移动自组织网络路由选择算法研究进展

张 鹏[1,2] 崔 勇[1]

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)[1] (国家知识产权局 北京 100080)[2]

摘 要 移动 Ad Hoc 无需基础设施,可支持高动态的移动数据通信,具有广泛应用的前景。然而,其高动态特性导致互联网现有路由协议不再适用。近年来学者针对 Ad Hoc 网络提出了大量的路由选择算法。给出了各种路由技术分类方法,简述了 Ad Hoc 网络的基本路由协议和路由选择算法,进而从预测模型、能量模型、位置信息、服务质量控制和安全支持等5个角度,深入分析了当前 Ad Hoc 网络路由选择算法的最新研究进展。预测模型通过基于历史信息的移动预测,降低了路由选择的时间代价;能耗模型则采用适当的数学模型来描述网络能耗情况,在选路过程中实现了分组传送的能耗最小化和能量负担均衡之间的权衡;基于位置的路由选择算法根据节点的地理位置来标识目的地,从而利用该地理位置信息进行路由选择;服务质量感知的路由选择算法在本地计算中考虑带宽、延迟、能量和电池生命周期,从而在选路过程中提供了服务质量支持;安全路由选择算法则利用适合移动 Ad Hoc 网络的密钥、哈希链、电子签名等技术对协议交互消息进行加密来保障网络安全。最后从通信开销、计算和存储开销、路径数量、关键节点的存在性以及算法类型等方面详细对比总结了近年来提出的30余种典型路由选择算法,指出了各自的特点和适用范围,并从预测模型、能量模型、位置信息、服务质量控制和安全支持等5个角度展望了该领域的未来发展方向。

关键词 自组织网络,路由选择算法,基于预测的路由,面向能耗的路由

中图法分类号 TP301 **文献标识码** A

Survey on Routing Algorithms of Mobile Ad Hoc Networks

ZHANG Peng[1,2] CUI Yong[1]

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)[1]

(State Intellectual Property Office of China, Beijing 100080, China)[2]

Abstract Mobile ad hoc networks are widely used and it is an important task to route efficiently. But traditional routing algorithms are not fit for mobile ad hoc networks due to their dynamic character and many routing algorithms of mobile ad hoc networks were proposed these years. Main classification standards for routing mechanisms were presented. Then basic routing protocols and routing algorithms for mobile ad hoc network were overviewed. After that, as the latest advance of routing algorithms, the prediction-based models, energy models, position-based models, QoS and security in routing algorithms were deeply researched. In prediction-based routing algorithms, using historical information, proper routes were rapidly chosen based on the prediction of nodes' motion. In energy-aware routing algorithms, the consumption of energy was modeled based on the nodes' information. Then we introduced the special applications of the routing algorithms, including position-based routing algorithms, QoS routing algorithms and security routing algorithms. In position-based routing algorithms, forwarding decisions were made based on the geographical position of a packet's destination. The main idea of QoS routing algorithms was to take bandwidth, delay, energy and battery's life cycle into account while routing. In security routing algorithms, messages were encrypted based on secret keys, hash chains and electronic signatures. Last, more than thirty routing algorithms were compared and researched in the fields of computation overhead, communication overhead, storage overhead, optimal path, critical node and the types of the routing algorithms. The characters and applied areas of these routing algorithms were analyzed and the research trends in this field were proposed.

Keywords Ad hoc networks, Routing algorithms, Prediction routing, Energy-aware routing

1 引言

随着移动通信技术迅速发展,移动自组织网络技术应运而生。移动自组织网络,又称 Mobile Ad Hoc 网络(MANET),是不依赖于任何固定基础设施的移动节点的动态联合体[1]。由于具有无需基础设施支持、高动态性、无线通信以

到稿日期:2009-02-10 返修日期:2009-05-24 本文受国家重点基础研究计划项目(2007CB307105,2007CB307100)和国家高技术发展项目(2006AA01Z205)资助。

张 鹏(1981—),男,硕士,CCF 会员,主要研究领域为移动 Ad Hoc 网络、无线 mesh 网络和 Native XML 数据库,E-mail:zhangp@tsinghua.org.cn;

崔 勇(1976—),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机网络体系结构、无线网络。

及多跳传输的高覆盖性等优点，MANET 在军事应用、灾难援助等领域具有广泛的应用前景[2,3]。

良好的路由技术能够通过协议交互和本地计算以较低的计算负担、通信负担和能量消耗获得路由，从而为分组传输和上层应用提供有效支持。然而 MANET 在具有上述优点的同时，高动态性、多跳传输、能量有限性等特点却导致现有互联网路由技术无法在 MANET 上直接应用，因此必须研究新的适用于高动态性和能量有限性的 MANET 路由技术。而 MANET 路由技术涉及分布式计算、高效及时、自适应性、安全和能耗等诸多要素。因此，MANET 的概念被提出之后，路由选择算法一直是其研究的重点和难点。

路由选择算法的主要思想在于，在协议交互的基础上，按照适宜的选择标准采用便捷的选择策略进行本地计算，从而选择最优路由。在协议交互方面，传统路由协议采用洪泛机制。为了降低由此带来的代价，学者提出了随机最短路径路由技术的流言机制[16]、基于流言的路由[18]等。在选择标准方面，传统的 MANET 路由协议采用跳数作为路由选择的标准，学者提出考虑路由的节点能量[19]、可靠性[20]等因素。在选择策略方面，传统路由协议选择策略较为简单，学者提出 Corsac 协作优化协议[22]、适应性单元延迟路由协议[25]、簇覆盖广播技术[27]等，以满足 MANET 不同应用的需要。

MANET 路由技术发展迅速，特别是近几年来学术界在已有研究成果基础上，对路由选择算法的预测模型、能量模型、位置信息、服务质量控制和安全支持等关键问题进行了深入研究，取得了大量研究成果。这些成果旨在实现时间代价较低并且路由更新及时的预测更新，并进一步降低能量消耗，提供服务质量控制和安全支持。

基于预测的路由选择算法对节点未来位置进行预测并进行路由更新。其更新代价较低，因此学者对其进行了深入研究，例如 DREAM 算法[34]、最小位置更新路由[35]以及采用双曲线平滑方法的延迟预测技术[37]等。

在传统路由协议中，广播传送的路由协议分组会导致能量大量消耗，路由中的迂回也将增加不必要的能量消耗。由于 MANET 网络节点能量有限，如何设计能耗较低的路由技术，即面向能耗的路由选择算法成为 MANET 路由研究的一个重点分支。该类算法有面向能耗的路由选择算法[39]、节能事务路由技术[42]以及虚拟骨干网路由选择算法[43]等，其主要思路在于，共享节点移动信息和网络流量信息以降低能耗。

基于位置的路由选择算法根据节点的地理位置标识目的地，并利用包含在数据包中目的节点的位置和转发节点的邻居节点的位置进行路由计算。虽然该类算法往往不需要维护路由表就能够实现给定区域的数据包传送；但是需要依赖 GPS 或者其他定位装置，例如 GOAFR＋协议[48]等，事先获知相关节点的物理位置信息。

针对路由选择算法的应用，学者对路由选择算法的服务质量支持和安全支持机制进行了广泛研究。支持服务质量控制机制的算法在路由计算中考虑带宽、延迟、能量和电池生命周期，包括现有路由协议的 QoS 扩展和全新的支持 QoS 的路由选择算法，例如带宽受限的路由选择算法[56]等。支持安全控制机制的算法利用适合 MANET 的密钥、哈希链、电子签名等对路由协议交互的消息进行加密，保障网络安全，包括现有路由协议的安全优化和全新的安全路由选择算法，例如多路径路由选择算法[62]等。

本文第 2—4 节全面介绍了路由机制的各种分类方法、基本路由协议和路由选择算法；第 5—9 节详细分析了路由选择算法的预测模型、能量模型、位置信息、服务质量支持和安全支持；第 10 节进行比较和分析；最后总结全文并展望了该领域的发展方向。

2 基本路由机制简介与分类

路由是指把消息从源穿过网络传递到目的地的行为，其包括两个基本动作：协议交互和本地计算。其中协议交互的操作主要在于，网络中的距离向量、路径向量和链路状态的查找和传送；本地计算的操作主要在于，根据获得的距离向量、路径向量和链路状态进行路由状态的计算，并且选择数据传送的路径。MANET 路由机制的基本原理和功能与互联网的路由机制相同。但是，MANET 的拓扑结构和节点位置动态变化，使得路由技术具有特殊性。下面基于 MANET 的特点，对其路由技术进行分类研究。

由于 MANET 的路由与应用高度相关，单一的路由机制无法满足各种应用需求，因此学者研究和设计了多种路由机制。为了方便进一步的分析研究，下面根据路由获取的时机、逻辑组织结构、协议的功能等分类原则，运用多种分类方法对路由机制加以分类。

(1)表驱动路由、按需路由和混合路由

根据路由表项的产生时间，可以分为表驱动路由、按需路由和混合路由[4]。表驱动路由也称为预计算路由、先应式路由，其事先维护网络中从一个节点到其他节点的所有路由信息，在数据传输之前形成路由表项，然后根据该数据表项进行数据传输。其优点在于直接根据路由表中的信息进行数据传输，不需要额外的路由建立等待时间；缺点在于建立和维护路由表的负担较大；适用于规模较小并且动态性不强的 MANET。按需路由也称为在线路由、反应式路由，其在数据传输之前计算路由，在数据传输过程中形成路由表项，节点无需维护路由信息表。其在一定程度上降低了协议交互的开销，但是路由建立的时延较大，适用于动态性较强的 MANET。混合路由则综合利用了上述两种技术，适用于节点计算能力较强并且规模较大的 MANET。在互联网的路由技术中，网络拓扑结构相对固定，因此多采用表驱动路由。由于 MANET 动态性高，路由表的维护代价较高，因此多采用按需路由和混合路由。

(2)基于拓扑的路由和基于位置的路由

根据是否使用地理位置信息，路由可以分为基于拓扑的路由和基于位置的路由。大量应用需要确定节点的地理位置，基于该地理位置信息进行路由选择。该技术能够高效地确定节点的位置，但是需要 GPS 或者其他定位装置获知节点的位置信息，该技术被称为基于位置的路由。互联网中位置与网络的互联关系之间不具有紧密的联系，所以互联网多采用基于拓扑的路由。而 MANET 拓扑结构动态变化，并且节点间无需介质直接进行广播，因此基于位置的路由具有广泛的应用前景。

