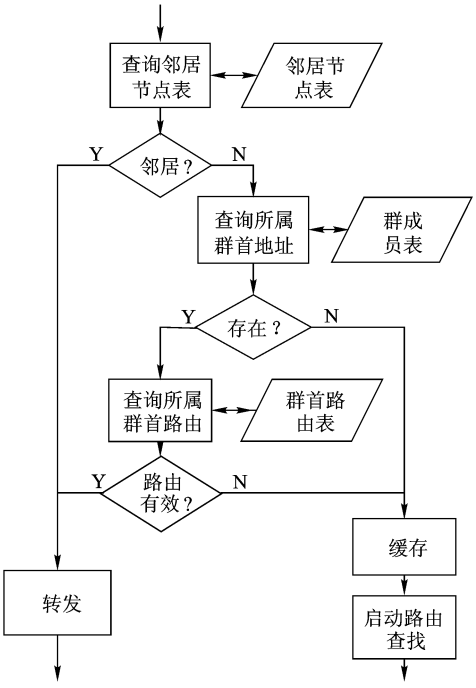

图 2　AFCR 协议数据分组自适应转发流程图

每个节点都保存有一张邻居节点表,一张保存了群成员关系的群成员表,一张保存了到所有群首路由的群首路由表.当节点需要发送或者转发数据分组时,则首先参考邻居节点表,如果分组的目的节点是此节点的邻居则直接发送;否则查询群成员表中分组目的节点所属的群首节点,然后在群首路由表中查询其路由信息,如果该路由项有效则发送分组给路由项中的下一跳节点,如果不存在则缓存在该路由项的队列中,等存在有效的路由时在发送分组.

根据上述的数据分组转发过程可得,AFCR 协议实现了逐步的,越靠近目的节点路由信息越准确,最后可能不必经过某些群首节点就可自适应地转发到目的节点的目的.同时,一跳邻居节点之间不必考虑群成员关系而直接通信,这些都将明显的减少由群首带来的路由开销.

2　仿真评估

2.1　仿真环境及模型

本文使用的仿真软件是 NS2[12],版本为 2.29.仿真网络有 N 个移动节点,节点媒质接入控制(MAC,Medium Access Control)层协议采用 IEEE802.11,天线类型为全向天线,无线传输半径为 250 m,移动区域为 1 000 m×1 000 m 的矩形平面区域,初始时节点随机分布于该区域内.每次仿真时间为 300 s.

节点采用 random waypoint 移动模型,在此模型下,节点先在初始位置停留时间为 pause-time 秒,然后在区域内随机选择一目标点,以 0 和最大速度 speed 之间随机分布的一个速度向此目标点匀速移动.到达目标点后,节点再次停留时间 pause-time 秒,再随机选择一目标点进行移动.节点反复进行这样的"停留/移动"过程,直至仿真结束.给定节点的最大移动速度 speed 为 3 m/s,停留时间 pause-time 为 0 s,即网络中的节点移动是连续的.

节点传输业务采用的是 CBR(Constant Bit Rate)流,CBR 分组的长度为 512 Byte.网络中共有 N_{source} 个源节点发送数据,每个节点的分组产生速率为每秒 1 个包.源节点和目的节点均从网络所有节点中随机选出,CBR 流起始发送时间的取值随机分布于 0～5 s 之间.

本文将 AFCR 协议与 DSDV 和 RRR-DSDV 协议进行仿真比较,具体结果如下.

2.2　不同网络规模下的仿真比较

图 3～图 5 分别表示了 3 种协议在不同网络规模下分组投递率(即仿真过程中目的节点接收到的数据分组总数与源节点发送的数据分组总数之比)、平均端到端时延和归一化路由开销(即单位时间每个节点平均发送的路由分组数目)的仿真结果.网络中的源节点数 N_{source} 为 20.