(3) 距离向量路由、链路状态路由和路径向量路由

根据协议交互信息的类型，路由可以分为距离向量路由、链路状态路由和路径向量路由。在距离向量路由中，每个节

点只记录到目的节点的跳数和下一跳的节点，可以称之为“告诉邻居整个世界”。在链路状态路由中，使用反映网络拓扑结构的邻接表来描述网络的链路状态，该邻接表记录了所有节点间的邻接关系和链路代价，可以称之为”告诉整个世界我的邻居”。在路径向量路由中，每个节点记录路径的路径向量，然后节点对路径加以选择，从而防止路径循环。这 3 种路由技术在互联网中都得到了广泛的应用，在 MANET 中也是如此。

(4) 源路由和分布式路由

根据路径向量存储的位置，可以将路径向量路由分为源路由和分布式路由。源路由由源节点决定完整路由，中间节点无需建立和维护路由信息，从而节约了存储空间，减少了通信开销，但是报文头过长。分布式路由则由中间节点选择下一跳传输的目的节点，其能够适应网络拓扑结构的频繁变化，但是中间节点计算负担较大。互联网具有相对稳定的拓扑结构，因此多采用源路由。而 MANET 动态性较强，因此多采用分布式路由。

(5) 单路径路由和多路径路由

根据数据传输使用路径的数量，可以分为单路径路由和多路径路由。单路径路由中，源节点的数据分组沿着一条路径从源节点到达目的节点。其优点在于数据通信量较少，并且节约存储空间，缺点在于容错性较差，并且路径的传送负担不均衡。多路径路由中，源节点的数据通过多条路径到达目的节点。该技术的优点在于容错性较强，能够对网络负载的均衡提供支持，缺点在于数据通信量较大。由于互联网网络拓扑结构固定，并且路径的稳定性较强，多采用多路径路由。而 MANET 节点的存储空间以及计算能力有限，多采用单路径路由。

(6) 平面路由和层次路由

根据节点是否存在层次结构，可以分为平面路由和层次路由。平面路由中节点对等，因此路由协议设计简单，健壮性好，但是路由维护的代价较大；层次路由节点关系不对等，簇头负责维护簇内路由，因此扩展性好，易于管理，但是簇头的计算代价较大。互联网网络拓扑结构固定，多采用层次路由。而移动 Ad Hoc 具有较强的动态性，多采用平面路由。

(7) 其他分类

路由根据所具有的特定功能，可以做出如下分类。路由根据是否支持服务质量控制，可以分为服务质量感知路由和非服务质量感知路由。路由根据是否提供网络安全保障，可以分为安全路由和非安全路由。互联网中，服务质量感知路由和安全路由非常常见。由于 MANET 所具有的动态性和能量有限性，服务质量感知路由和安全路由仍需要进一步研究。

3 基本路由协议

MANET 的基本路由协议主要基于拓扑结构进行路由选择。根据路由表项的产生时间进行分类是路由协议最为基础的一种分类方式，因此，本文采用该分类对 MANET 的基本路由协议进行介绍，以期读者对基本的表驱动路由协议、按需驱动路由协议和混合路由协议有所了解。

3.1 表驱动路由协议

表驱动路由协议预先维护网络中从一个节点到其他节点的所有路由信息，从而实现快速路由。基本的表驱动路由协议包括 DSDV，WRP，CGSR，OLSR 等。

DSDV 协议[5]是一种采用传统的 Bellman-Ford 路由算法的基于距离向量的分布式表驱动路由技术。每个节点维护存储路由下一跳节点的路由表，每条路由具有目的节点分配的顺序号，每个节点定期向邻居转发路由表，同时增加顺序号。如果某中间节点的顺序号小于邻居节点的顺序号，则选择该邻居节点作为下一跳节点，并且将该中间节点的顺序号更新为转发节点的顺序号，从而实现路由选择。DSDV 协议的优点在于节点本身具有路由表，因此它在应用中能够高效地传送消息。

由于 DSDV 协议可能产生循环路由，Shree 等学者提出了一种基于距离向量的路由技术 WRP 协议[6]。该协议中，每个节点维护 4 个表：距离表、路由表、连接成本表和消息重发表，根据邻居节点的最短路径生成树，生成自己的最短路径生成树，再向邻居节点发送更新信息，从而实现路由选择。

DSDV 协议和 WRP 协议的缺陷在于，它们仅仅适用于平面网络，并且网络的传送负担和节点的计算负担较大。Chiang 等学者进一步提出了基于距离向量的层次路由技术 CGSR[7]。如图 1 所示，当源节点 S 路由时，其首先将路由消息传送到簇头 A，簇头 A 首先查找簇成员列表，如果目的节点 D 不在簇成员列表中，则将该消息转送给网关 C，由网关 C 转送给另一个簇头 B，直到传送到目的节点 D 为止。可见，CGSR 协议采用了分层查找机制，在网络规模较大时能够防止大量路由消息的洪泛。但是，该协议中节点需要定期向相邻节点广播位置信息。

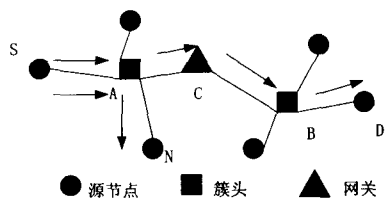


图 1 CGSR 协议示例

为了减轻上述协议中节点的计算负担，Clausen 等学者基于多点中继站的思想提出了 OLSR 协议[8]。在节点中选择出的多点中继站周期性地向邻居节点广播路由信息。由于网络中只有多点中继站节点参与路由计算，因此减轻了其他节点的计算负担。

为了减轻所有节点的计算负担，Ying 等学者提出了分等级的优化链路状态路由协议 HOLSR[9]。充分利用各个节点的不同容量，动态地将节点组织到簇中，并且簇以等级化的方式组织起来，从而使得需要交换的拓扑控制信息得以减少。与上述协议一样，若在簇间使用 OLSR 协议进行路由选择，则该协议需要定期更新。

为了减轻上述协议中定期更新位置信息所导致的负担，Unghee 等学者提出多信道的 DSDV 路由协议 DSDV-MC[10] 和多信道的 OLSR 路由协议 OLSR-MC[11]。其中，信道是指两个系统间发送数据的管道，是不同系统的应用程序和过程之间的逻辑链接。该协议将网络层划分为控制平面和数据平面，节点使用一个控制频道传送路由更新信息并且使用一个或者多个数据频道传送数据包。该协议实现了多个消息传送操作同步进行，降低了网络负担，但是频道资源的管理和协调

难度较大，并且节点的计算负担较大。

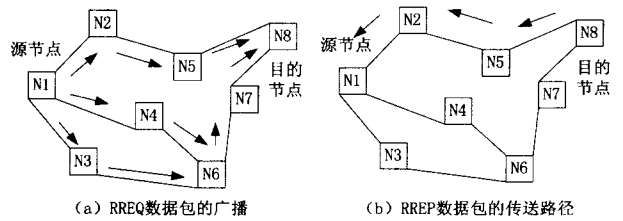
综上所述，表驱动路由技术使用路由表维护网络中从一个节点到其他节点的所有路由信息，因此能够实现快速路由。但是路由表增加了节点的存储负担，并且路由更新需要定期发送数据包，增加了节点的传送负担和计算负担。因此，如何优化路由表是表驱动路由协议的研究重点。

3.2 按需驱动路由协议

由于表驱动路由协议中存在一些节点用不到的路由表项，导致大量无用信息得以存储，因此有学者提出按需驱动路由协议。该协议在数据分组要发送的时候选择路由，节点无需维护路由信息表。路由选择通过下述方式进行，源节点采用洪泛操作向相邻节点发送路由请求消息，中间节点将上述消息的全部或者部分加以转发，直到目的节点收到该请求消息；然后目的节点选择合适的路径并且反向转发路由应答消息；当源节点接收到应答消息之后，路由得以建立。常见的按需驱动路由协议有 DSR，AODV，TORA，ABR 等。

DSR 协议[12]作为一种源路由技术，每个分组的分组头中都包含有从源节点到目的节点的完整路由信息。在协议交互阶段，当移动节点要使用新的路由传送数据包时，该节点广播路由请求包。每个接收到该数据包的节点判断其是否知道到目的节点的路由。如果该结点不知道到目的节点的路由，那么将其自己的地址增加到数据包的路由记录中并继续转发该数据包。当路由请求到达目的节点时，路由回应消息产生，并且该消息被回送到源节点。该协议不需要周期性地洪泛更新消息，节省了网络资源，但是中间应答机制会产生过时路由问题并且可能产生环路。

为了解决 DSR 协议存在的过时路由和路由环路的问题，Perkins 等学者在 DSR 协议和 DSDV 协议的基础上提出了 AODV 协议[13]。AODV 协议采用了 DSR 协议的协议交互机制，保持了 DSDV 协议的逐跳路由、顺序号和周期性更新机制。如图 2 所示，源节点广播路由请求数据包，该数据包被邻居节点加以转发，该协议使用顺序号以保证不会形成环路。路由请求包到达目的节点之后返回路由回复包，路由得以建立。该协议思路简单，并且有效地防止了路由环路的发生和过时路由信息的出现；但是协议交互的时延较大。



(a) RREQ数据包的广播　　(b) RREP数据包的传送路径

图 2　AODV 协议示例

综上所述，按需驱动路由技术仅仅在源节点需要时才进行协议交互，节点无需维护路由信息表，但是路由建立的时延较大。因此，如何降低路由建立的时间复杂度是按需驱动路由技术的研究重点。

3.3 混合路由协议

在移动 Ad Hoc 网络中单纯采用表驱动路由协议或按需路由协议都不能完全实现高速路由，因此，许多学者对上述两种协议的优点加以结合，提出混合式路由协议。

首先提出的混合式路由技术是区域路由协议 ZRP[14]。所有节点都有一个以自己为中心的重叠的虚拟区域，区域内的节点数与设定的区半径有关，在区域内使用表驱动路由算法，在区域间使用按需驱动路由算法进行路由选择。基于相同的思想，Dai 等学者提出先应式路由维护机制[15]，该机制将按需路由协议的协议交互技术与表驱动路由协议的路由维护技术结合，从而实现高速路由。