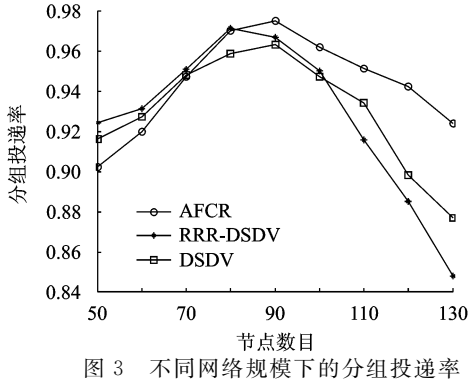

图 3　不同网络规模下的分组投递率

如图 3 所示,随着网络规模的扩大(即当节点数目大于 100 时),AFCR 协议比其他两个协议有更高的分组投递率,且下降速度也小于其他两个

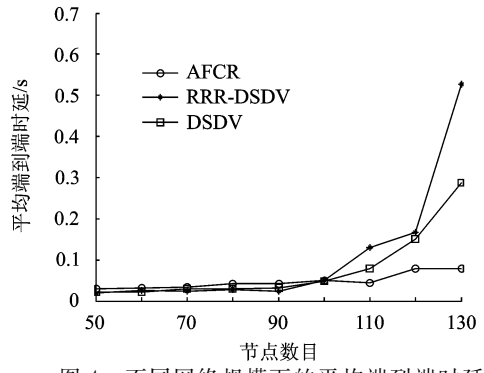

图4 不同网络规模下的平均端到端时延

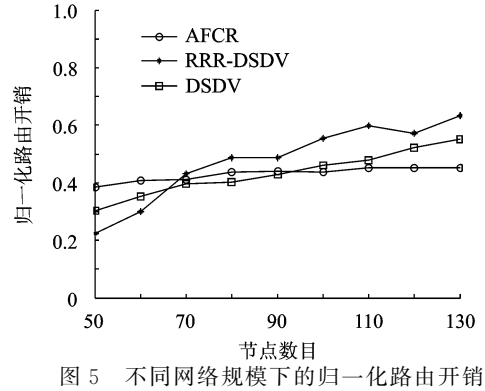

图5 不同网络规模下的归一化路由开销

协议. 如图4所示,当网络中节点的数目增大到一定程度(即大于110)时,AFCR协议的平均端到端时延的增速明显小于其他两个协议. 如图5所示,当网络规模增大到一定程度(即100个节点以上)时,AFCR协议在归一化路由开销方面表现得更稳定.

综上所述不难得出,与其他两个协议相比,AFCR协议更好地控制了大规模MANET中路由开销的增长速度,改善了网络的传输性能. 这是因为DSDV协议与RRR-DSDV协议属于平面结构路由协议,每个节点需要知道到达其他所有节点的路由信息,当网络拓扑变化时,维护这些动态变化的路由信息需要更多的控制消息,因此网络中的路由分组数量大幅增加,这一方面消耗了更多的带宽,另一方面进一步加剧了网络规模扩大带来的冲突和碰撞发生的概率,所以网络的吞吐量急剧下降,端到端延时显著增大,路由开销大幅度增加. 而AFCR协议通过分群减少了节点路由表的尺寸,减轻了拓扑结构变化对路由协议带来的影响,避免了数据传输成功率的大幅度降低.

2.3 不同业务量下的仿真比较

图6~图8分别表示了3种协议在不同业务量大小(不同源节点个数)下分组投递率、平均端到端时延和归一化路由开销的仿真结果. 网络中的节点数 N 为100.

如图6所示,随着业务量的增多,它们的分组投递率均有下降,但AFCR协议分组投递率比其他两个协议的大且下降速度明显小于其他两个协议的. 如图7所示,AFCR协议在源节点数目比较大(即大于25)时的平均端到端时延性能比其他两个协议有了显著的改善,且增加的速度远远小于其他两个协议的. 如图8所示,AFCR协议能有效地控制归一化路由开销随业务增大时的增长速度. 与此相反,其他两个协议的归一化路由开销则基本上随业务的增大而呈线性增长趋势.

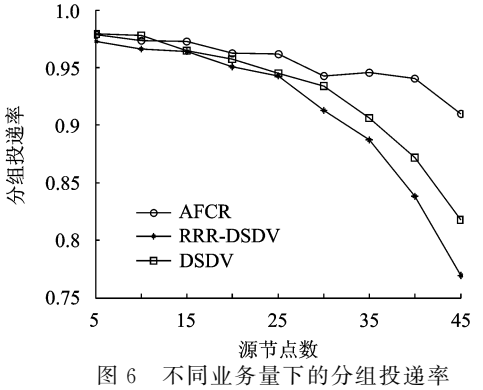

图6 不同业务量下的分组投递率

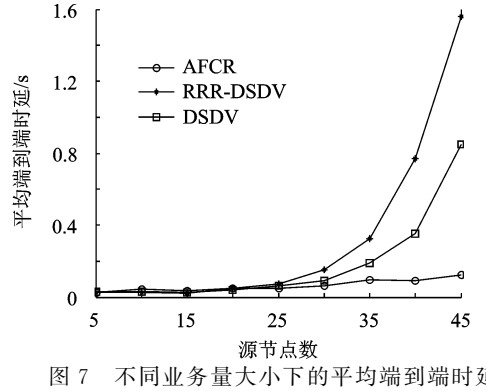

图7 不同业务量大小下的平均端到端时延

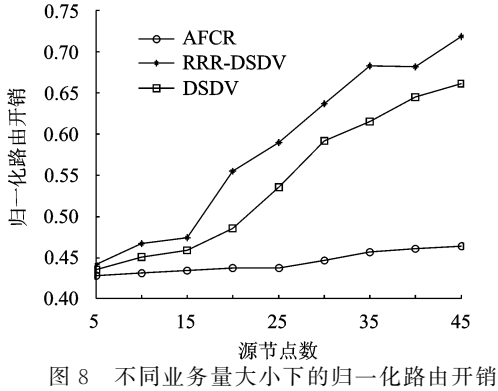

图8 不同业务量大小下的归一化路由开销

综上所述,AFCR协议比其他两个协议可以更好地适应MANET中业务量的变化情况,更好地控制路由开销的增长速度,从而改善网络的传输性能. 这是因为AFCR协议采取了一系列措施减小了转发路由分组的大小和数量,从而有效地