综上所述，混合路由协议能够较好地利用表驱动路由协议和按需路由协议的优点，降低了节点的计算负担，但是节点的计算负担相对较高，从而导致网络整体能耗较高，尤其是在大规模 MANET 中。因此，大规模 MANET 的混合路由技术是研究重点。

4 基本路由选择算法

路由选择算法是为了实现上述路由功能而设计的计算方法，负责确定所收到的分组报文应当传送的外出路线。也就是说，路由是在协议交互的基础上，基于路由选择算法进行本地计算。路由选择算法是网络层的核心部分。该算法的任务在于确定可用路由，然后根据一定的路由选择标准，采用适宜的选择策略选择最优路由。该算法的输入为网络的拓扑结构，输出为最优路由。MANET 路由选择算法的基本功能与互联网路由选择算法相同。但是，MANET 的拓扑结构和节点位置动态变化，节点能量有限，不存在路由器等设备，使得其路由选择算法具有特殊性。近年来，学者在这方面进行了深入的研究并取得大量研究成果。

在 DSDV，AODV 等路由协议中，协议交互均采用洪泛机制，不必要将路由消息多次复制，因此具有相对较高的时间代价和带宽代价。为了降低时间代价和带宽代价，Yuval 等学者提出基于随机最短路径路由技术的流言机制[16]。其根据扩散理论，源结点以概率 1 广播一个消息。当一个中间结点第一次接收到该消息，则它以概率 p 将该消息广播到邻居结点，以概率 $1-p$ 丢弃该消息；若中间结点接收到重复的消息，则它丢弃重复的消息。Yuval 等提出通过对邻居节点的流言，节点能够获知动态网络的状态信息，从而选择到达目的节点的最短路径。该机制降低了由洪泛机制导致的数据传送负担，但是滞后性较强。

为了降低流言机制的滞后性，Christopher 等学者提出了随机路由技术[17]，其使用基于概率的本地广播传送模型进行消息传送，根据一定概率转发消息，并且基于消息传送中中间节点的反馈进行路由选择。该技术有利于降低流言机制的滞后性，但是路由查找的效率较低。

为了提高路由查找的效率，Haas 等学者对基于流言的 Ad Hoc 路由技术加以优化[18]。在对网络动态性要求较低的操作中，流言很快注销从而很少的节点能够接收到该消息；在对网络动态性要求较高的操作中，流言所涉及到的关键节点接收该消息。上述操作的区分依赖于流言可能性和网络的拓扑结构。上述技术降低了洪泛机制所造成的时间代价和带宽代价，但是节点对消息的转发以一定概率进行，可能出现转发失效的情况。

在协议交互的基础上，路由选择算法还需要进行本地计算，因此需要对路由的选择标准和选择策略进行研究。在选择标准方面，DSR 和 AODV 协议中的路由选择均采用跳数作为路由选择的标准，学者对其他路由选择的标准进行了研究。

如 Park 等学者提出的 TORA 协议，即 Temporally Ordered Routing Algorithm 临时排序路由算法[19]。采用了"势能"的概念，离目标节点越近的节点势能越高，并且该势能通过目标节点的反向广播获得，借助势能的比较进行路由选择。上述协议主要考虑转送节点的能量，没有考虑路由本身的稳定程度。

为了提高路由的稳定性，Toh 等学者提出了基于联合稳定度的路由协议 ABR[20]。其采用"联合稳定度"的概念来标识节点以及相应链路在时间和空间上的稳定程度，借助联合稳定度的比较进行路由选择。该协议能够较为准确地反映路由的稳定性，但是节点的计算负担和存储负担较大。Baruch 等学者提出了基于吞吐量的路由选择算法[21]，该算法将吞吐量作为路由选择的标准，以期实现网络的负载平衡。该算法能够为服务质量保证提供支持，但是时间代价较高。

在选择策略方面，DSDV 和 AODV 协议等选择策略过于简单。为了解决该问题，Zhong 等学者提出无线 Ad Hoc 网络的协作优化路由转发协议 Corsac[22]。该协议采用 VCG (Vickrey-Clark-Groves)算法，在加密技术的基础上使得链路的成本由两个节点共同加以确定，从而加强路由的选择。该协议提供了使用两个节点描述链路成本的思路，但是没有对此详细描述。

为了进一步描述链路的成本，Du 等学者提出了多类别路由[23]。首先选择能量较高的节点作为骨干节点 B-node，能量较低的节点作为普通节点 G-node，由骨干节点承担较多的路由负担。该技术能够实现快速路由，但是各个节点的负载不平衡。为了综合实现达到负载平衡，并且降低节点的移动距离，Wu 等学者进一步提出基于对数的存储-承载-转发路由技术[24]，该技术首先设计节点运动的轨迹和集结点，然后对消息的传送加以调度，并且在移动过程中对节点进行重新区分。

上述选择策略没有考虑 MANET 的不同特性，因此 Du 等学者提出适应性单元延迟路由协议[25]。该协议包括 3 个部分：针对稠密网络的单元延迟路由机制 CR；针对稀疏网络的大单元路由机制 LC 以及检测节点稠密程度的改变并在节点稠密程度改变时路由策略的改变机制。CR 机制采用面向能耗的按需路由选择算法，使用能量较高的节点执行路由和包转发操作，并且在选中的单元内以洪泛的形式进行路由选择。在稀疏网络的 LC 机制中，主要考虑如何保障数据包的传送，其次才需要考虑降低路由负担的问题。当活动节点的数目或者当路由的区域改变时，稠密度改变的消息传送到适应性簇头 AH 中，从而适应地改变路由策略。该方案充分考虑 MANET 的不同特性，并且区分了稠密网络和稀疏网络，但是稠密度的计算时间代价较高，并且需要大量洪泛操作。

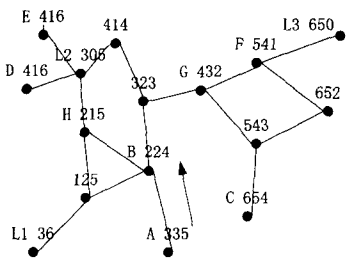


图 3　Hop ID 示例

在 Du 的研究基础上，为降低时间复杂度，Zhao 等学者针对稀疏 Ad Hoc 网络提出了基于 Hop ID 的虚拟协作路由技术[26]，其基于该 Hop ID 的平均值的大小选择路由。HopID 是标识节点与预定的路标节点之间的相对位置的距离向量，例如图 3 中某节点的 Hop ID xyz 是指该节点分别与路标节点 L_1，L_2 和 L_3 之间的距离。该技术仅适用于稀疏网络，时间复杂度相对较低。

上述技术针对小规模且稀疏的网络，Luke 等学者针对大规模 MANET 提出了簇覆盖广播技术[27]。当源节点传送数据时，其与簇头交互，簇头将路由请求在所有簇头构成的覆盖网络上加以广播。该广播首先以一倍传送跳数作为生命周期加以传播，如果没有收到回复消息，依次以二倍、三倍生命周期等传播。该技术虽然降低了计算的时间复杂度以及广播负担，但簇头节点的计算负担和转送负担较大，同时大大增加了路由失败时的延迟。

为了降低大规模的 MANET 路由计算负担，Jakob 等学者提出使用对节点动态编址的方法[28]。该方法基于节点的位置关系对节点动态编码，根据该编码进行下一跳节点的查找。其很大程度上降低了洪泛造成的负担和节点的转送负担，但是需要占用节点的存储空间，并且带来一定的传送延迟。有些特定应用需要尽量降低传送延迟并且提供并发性支持，因此 Mao 等学者针对并发视频会话的要求提出了基于遗传算法的路由技术[29]。该技术针对每条路径进行基因编码，然后进行遗传和变异操作，最终获得适宜的路由。在该方法中节点的计算负担较重。

上述技术没有充分拥塞控制的问题，Duc 等学者提出拥塞适应性路由技术[30]。当节点探测到将要发生拥塞时，该节点通知前一个节点，该前一个节点使用其他路由绕过拥塞区域。如图 4 所示，在图 4(a)中当节点 C 探测到拥塞的时候，则通知其在先节点 B，由该节点选择通过节点 W 的另外一条路径，分别以概率 p 和 $1-p$ 在上述两条路径传送数据。当节点 B 发生拥塞的时候，如图 4(c)所示，选择通过节点 x 的路径，分别以概率 q 和 $1-q$ 在两条路径传送。可见，该技术不仅可判断网络的拥塞状态，而且还可基于网络的拥塞状态对其进行适应性改变。该技术适用于较重传送负担下可进行大规模传送的 MANET，例如传送多媒体数据的 MANET，其能够降低包丢失率和延迟。但是需要节点具有拥塞探测能力，计算负担较重。

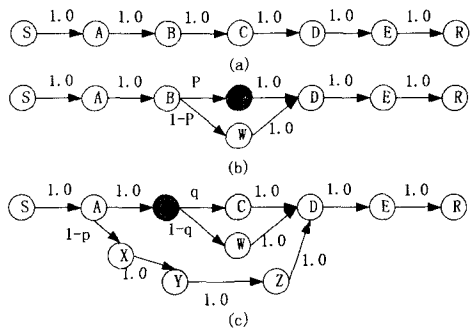


图 4　CRP 协议示例

综上所述，在 MANET 的基本路由选择算法中，协议交互中的洪泛操作带来了较重的数据传送负担和节点计算负担，并且仅仅以跳数作为路由选择的标准无法选择最优路由，因此，如何降低洪泛操作带来的负担以及如何设计更为全面

的路由选择标准是研究热点最为集中的领域。即路由选择的策略和路由选择的标准是研究热点。区分稀疏网络和稠密网络并且分别设计路由选择策略是一个很好的思路。在洪泛操作的优化方面，流言机制与概率模型的结合提供了很好的研究思路，学者在此基础上提出了基于预测的路由选择算法。

5 基于预测的路由选择算法

从上述分析可以得知，路由选择算法的重要问题在于路由更新性能的提高，也就是以较低的代价实现拓扑位置信息的定期更新。学者对于路由算法中的路由更新技术做了很多的研究，主要可以分为全局更新、局部更新、基于移动的更新、事件驱动更新和移动预测的更新。

全局更新中，每个节点定期与其他节点交换路由表。显然，全局更新技术的更新代价非常高。局部更新技术将路由更新信息的传播局限在一定区域之内。例如在 Jacquet 等学者提出的 FSR 协议[31]中，以较高的频率更新较近区域中的节点的路由表，FSR 协议采用如图 5 所示的"鱼眼范围"定义较近区域。其中，鱼眼范围是覆盖从中心节点经过特定数目的跳数能够达到的节点的范围。该技术的更新代价相对较低，但是准确性不高。

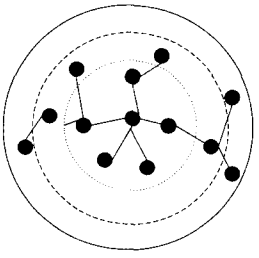


图 5 FSR 协议中的鱼眼范围示例

为了解决 DSR 协议存在的包丢失率较高并且路由负担较重的问题，Xin 提出的 DSR 协议的分布式缓存更新机制[32]同样采用了局部更新技术。每个节点在其缓存表中维护两类路由信息，第一类信息是路由信息在路由相关节点中的同步情况，第二类信息是哪个邻居节点从路由回复消息中得知了哪个链路连接。节点 C 的缓存表存储了其能够到达的路由 CDE，CBA 等。对于节点缓存表中的每个链路而言，节点能够知道哪个邻居节点缓存了该链路，从而拓扑传播状态信息以分布式的方式加以存储。当探测到链路失败时，需要通知该链路的邻居节点。该机制使得 DSR 协议能够快速更新，从而降低了包丢失率并且降低了路由负担，但是，由于每个节点需要维护缓存表，增加了节点的存储负担和计算负担。

事件驱动更新技术[33]的主要机制在于，如果特定事件发生，那么节点传送更新消息，该技术的更新代价非常低，但是具有一定的滞后性。

上述路由算法的更新技术均具有较高的更新代价。而移动预测的更新技术主要基于对移动的预测进行路由更新，采用该更新技术的路由选择算法被称为基于预测的路由选择算法。其更新代价较低，并且具有一定的预测性，因此近年来学者对于其进行了深入研究并取得大量研究成果。

Basagni 等学者提出了移动的更新技术 DREAM[34]，以较高的更新频率更新具有较高运动速度的节点，该技术的更新代价相对不高，但是计算的时间复杂度较高。Mehran 等学者在 DREAM 的基础上，提出了最小位移更新路由 MDUR 和最小拓扑改变更新 MTCU[35]。在最小位移更新路由中，得以传送的路由更新信息与节点位置的改变超过一定阈值的次数成正比。在最小拓扑改变更新中，得以传送的路由更新信息与每个节点探测到的拓扑改变的程度成正比。如图 6 所示，当节点 S 从位置 S_i 移动到位置 S_f 的时候，节点 S 的邻居拓扑结构发生改变，从而显著地改变了整个网络的拓扑结构，因此需要在此时发送更新包，从而网络中的每个节点能够重建路由表并且存储更为准确的路由。如果节点 S 迅速朝向节点 A 移动，但是仍然能够保持与节点 B 和 D 之间的连接，那么节点 S 的拓扑结构没有改变，网络中无需进行任何更新。上述方法中，根据拓扑结构改变的情况决定是否更新路由，较大地减少了更新代价；但是，采用阈值判断更新时机，准确性不高。

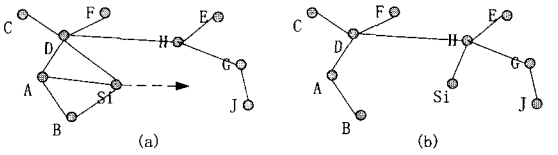


图 6 MDUR 示例

为了提高更新预测的准确性，Jiang 等学者提出了基于对链路可用性的预测的可靠路由选择算法[36]。首先根据在期间 T_p 中节点保持当前速度不变的情况，将节点预测链路可用的时间期间定义为 T_p。接着，通过分析 t_0 和 t_0+T_p 之间可能的变化，对该链路保持到时间 t_0+T_p 的概率 $L(T_p)$ 加以预测，其计算公式为：

$$L(T_p)\approx(1-e^{-2\lambda T_p})\left(\frac{1}{2\lambda T_p}+\varepsilon\right)+\frac{\lambda T_p e^{-2\lambda T_p}}{2} \quad (1)$$

其中，参数 p 难以确定，为了简化，可以将 p 设定为 0.5，然后确定 ε 的值。ε 的值由环境因素决定，例如节点稠密度、信号范围和空间大小。上述可靠路由选择算法基于节点速度的变化预测链路的可用时间，能够显著地降低路由选择算法带来的更新代价。但是，节点的计算代价和存储代价较高，并且该算法仅仅考虑了链路的可用性，没有考虑延迟以及能耗等因素。

为了进一步提高预测更新的准确度，充分考虑延迟以及能耗等因素，Guo 等学者提出，使用双指数平滑方法预测延迟和能耗[37]，并且使用基于链路生存期的启发式算法。在每个节点中，路由表基于 Dijkstra 算法做出修改，集成地评估预测值。双指数平滑方法的主要公式即 $X_{t+1}=S_t=A_t+D_t$，$t=1,2,3,\cdots,N$。其中 $A_t=\alpha X_t+(1-\alpha)S_{t-1}$，$0\leqslant\alpha\leqslant1$；$D_t=\beta(A_t-A_{t-1})+(1-\beta)D_{t-1}$，$0\leqslant\beta\leqslant1$。在上述公式中，$S_t$ 是在时间 $t+1$ 处的评估值，X_t 是在时间 t 处的实际值，α 和 β 是参数。α 和 β 的确定采用 Levenberg-Marquardt 算法实现。上述方法中更新代价较低，但是节点计算的时间复杂度较高。为了进一步提高路由更新的效率，Vinh 等学者经过实验分析得出，路由更新的时间代价主要集中在链路层的队列长度和重新连接的限制上，因此提出适应性重新连接限制以加速队列管理[38]。如果由于达到重新连接限制，已经有具有相同目的 MAC 地址的数据包得以丢弃，那么重新连接的限制被重设为 1，直到每个包被重新传送 1 次。该方法降低了节点计算的时间复杂度，但是需要链路层支持，并且会导致资源的不

公平分配。

综上所述，学者对于基于预测的路由选择算法进行了深入的研究，如何降低时间代价并且及时进行路由更新，具有较好的研究前景。我们认为，该问题的关键是建立较好的预测模型，基于节点历史行为的描述对路由的变化加以预测。MANET 所具有的高动态性使得预测模型的建立存在一定困难，并且 MANET 节点能量有限，需要充分考虑预测模型的时间代价和空间代价。

6 面向能耗的路由选择算法

路由选择算法中的另外一个需要考虑的问题是能耗。在上述协议中，洪泛和路由中的迂回都会导致不必要的能量消耗，而 MANET 中的节点能量有限，因此学者对面向能耗的路由选择算法进行了深入研究并且取得了大量研究成果。

Rodoplu 等学者首先提出面向能耗的路由选择算法[39]，在本地计算中结合能耗的情况考虑节点生命周期的问题，选择生命周期较长的节点作为下一跳节点。该算法提高了节点生命周期并且节省了能量，但是没有具体指出如何提高生命周期。在此基础上，Chang 等学者提出基于节点的当前存留能量最大化网络生命周期，其中考虑了贪婪路由技术的规模和效率对能量消耗的影响[40]。Lin 等学者则进一步提出将成本定义为节点存留能量的指数函数[41]。可见，上述研究关注于数据包传送所造成的能耗的最小化和能量负担的均衡之间的权衡，在一定程度上降低了能量消耗，但是其在大规模 MANET 上性能较差。

为了进一步降低大规模 MANET 的能耗，Ahmed 提出一种新的路由技术 TRANSFER，即 MANET 节能事务路由技术[42]。每个节点使用按需链路状态协议获取 R 跳区域内的节点位置信息，其在无需得知本地信息的情况下按需联络选择。该技术虽然可降低大规模 MANET 的能耗，但是节点的计算负担相对较大。

为了降低节点的计算负担，Liang 等学者提出虚拟骨干网路由选择算法[43]。该技术使用 ZRP 技术的基本思路，即使用虚拟骨干网络降低协议交互产生的能耗和传送负担。通过分布的启发式覆盖数据库 DDCH 实现骨干网络中节点的选择和维护。该技术减轻了多数节点的计算负担，但是存在骨干节点计算负担较重的问题。

为了降低骨干节点的计算负担，Zhao 等学者提出面向能耗的适应性路由技术 EAGER[44]。该技术根据流量情况将网络划分为单元，单元内的节点预计算地维护单元的拓扑结构，单元间的节点在线地维护单元间的拓扑结构，并且将常用节点和常用路由周围的临近单元形成邻居单元，网络的其他部分则保持节能状态。通过使用该方法，能够实现节点的能量节省及高速路由，但是节点的计算负担较大，并且上述研究没有关注 MANET 的空间特性。

为了进一步考虑空间特性，Seung 等学者提出基于节点空间关系的多路径路由技术 PBM[45]，路由通过空间聚簇的会话完成，同一聚簇中的节点的集合被称为"空间足迹"。图 7 显示了节点 S 到节点 D 的第 1，2 和 3 级别路由的创建，每个级别的路由以实线形式显示，并且阴影区域是路由中的节点单元，从而箭头标识的节点是路由的连接器。随着延伸程度的提高，阴影单元中的节点对应于会话的空间足迹，从而网络中的通行模式被看作空间足迹的动态集合。该技术基于节点空间关系实现能耗最小化与能量负担均衡之间的权衡，但是计算的时间复杂度较高。

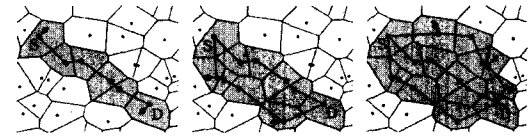


图 7 PBM 协议中的路由建立机制示例

综上所述，由于 MANET 节点使用自身带有的电池或者其他易损耗的能源作为能量提供源，能量非常有限，因此面向能耗的路由选择算法具有良好的研究前景。我们认为，该问题的研究重点在于节点能耗的降低。该能耗降低的主要方法在于节点移动信息的共享和网络流量信息的预测，该方法的主要思路在于选择合适的数学模型描述上述能耗情况，并加以优化。