控制了路由开销的增长速度,使得当数据业务增加时并不会显著地提高数据分组和路由分组发生冲突碰撞的概率,进而使得节点及时获取正确的路由信息,减少了链路超时引起的触发更新.

3　结 束 语

为改善路由协议的可扩展性,使协议在网络中存在大量节点的情况下仍能维持良好的性能,本文提出了一种新的分群路由协议——AFCR 协议.一方面,它通过局部路由信息的交换来建立与维护分群网络结构、连接相邻群;另一方面,它基于局部路由信息和分群网络结构完成数据分组的自适应转发.仿真结果表明,在大规模、重业务情况下,该协议能有效地控制 MANET 中路由开销的增长速度,改善网络的传输性能.

参考文献(References)

[1] Hong Xiaoyan, Xu Kaixin, Gerla M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Network, 2002, 16(4): 11－21

[2] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers[C]//Proc ACM SIGCOMM 94. New York: ACM, 1994:234－244

[3] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR)[R]. IETF RFC 3626, 2003

[4] Perkins C E, Belding Royer E M, Das S R. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[R]. IETF RFC 3561, 2003

[5] Bjohnson David, Maltz David A, Hu Yihchun. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR)[R]. IETF RFC 4728, 2003

[6] Yu J Y, Chong P H J., A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2005, 7(1): 32－48

[7] Basagni S, Mastrogiovanni M, Panconesi A, et al. Localized protocols for ad hoc clustering and backbone formation: a performance comparison[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 292－306

[8] Yu J Y, Chong P H J, Zhang M. Performance of efficient CBRP in mobile ad hoc networks (MANTS)[C]//Proc IEEE VTC 2008-Fall. Calgary, Canada: IEEE, 2008: 1－7

[9] Chiang C C, Gerla M. Routing and multicast in multihop mobile wireless networks[C]//Proc IEEE ICUPC. San Diego, CA: IEEE, 1997: 546－551

[10] Jiang Mingliang, Li Jinyang, Chiang Tay. CBRP: a cluster based routing protocol for mobile ad hoc networks[EB/OL]. National University of Singapore, 1999[2008－9－16]. http://www.comp.nus.edu.sg/～tayyc/cbrp

[11] Liu Ting, Liu Kai. An improved routing protocol in mobile ad hoc networks[C]//Proc IEEE MAPE2007, Hangzhou: IEEE, 2007:748－751

[12] The ns Manual[EB/OL]. 2006. http://www.isi.edu/nsnam/ns

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 979 页)

由于本文仅考虑了气动力对结构变形的影响,而未考虑结构变形对气动力的影响,因此,未来进一步发展的方向是采用结构瞬态动力学的迭代方法,将结构运动的位形提供给非定常气动分析,求得的压力作为瞬态分析的表面载荷,并采用结构动力学方法模拟结构在非定常气动力作用下的瞬态动力学响应,得到的新位形作为下一时刻非定常气动分析的输入,逐步迭代,实现运动过程耦合仿真.

参考文献(References)

[1] 李耀明.卫星整流罩设计与"三化"[J].导弹与航天运载技术,1999,(2):1－11
Li Yaomin. Satellite fairing design and systematization, standardization and combination[J]. Missiles and Space Vehicles, 1999(2): 1－11(in Chinese)

[2] 董寻虎.大型柔性整流罩抛罩多体动力学仿真[C]//中国力学学会学术大会论文集.北京:中国力学学会,2005:1687
Dong Xunhu. Multibody dynamics simulation of large scale flexible fairing separation[C]//CCATM. Beijing: CCATM, 2005: 1687(in Chinese)

[3] Mittal R, Iaccarino G. Immersed boundary methods[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2005, 37: 239－261

[4] Mohd-Yusof J. Combined immersed-boundary / B-spline methods for simulations of flow in complex geometries[R]. Annual Research Briefs 1997, Center for Turbulence Research, 1997

[5] Lima E Silva A, Silveira-Neto A, Damasceno J. Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 189: 351－370

[6] Saiki E A, Biringen S. Numerical simulation of a cylinder in uniform flow: application of a virtual boundary method[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 123: 450－465

(责任编辑:张　嵘)