7 基于位置的路由选择算法

基于位置的路由选择算法需要通过 GPS 或者其他定位服务装置获得节点物理位置信息[46]，也有学者提出不使用位置信息，而使用节点之间的相对位置关系[47]。该算法基于上述节点物理位置信息或者节点相对位置关系进行本地计算。每个节点的路由选择根据数据包中包含的目的节点位置和转发节点的邻居节点位置加以决定。该算法无需存储路由表，也无需发送消息来保持路由表的更新，并且支持特定地理区域的数据包传送。

基于位置的路由选择算法需要解决的两个问题是，在数据包传送之前目的节点位置的确定机制，以及数据包转发机制。目的节点位置的确定机制主要通过位置服务实现。数据包转发机制主要基于数据包的目的节点位置和一跳邻居节点位置确定，邻居节点位置通常通过一跳广播的方式获得，主要包括流言转发、严格方向性洪泛和等级化转发 3 种机制。基于位置的路由选择算法的研究主要集中在数据包转发机制的研究方面。

为了解决协议交互中的高速转发问题，Fabian 等学者提出了基于位置的路由选择算法 GOAFR+[48]。每个节点使用流言机制向邻居节点转发数据包。如果该节点没有适宜的邻居节点，或者是数据包达到了网络边缘，则该算法应使用反馈技术尽快恢复到流言机制。该机制虽然可提高路由效率，但是没有充分考虑网络中的传送负担以及节点的计算负担。

为了降低网络中的传送负担，Johnson 等学者提出将成功接收数据包的概率定义为两个节点之间距离的对数函数和概率函数[49]，在本地计算中计算该概率并将其用于路由选择中。该方法降低了网络传送负担，但是节点计算负担较重，尤其是在大规模 MANET 中。为了降低大规模 MANET 的节点计算负担，Taejoon 等学者提出将位置更新机制与分布式位置服务相结合[50]，将优化配置定义为基于位置的或者基于时间的位置更新阈值，从而将总体路由代价定义为该阈值的凸函数。该方法一定程度上降低了节点的计算负担，但是没有考虑丢包率、延迟和能耗等因素。为了充分考虑各种因素，Lee 等学者提出高效的基于位置的路由选择算法[51]。该算法使用链路矩阵 NADV 选择邻居，其选择负担较轻并且跳数较少的路径，而非仅仅是最短的路径。其使用 MAC 层上的无

线集成子层扩展 WISE 计算链路成本。然后基于探测消息信噪比、邻居监测、自监测等方法计算丢包率、基于丢包率、延迟和能耗选择最优路径。上述 3 种技术充分考虑了 MANET 中的数据传送负担，但是计算的时间复杂度相对较高。

综上所述，基于位置的路由选择算法根据数据包中包含的目的节点位置和转发节点的邻居节点位置进行路由选择，节点通常需要装配 GPS 或者其他定位服务装置。该技术的研究重点集中在高速转发和路由选取机制的实现上，尤其是选用时间复杂度较低的数学模型进行路由选择机制的描述。

8 服务质量感知的路由选择算法

在 MANET 的应用中，语音图像等应用要求信息的实时准确传送，文件下载等应用要求较好的带宽保证和较低的丢失率。因此，人们迫切需要 MANET 具备良好的 QoS 机制。支持 QoS 控制的路由选择算法被称为服务质量感知的路由选择算法。其主要分为两种：一种是对现有的 MANET 路由协议进行优化，即原有路由协议的 QoS 控制扩展；另一种是全新的支持 QoS 控制的路由选择算法。

8.1 原有路由协议的 QoS 扩展

OLSR 协议和 AODV 协议等没有考虑到 QoS 机制的支持问题，因此学者提出一些原有路由协议的服务质量控制扩展即 QLSR，AODV，DSR 等协议的 QoS 扩展。

Badis 等提出了利用多点转播和拓扑控制消息的 QLSR 协议 QoS 扩展机制，即 QOLSR[52]。在 QOLSR 路由选择算法下，每个节点计算与其邻居的延迟和带宽信息。然后根据上述信息分别建立图，根据确定的权重，使用 Dijkstra 算法计算最佳路径。其能够较好地进行服务质量控制，但是计算代价较高，并且当路径上的有效带宽变化时，源节点需要频繁改变下一跳的位置，从而无法区分由其本身带来的拥塞和由其他节点产生的拥塞。

PJian Li 等学者提出的 AODV 协议的随机重传机制仅仅用于解决广播风暴的问题，不适合选择最优路径[53]。最优路径应当依据最少跳数、延迟、传送所需能量和电池生命周期加以选择。该方案可以有效地提高服务质量，但是增加了节点的计算负担。

为了使得 DSR 协议能够支持 QoS 机制，Xu ZHANG 等人提出一种模糊逻辑服务质量控制动态源路由协议[54]，该协议在交互中由节点检测其链路上 QoS 量度的改变，包括带宽、端对端路由延迟和路径代价的改变，然后在本地计算中使用模糊逻辑算法进行路由选择。该协议能够在路由选择过程中提供服务质量保证，但是节点的计算代价较高并且较为滞后和不精确。

综上所述，OLSR 协议的 QoS 扩展多是在现有 OLSR 协议路由选择算法的基础上，由节点计算带宽和延迟等信息，并且在其消息中进一步增加支持 QoS 控制的内容。但是，上述方案节点的存储代价以及计算代价相对较大。AODV 和 DSR 协议的 QoS 扩展多是在现有路由选择算法的基础上，由节点检测在其链路上 QoS 量度的改变，但是该 QoS 机制较为滞后和不精确。

8.2 全新的支持 QoS 的路由选择算法

上述原有路由协议的 QoS 扩展机制无法较好地实现服务质量保证，因此学者提出全新的支持 QoS 的路由选择算法以及全新的服务质量感知路由。根据服务质量路由与 MAC 层以及 MAC 协议之间的关系，可以将全新的服务质量感知路由分为以下 3 种[55]：竞争空闲的服务质量感知路由、竞争性服务质量感知路由和独立服务质量感知路由。下面逐一介绍各种服务质量感知的路由选择算法。

竞争空闲的 QoS 控制路由要求各移动节点能够估计无线链路的可用带宽并且预留可用的带宽资源，从而需要例如 TDMA 的竞争空闲的 MAC 机制。由于网络的吞吐量很大程度上依赖于节点在 MAC 层上获得的传送机会，因此该机制首先需要测量传送机会，也就是节点的可用频道容量。在其路由选择算法中，根据每个节点的可用频道容量，计算路径上的可用频道容量。将路径上的可用频道容量用于执行数据会话控制，仅仅接受具有充足容量的路径的数据会话。Chiu 等学者提出了竞争空闲机制下的带宽受限的路由选择算法[56]，其根据邻居节点和两跳邻居节点的信息，将可用带宽表述成为上述信息的多项式，然后对各个路由的可用带宽进行评估，从而实现带宽的最优利用。该算法通信负担和计算负担较重。

竞争性 QoS 路由建立在竞争性 MAC 协议之上，其路由选择算法根据可用的竞争资源或者可以获得的性能进行估算，然后根据估算的结果进行路由选择。Cheng-Fu Chou 等提出一种基于拓扑控制的服务质量感知路由协议 TLQR[57]，该协议的路由选择算法使用拓扑控制信息进行协议交互，以确保通信的端对端带宽并且增强了整个网络的使用效率。每个节点可以本地化地构建适宜的网络拓扑结构，从而维持本地信息以评价节点的可用带宽，然后将每个节点的传送区域划分为不同能量传送区域，适当地调节每个节点的能量级别，使整个网络的吞吐量得以提高。该协议考虑了无线信道、带宽和延迟的限制以及节点的移动性，但是，每个节点需要构建网络拓扑结构，从而耗费较高的资源。

独立 QoS 控制路由不需要 MAC 层的支持。Wang 等学者提出建立在实时传输协议 RTP 基础之上的基于应用的服务质量感知路由 AAQR[58]。其通过检测两节点间的 RTP 包和传送的时间戳之间的差异，估算两节点之间的延迟，根据该延迟进行路由选择。上述算法使用了现有的传输层的包，服务质量感知路由的实现过程中没有产生额外的开销；并且充分考虑了流量和带宽的要求。但是，该算法使用了 RTP 协议，因此其应用范围受到一定限制。

综上所述，学者对服务质量感知的路由选择算法的研究主要有两条思路：原有路由协议的 QoS 扩展和新的 QoS 路由选择算法。总体而言，MANET 的服务质量感知路由研究问题主要集中在面向能耗和降低计算负担。竞争性的 QoS 控制路由、竞争空闲的 QoS 路由和一些现有路由协议的 QoS 扩展机制的实现仍然需要链路层的支持。此外，如何构建节能的独立服务质量感知的路由选择算法值得深入研究。

9 支持安全控制的路由选择算法

DSDV 协议和 AODV 协议等在设计时没有考虑到网络安全问题，因此带来了网络安全风险。目前，提供安全控制的 MANET 路由选择算法主要分为两种：一种是对现有的 MANET 路由协议进行优化，即原有路由协议的安全扩展；另一种是全新的安全路由选择算法。

9.1 原有路由协议的安全扩展

PJihye 等学者提出了安全路由查找协议 SRDP[59]。其在路由选择过程中采用加密信息验证码或者电子签名进行验证。该协议根据下述情况判断使用加密信息验证码或者电子签名：如果成对密钥的预先分配是可能的，则采用加密信息验证码，除非下述两个问题的回答也为肯定；如果中间结点需要验证路由完整性，则必须采用签名；如果禁止拒绝是重要的，则必须采用签名；如果不存在公钥架构，则加密信息验证码或者公钥签名都可以使用；如果计算成本是主要的问题，则加密信息验证码更为优越。该方法简便易行，并且计算的时间复杂度和空间复杂度不高，但是需要预知一些信息，如成对密钥的预先分配是否可能，计算成本是否重要等。

Manel 等在 AODV 协议的基础上提出 SAODV 协议[60]，其使用电子签名验证路由请求 RREQ 和路由回复 RREP，并且使用哈希链对跳数信息进行加密。Stenphan 等则提出基于 AODV 协议的安全路由协议 AODV-SEC[61]，其使用安全控制器代替 AODV 协议中的控制器。该安全控制器探测安全性并且运行相应的机制验证包或者对包加密。每个加密包也使用加密包回复。如果接收到未加密包，控制器需要确定对其处理还是将其丢弃。该协议使用公钥基础设施 PKI 在结点级别上进行验证，并且使用 PKI 提供的证书进行验证。

综上所述，DSR 协议和 AODV 协议的安全扩展使用路由选择消息进行加密，防止路由选择消息被篡改或者非法访问，从而使得路由协议具备安全的功能，但上述协议多数具有较高的时间复杂度和较高的能耗。该方面的研究重点在于时间代价和能耗较低的路由选择消息加密技术。

9.2 全新的安全路由选择算法

上述原有路由协议的安全扩展机制无法较好地实现安全保证，因此学者提出全新的安全路由选择算法，该方法的关键是同时实现快速路由和安全管理。

Zhi 等提出针对意图窃取信息的被动攻击进行防范的多路径路由选择算法[62]。首先源结点生成路由请求 RREQ 包；接着源结点向传送范围内的所有结点广播 RREQ；然后邻居结点把 RREQ 转送其他结点，中间结点通过检测广播 ID 判断重复的 RREQ 并将其丢弃；最后目的结点在第一次接收到 RREQ 时生成路由回复 RREP 包，并沿着相逆路径将 RREP 单播传送回源路由；并且目的结点接收 RREQ 的其他副本时，检测其是否是不通的路径并且存储不同路径的信息。该算法的特点是：源结点适应性地选择可用路由，而不是一个接一个测试在路由表中存储的路由，主动 TCP 会话不是固定不变的，而是随时间动态改变的；目的结点定期传送检测包以确保该路径仍然有效，当发现在数据安全方面更好的路径时，源结点适应性地选择该路径代替原路径。该协议提供了较好的安全性能，但是目的结点需要定期传送检测包，从而增加了网络负担。

上述协议网络负担较高，因此有学者提出基于安全级别的适应性模糊逻辑路由协议 FLSL[63]，用以确定 MANET 的各个移动结点的安全级别；接着基于模糊逻辑运算对路径进行比较并且确定最佳安全级别的路由路径。该协议将模糊逻辑引入路由协议中，实现了最佳安全级别的路由路径的确定，但是其具有较高的时间复杂度。为了进一步加强安全级别，有学者将密钥技术引入 MANET 的路由选择算法中，并且提出了 Ariadne 协议[64]，其基于高效的对称密钥进行路由选择。

从上述分析可以看出，学者对于安全路由选择算法的研究主要有两条思路：现有路由协议的安全扩展和新的安全路由选择算法。总体而言，MANET 的安全路由选择算法的研究主要集中在降低计算负担的前提下实现高速路由和安全路由。该问题的关键在于选择合适的数学模型支持安全要求。

10 现有研究成果的综合比较

下面从网络的动态性、规模、延迟性要求、层次化以及节点是否配备定位装置等方面，对本文所研究的 30 余种路由选择算法的适用范围进行比较，如表 1 所列。可以看出，表驱动的路由选择算法多适用于规模较小并且动态性不强的 MANET；按需的路由选择算法多适用于动态性较强的 MANET；混合路由的路由选择算法则适用于节点计算能力较强并且规模较大的 MANET；基于预测的路由选择算法多应用于动态性较强的 MANET 以及层次化的 MANET；面向能耗的路由选择算法多应用于大规模的 MANET；基于位置的路由选择算法多应用于规模较小并且动态性较强的 MANET；服务质量感知的路由选择算法和支持安全的路由选择算法则是特定应用的需要。

表 1 路由选择算法的适用范围比较

Protocol	Application areas
DSDV[5]	Topology aware, node moving not frequently, low scalability
WRP[6]	Topology aware, node moving not frequently, low scalability
CGSR[7]	Topology aware, hierarchical networks, high scalability, moving frequently
OLSR[8]	Topology aware, hierarchical networks, high dense
HOLSR[9]	Topology aware, hierarchical networks, high scalability
DSDV-MC[10]	Topology aware, high scalability, parallel routing
DSR[12]	Topology aware, node moving frequently, low scalability, delay not aware, data loss tolerance
AODV[13]	Topology aware, query-driven MANET, node moving frequently, delay not aware
ZRP[14]	Topology aware, hierarchical networks, high scalability
Gossip[16]	Node moving not frequently, low scalability, delay not aware
Stochastic[17]	Node moving not frequently, high scalability, delay not aware
TORA[19]	Node moving not frequently, low scalability, delay not aware, energy not aware
ABR[20]	Node moving not frequently, low scalability, delay not aware, energy not aware
Corsac[22]	Topology aware, security aware, node knowing neighbor's location
Multiclass[23]	Topology aware, hierarchical networks, high scalability
CR[25]	High scalability, low dense, node moving not frequently
Hop ID[26]	High scalability, low dense, node moving not frequently
COB[27]	Topology aware, hierarchical networks, high scalability
FSR[31]	Topology aware, node moving frequently, low scalability
DREAM[34]	Topology aware, node moving frequently, low scalability, node knowing neighbor's transmission speed
MDUR[35]	Topology aware, node moving frequently, high scalability
TRANSFER[42]	Topology aware, hierarchical networks, high scalability, energy aware
PBM[45]	Topology aware, energy aware, hierarchical networks, high scalability
GOAFR+[48]	Position aware, node moving frequently, low scalability, delay not aware, data loss tolerance
QOLSR[52]	QoS aware, delay aware, hierarchical networks, high dense, real time aware
QoS AODV[53]	QoS aware, delay aware, query-driven MANET, node moving frequently
Fuzzy[54]	QoS aware, delay aware, node moving frequently, low scalability
BCRP[56]	QoS aware, bandwidth constraint, node knowing two hop neighbor's transmission speed

TLQR[57]	QoS aware, delay aware, energy aware, node moving frequently
AAQR[58]	QoS aware, delay aware, low scalability
SAODV[60]	Security aware, low scalability, node moving not frequently
AODV-SEC[61]	Security aware, low scalability, node moving not frequently
FLSL[63]	Security aware, topology aware, low scalability, high dense
Ariadne[68]	Security aware, topology aware, high scalability, high dense, node moving not frequently

如上所述，学者提出了大量的路由选择算法，并且这些路由选择算法具有多样性的特点，难以采用单一标准进行比较，因此需要进行多方面的衡量[65]。本文对所介绍的各种路由选择算法的性能与特点进行评价与比较，并加以总结。评价标准包括算法性能、最优路径标准、关键节点，其中算法性能主要包括路由选择算法的节点计算负担、通信负担、存储负担等性能。在此基础上，根据路由表项的产生时间、协议交互信息的类型、路径向量存储的位置、数据传输过程中采用路径的数量以及节点是否存在层次结构，结合本文第 2 节提出的分类，对主要路由选择算法的特点加以分类介绍，如表 2 所列。

表 2　路由选择算法的性能与特点比较

Protocol	Computation overhead	Communication overhead	Storage overhead	Optimal path	Critical node	The time of route table establishment	Interactive information	Number of path	Hierarchy structure
DSDV[5]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding table	Shortest	No	Table-driven	Distance vector	Single-path	Flat
WRP[6]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding table, distance table, cost table, transmition table	Shortest	No	Table-driven	Distance vector	Single-path	Flat
CGSR[7]	Neighbor's distance in each cluster	Flooding data	Forwarding table, cluster table	Shortest	Cluster head	Table-driven	Distance vector	Single-path	Hierarchical
OLSR[8]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding table	Shortest	Transmitting node	Table-driven	Link state	Single-path	Flat
HOLSR[9]	Neighbor's distance in each cluster	Flooding data	Forwarding table, cluster table	Shortest	Cluster head	Table-driven	Link state	Single-path	Hierarchical
DSDV-MC[10]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding table, controlling table	Shortest	No	Table-driven	Distance vector	Single-path	Flat
DSR[12]	Neighbor's distance	Flooding data	Source, event	Reply message earliest	No	On-demand	Path vector (distributed routing)	Single-path	Flat
AODV[13]	Neighbor's distance	Flooding data	Routing table, source, event	Reply message earliest	No	On-demand	Distance vector	Single-path	Flat
ZRP[14]	No	Flooding data	Forwarding table, source, event	Shortest	No	Hybrid	Distance vector	Single-path	Flat
Gossip[16]	Neighbor's distance	Transmiting gossip	Gossip	Shortest	No	On-demand	Path vector (distributed routing)	Single-path	Flat
Stochastic[17]	Neighbor's distance, Transmitting possibility	Flooding data	Source, event	Reply message earliest	No	On-demand	Path vector (source routing)	Single-path	Flat
TORA[19]	Neighbor's energy	Informing neighborsthe energy	Neighbor's energy, source, event	Highest energy	No	On-demand	Link state	Single-path	Flat
ABR[20]	Associativity	Associativity of nodes and links	Associativity of nodes and links, source, event	Highest associativity	No	On-demand	Link state	Single-path	Flat
Corsac[22]	Neighbor's distance	Flooding data	Source, event, forwarding message	Reply message earliest and securely	No	On-demand	Link state	Single-path	Flat
Multiclass[23]	Neighbor's distance, nodes' energy	Flooding data	Nodes' energy, source, event	Reply message earliest	B-node	On-demand	Distance vector	Multi-path	Hierarchical
CR[25]	Neighbor's distance, the dense of cells	Flooding data	The dense of cells, forwarding message	Reply message earliest	Cluster head	Hybrid	Distance vector	Single-path	Hierarchical
HopID[26]	Neighbor's HopID	Neighbor's HopID	Forwarding table	The least value of HopID	Landmark node	Table-driven	Distance vector	Multi-path	Hierarchical
COB[27]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding message, transmitting time	Reply message earliest	Cluster head	On-demand	Path vector (source routing)	Single-path	Hierarchical
FSR[31]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding table	Shortest	Nearest node	Table-driven	Path vector (distributed routing)	Multi-path	Flat

DREAM[34]	Neighbor's distance, moving speed	Flooding data	Forwarding table Speed table	Shortest	Node with largest speed	On-demand or table-driven or hybrid	Distance vector	Single-path or multi-path	Flat
MDUR[35]	Neighbor's distance	Flooding data	Forwarding table	Shortest	No	On-demand or table-driven or hybrid	Distance vector	Single-path or multi-path	Flat
TRANS-FER[42]	Neighbor's distance in R hops	Flooding data	Forwarding table, source, event	Shortest and energy consump-tion least	No	On-demand	Link state	Single-path	Flat
PBM[45]	Neighbor's distance in each cluster	Flooding data	Forwarding table, cluster table	Shortest and energy consump-tion least	Cluster head	On-demand	Link state	Single-path	Hierarchical
GOAFR+[48]	Neighbor's distance	Gossip	Position information	Shortest	No	On-demand	Link state	Single-path or multi-path	Flat
QOLSR[52]	Neighbor's distance, delay, bandwidth	Flooding data	Forwarding table, delay, bandwidth	Shortest and QoS	No	Table-driven	Link state	Single-path	Flat
QoS AODV[53]	Neighbor's distance, delay, bandwidth	Flooding data	Forwarding table, delay, bandwidth, delay-constraint source nodes table, bandwidth-constraint source nodes table	Shortest and QoS	No	On-demand	Distance vector	Single-path	Flat
Fuzzy[54]	Neighbor's distance, delay, bandwidth	Flooding data	Forwarding table, delay, bandwidth	Shortest and QoS	No	On-demand	Path vector (distributed routing)	Multi-path	Flat
BCRP[56]	Neighbor's distance in 2 hops, bandwidth	Flooding data in 2 hops	Forwarding table, bandwidth	Shortest and QoS	No	On-demand or table-driven or hybrid	Link state	Single-path or multi-path	Flat
TLQR[57]	Neighbor's distance, bandwidth, nodes' energy	Flooding data	Forwarding table, Bandwidth, nodes' energy	Shortest and QoS	No	On-demand	Path vector (distributed routing)	Single-path or multi-path	Flat
AAQR[58]	Neighbor's distance, delay	Flooding data	Forwarding table, delay	Shortest and QoS	No	On-demand	Path vector (distributed routing)	Multi-path	Flat
SAODV[60]	Neighbor's distance, Hash function	Flooding data	Forwarding table, Hash function	Shortest and secure	No	On-demand	Distance vector	Single-path	Flat
AODVSEC[61]	Neighbor's distance, Hash function	Flooding data	Forwarding table, Hash function	Shortest and secure	No	On-demand	Distance vector	Single-path	Flat
FLSL[63]	Neighbor's distance, fuzzy calculation	Flooding data	Forwarding table	Shortest and secure	No	On-demand	Path vector (distributed routing)	Single-path	Flat
Ariadne[64]	Neighbor's distance, secret key calculation	Flooding data	Forwarding table	Shortest and secure	No	On-demand or table-driven or hybrid	Distance vector	Single-path or multi-path	Flat

结束语 由于 MANET 具有高动态性并且节点能量有限，与传统网络具有较大差异，因此必须开发新的路由选择算法。本文首先介绍了基本路由机制与各种分类方法。接着，综述了路由协议和基本路由选择算法。然后，从预测模型、能量模型、位置信息、服务质量控制和安全支持等 5 个方面，深入分析了当前 Ad Hoc 网络路由选择算法的最新研究进展。预测模型通过基于历史信息的移动预测，降低了路由选择的时间代价。能耗模型则着重采用适当的数学模型来描述网络能耗情况，在选路过程中实现了分组传送的能耗最小化和能量负担均衡之间的权衡。基于位置的路由选择算法根据节点的地理位置标识目的地，并利用该地理位置信息进行路由选择；服务质量感知路由的路由选择算法在本地计算中考虑带宽、延迟、能量和电池生命周期的高速路由，同时支持服务质量保证机制。安全路由选择算法则利用适合 MANET 的密钥、哈希链、电子签名等对协议交互的消息进行加密，在路由选择过程中实现保障网络安全。

在 MANET 的基本路由选择算法中，协议交互中的洪泛操作带来了较重的数据传送负担和节点计算负担，并且本地计算中仅仅以跳数作为路由选择的标准无法选择最优路由，因此，如何降低洪泛操作带来的负担以及如何设计更为全面的路由选择标准是研究热点最为集中的领域，即路由选择的策略和路由选择的标准是研究热点。区分稀疏网络和稠密网络并且分别设计路由选择策略是一个很好的思路。在洪泛操作的优化方面，流言机制与概率模型的结合提供了很好的研究思路，学者在此基础上提出了基于预测的路由选择算法。因此，需要对流言机制与概率模型的结合以及二者在 MANET 中的应用加以深入研究。路由选择的标准应当是多个指标综合考虑的结果，因此路由评价应当与跳数、吞吐量、可靠性、拥塞控制和能耗结合在一起加以研究。由于 MANET 的能量有限性对其应用产生了很大的局限作用，因此尤其需

要对路由评价与面向能耗相结合加以研究，进一步提出面向能耗的路由选择算法。

在基于预测的路由选择算法方面，如何设计时间代价较低并且更新及时的基于预测的路由选择算法，具有较好的研究前景。该问题的关键是建立较好的预测模型，基于节点历史行为的描述对路由的变化加以预测。MANET 所具有的高度动态性使得上述预测模型的建立存在一定困难。但是，MANET 节点能量有限，因此需要充分考虑预测模型的时间代价和空间代价。例如将人工智能领域中的时间代价较低并且空间要求不高的预测模型（如遗传算法等）应用在基于预测的路由选择算法中，或者考虑将人工智能领域中的常见预测模型进行改进，使之在面向能耗的前提下支持 MANET 的高度动态性。另外，根据 MANET 的具体应用的要求，可以采用不同的预测模型，比如针对规模大的 MANET 设计分层次的预测模型，针对高度动态的 MANET 设计反馈及时的预测模型，针对具有服务质量要求的 MANET 设计考虑带宽和延迟的预测模型等。

由于 MANET 节点使用自身带有的电池或者其他易损耗的能源作为能量提供源，能量非常有限，因此面向能耗的路由选择算法具有良好的研究前景。该问题的研究重点在于节点能耗的降低。该能耗降低的主要方法在于基于节点移动信息的共享和网络流量信息的预测，选择合适的数学模型描述能耗情况并加以优化。另外，数据包传送所造成的能耗的最小化和能量负担的均衡之间的权衡，尤其是适应于特定应用的权衡公式值得进一步研究。其主要思路在于针对特定应用确定能耗优化以及均衡的解决方案。还有，针对大规模 MANET 可以建立层次化的面向能耗的路由选择算法。

对于服务质量感知的路由选择算法而言，面向能耗和降低计算负担是研究重点。其中，独立服务质量感知路由的路由选择算法时间复杂度相对较低，并且无需链路层的支持，具有更为广阔的应用前景。如何在保证服务质量的基础上，构建运算负担较低并且能量消耗较低的独立服务质量感知路由以及相应的路由选择算法，值得深入研究。

安全路由选择算法可同时实现高速路由和安全保证。在降低计算负担的前提下实现高速路由和安全路由，是 MANET 的安全路由技术的研究重点。该问题的关键在于选择计算开销降低的数学模型支持安全要求，因此适应于高动态性特点的数学模型以及相应的安全路由选择算法值得深入研究。另外，由于 MANET 中节点的存储能力和计算能力有限，如何构建适应 MANET 特点的密钥、哈希链、电子签名也值得深入研究。

参 考 文 献

[1] Murphy A L, Roman G-C, Varghese G. An exercise in formal reasoning about mobile communications[C]// IEEE Ninth International Workshop on Software Specification and Design. 1998: 25-33

[2] Oriana R, Tamer N, Cristian B, et al. Context-aware migratory services in Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(12): 1313-1328

[3] Giordano S, Biagioni E. Topics in ad hoc and sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(4): 68

[4] Royer E M, Toh Chai-Keong. A review of current routing protocols for Ad Hoc mobile wireless networks[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(2): 46-55

[5] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing(DSDV) for mobile computers[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 234-244

[6] Murthy S, Garcia-Luna-Aceves J J. An efficient routing protocol for wireless networks[J]. ACM Mobile Networks and Applications, 1996, 1(2): 183-197

[7] Chiang C-C. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel[C]// The IEEE Singapore International Conference on Networks, 1997 (SICON'97). 1997: 197-211

[8] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing (OLSR). IETF RFC 3626, 2003 [OL]. http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt

[9] Villasenor-Gonzalez L, Ge Ying, Lament L. HOLSR: a hierarchical proactive routing mechanism for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(7): 118-125

[10] Lee U, Midkiff S F, Park J S. A proactive routing protocol for multi-channel wireless ad-hoc networks (DSDV-MC)[C]// International Conference on Information Technology: Coding and Computing, 2005(ITCC 2005). 2005, 2(4-6): 710-715

[11] Lee U, Midkiff S F. OLSR-MC: A proactive routing protocol for multi-channel wireless ad-hoc networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006 (WCNC 2006). 2006, 1: 331-336

[12] Johnson D B, Maltz D A, Broch J. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4. RFC 4278 [OL]. http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt

[13] Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing[C]// IEEE WMCSA'99. 1999: 197-211

[14] Pearlman M R, Haas Z J. Determining the optimal configuration for the zone routing protocol[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Wireless Ad Hoc Networks, 1999, 17(8): 1395-1431

[15] Dai Fei, Wu Jie. Proactive route maintenance in wireless ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Communications, 2005(ICC 2005). 2005, 2(16-20): 1236-1240

[16] Shavitt Y, Shay A. Optimal routing in gossip networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(4): 1473-1487

[17] Lott C, Teneketzis D. Stochastic routing in ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(1): 52-70

[18] Haas Z J, Halpern J Y, Li Li. Gossip-based ad hoc routing[J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2006, 14(3): 479-491

[19] Park V D, Corson M S. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks[C]// IEEE INFOCOM'97. 1997, 3: 1405-1413

[20] Toh C-k. A novel distributed routing protocol to support ad-hoc mobile computing[C]// 1996 IEEE 15th Annual International Phoenix Conference Computing and Communications. 1996: 480-486

[21] Awerbuch B, Holmer D, Rubens H, et al. Provably competitive adaptive routing[J]. IEEE INFOCOM, 2005, 1(13-17): 631-641

[22] Zhong Sheng, Li Li, Liu Yanbin, et al. On designing incentive-compatible routing and forwarding protocols in wireless ad-hoc

networks[C]// IEEE Mobicom'05. 2005:117-131

[23] Du Xiaojiang, Wu Dapeng, Liu Wei, et al. Multiclass routing and medium access control for heterogeneous mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1):270-277

[24] Wu J, Yang S, Dai F. Logarithmic Store-Carry-Forward Routing in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(6):735-748

[25] Du Xiaojiang, Wu Dapeng. Adaptive cell relay routing protocol for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1):278-285

[26] Zhao Yao, Chen Yan, Li Bo, et al. Hop ID: a virtual coordinate based routing for sparse mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(9):1075-1089

[27] Ritchie L, Yang H S, Richa A W, et al. Cluster overlay broadcast (COB): MANET routing with complexity polynomial in source-destination distance[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6):653-667

[28] Eriksson J, Faloutsos M, Krishnamurthy S V. DART: Dynamic address routing for scalable ad hoc and mesh networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(1):119-132

[29] Mao Shiwen, Kompella S, Hou Y T, et al. Routing for concurrent video sessions in ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1):317-327

[30] Tran D A, Raghavendra H. Congestion adaptive routing in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(11):1294-1305

[31] Jacquet P, Muhlethaler P, Clausen T, et al. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks[C]//Proceedings of IEEE International Multi Topic Conference 2001(INMIC '01). 2001: 62-68

[32] Yu Xin. Distributed cache updating for the dynamic source routing protocol[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6):609-626

[33] Garcia-Luna-Aceves J J, Spohn M. Source-tree routing in wireless networks[C]// The 7th IEEE International Conference on Network Protocols(ICNP'99). 1999:273-282

[34] Basagni S, Chlamtac I, Syrotiuk V R, et al. A distance routing effect algorithm for mobility(DREAM)[C]// The 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom'98). 1998:76-84

[35] Abolhasan M, Wysocki T, Lipman J. A new strategy to improve proactive route updates in mobile ad hoc networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005, 5:828-837

[36] Jiang Shengming, He Dajiang, Rao Jianqiang. A prediction-based link availability estimation for routing metrics in MANETs[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(6): 1302-1312

[37] Guo Zhihao, Behnam M. Predictive Multiple Metrics in Proactive Mobile Ad Hoc Network Routing[C]// 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, 2007(LCN 2007). 2007:15-18

[38] Pham V, Larsen E, Ovsthus K, et al. Rerouting Time and Queueing in Proactive Ad Hoc Networks[C]// IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference 2007(IPCCC 2007). 2007:160-169

[39] Rodoplu V, Meng T. Minimum energy mobile wireless networks[J]. IEEE Journal of Selected Areas Communications, 1999, 17(8):1333-1344

[40] Toh C, Cobb H, Scott D. Performance evaluation of battery-life aware routing schemes for wireless ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Communications 2001(ICC 2001). 2001, 1:2824-2829

[41] Lin L, Shroff N, Srikant R. Asymptotically optimal power-aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources[C]// Proc. IEEE INFOCOM 2005. 2005, 2:1262-1272

[42] Helmy A. Contact-extended zone-based transactions routing for energy-constrained wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(1):307-319

[43] Liang B, Haas Z J. Hybrid routing in ad hoc networks with a dynamic virtual backbone[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6):1392-1405

[44] Zhao Qing, Tong Lang, David C. Energy-aware adaptive routing for large-scale ad hoc networks: protocol and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(9): 1048-1059

[45] Baek S J, de Veciana G. Spatial energy balancing through proactive multipath routing in wireless multihop networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(1):93-104

[46] Mauve M, Widmer J, Hartenstein H. A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Network, 2001, 15(6):30-39

[47] Rao A, Ratnasamy S, Papadimitriou C, et al. Geographic routing without location information[C]// MobiCom'03. September 2003

[48] Kuhn F, Wattenhofer R, Zhang Yan, et al. Geometric ad-hoc routing: of theory and practice[C]// Proceedings of the 22nd ACM Symposium on the Principles of Distributed Computing (PODC). 2003

[49] Kuruvila J, Nayak A, Stojmenovic I. Hop count optimal position-based packet routing algorithms for ad hoc wireless networks with a realistic physical Layer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(6):1267-1275

[50] Park T, Shin K G. Optimal tradeoffs for location-based routing in large-scale ad hoc networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(2):398-410

[51] Lee S, Bhattacharjee B, Banerjee S. Efficient geographic routing in multihop wireless networks[C]// ACM Mobihoc'05. May 2005:25-27

[52] Badis H, Agha A K. QOLSR multi-path routing for mobile ad hoc networks based on multiple metrics: bandwidth and delay [C]// IEEE 59th Vehicular Technology Conference 2004(VTC 2004). 2004, 4:2181-2184

[53] Li P J, Mohapatra P P. PANDA: a novel mechanism for flooding based route discovery in ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2006, 12(6):771-787

[54] Zhang Xu, Cheng Sheng, Feng Mei-yu, et al. Fuzzy logic QoS dynamic source routing for mobile ad hoc networks[C]// The Fourth International Conference on Computer and Information Technology, 2004(CIT '04). 2004:652-657

(下转第 38 页)

物及相关信息；

步骤6 “库存检查服务”逻辑根据服务请求内容，执行查询，得出“有货物”及“数量”或者“无货物”等结果信息，然后，将查询结果提供给“请领单服务”；

步骤7 “请领单服务”根据查询结果，形成回执，提供给“用户终端服务”；

步骤8 “用户终端服务”结合用户的个性化信息，将结果进行过滤和封装，以恰当的方式显示在用户设备上。

对这个请领业务进行测试的输入和输出都是一个包含SOAP消息数据的XML文件。经测试，采用合法用户ID，上述智能请领服务可以较好地完成可信接入智能空间，并执行请领功能；采用非法用户ID，则提示无法进行请领。合法用户的请领过程如图5所示。图5中，合法用户填写请领信息后，系统就可以通过服务组合与集成的方式完成相应的功能，获得请领结果。实验表明，“用户终端服务”、“安全服务”、“请领单服务”和“库存检查服务”4个服务功能模块能够较好地进行集成和协作，初步验证了我们提出的基于SOA的可信智能空间系统软件模型是有效的。

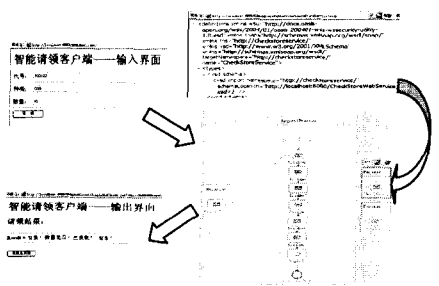


图5 智能请领服务”系统实现示意图

结束语 基于SOA的可信智能空间系统模型为构建智能空间提供了一般性的设计方案，其具有良好的伸缩性和系统的安全性，有利于智能空间的不断丰富和扩展。下一步将深入验证该模型在大型复杂智能空间中的适应性。

参 考 文 献

[1] Rosenthal L, Stanford V. NIST Information Technology Laboratory Pervasive Computing Initiative[C]// Proceedings of IEEE 9th International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. NIST, USA, 2000: 30-36

[2] Chen Enyi, Shi Yuanchun, Zhang Degan, et al. Intelligent Meeting Room: Facilitating Collaboration for Multi Mobile Devices on Contextual Information[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. 2003: 82-87

[3] Saif U, Pham H, Paluska J M, et al. A Case for Goal-oriented Programming Semantics[C]// Proceedings of System Support for Ubiquitous Computing Workshop at the 5th Annual Conference on Ubiquitous Computing. 2003: 74-83

[4] Tesauro G, Chess D M, Walsh W E, et al. A Multi-Agent Systems Approach to Autonomic Computing[C]// Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'04). Vol. 1, New York, USA, 2004: 464-471

[5] Web Services Security Specifications Index Page. (URL: http://msdn2. microsoft. com/en-us/library/ms951273. aspx)

[6] JBI(Java Business Integration)模型(URL: http://java. sun. com/integration/)(2008-12 Updated)

[7] 徐涵. Understanding SOA with Web Services(中文版)[M]. 2006

[8] Crowley J L. Context Driven Observation of Human Activity[C]// Proceedings of the European Symposium on Ambient Intelligence. 2003, 11: 101-118

[9] XML-Encryption(URL: http://www. w3. org/Encryption/)

[10] XML-Signature (URL: http://www. w3. org/Signature/)

[11] Yang Qiuwei, Wu Sunyong, Hong Fan, et al. Authorization Management Framework Based on Joint Trust-Risk Evaluation [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2007, 12 (1): 9-12

(上接第22页)

[55] Hanzo L Ⅱ, Tafazolli R. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks[J]. IEEE communications survey & tutorials, 2007, 9(2): 50-70

[56] Chiu Chun-Yuan, Kuo Yu-Liang, Hsiao-Kuang W E, et al. Bandwidth-constrained routing problem in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(1): 4-14

[57] Chou C-F, Suen H-P. Topology - control - based QoS Routing (TLQR) in wireless ad hoc networks[C]// IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2006: 1-4

[58] Wang M, Kuo G S. An application-aware QoS routing scheme with improved stability for multimedia applications in mobile ad hoc networks[C]// Proceedings of IEEE vehicle Technology Conference. 2005: 1901-1905

[59] Kim P J, Tsudik P G. SRDP: securing route discovery in DSR [C]// Proceedings of the Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services 2005. 2005: 247-260

[60] Zapata M G. Secure ad hoc on-demand distance vector routing [J]. IEEE Mobile Computing and Communications Review, 2006, 6(3): 106-107

[61] Eichler S, Roman C. Challenges of secure Routing in MANETs: A Simulative Approach using AODV-SEC[C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS2006). 2006: 481-484

[62] Li Zhi, Kwok Yu-Kwong. A new multipath routing approach to enhancing TCP security in ad hoc wireless Networks[C]// Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops(ICPPW'05). 2005: 372-379

[63] Jin Lu, Zhang Zhongwei, Lai D, et al. Implementing and evaluating an adaptive secure routing protocol for mobile ad hoc network[C]// IEEE Wireless Telecommunications Symposium, 2006(WTS '06). 2006: 1-10

[64] Hu Yih-Chun, Perrig A, Johnson D B. Ariadne: a secure on-demand routing protocol for ad hoc networks[J]. IEEE Wireless Networks, 2005, 11(1/2): 21-38

[65] 周满元，周力为. 基于不同源节点数目的AODV路由协议的性能比较研究[J]. 计算机工程与应用，2007，43(18)：94-96