

IPv6 无线传感器网络低功耗路由算法^①

李 昌^{1,2}, 韩卫光², 史菲菲^{1,2}, 贺宝岳^{1,2}

¹(中国科学院研究生院, 北京 100039)

²(中国科学院 沈阳计算技术研究所, 沈阳 110168)

摘要: 为满足 IPv6 无线传感器网络低功耗的要求, 采用适配层路由, 在 LOAD 路由协议基础上提出一种简化的按需式路由算法。本算法采用精简的路由控制报文、路由表和路由请求表, 简化了路由发现过程, 优化了路由维护机制。仿真实验表明, 该算法能有效的降低 IPv6 无线传感器网络的功耗。

关键词: 无线传感器网络; IPv6; 适配层路由; 低功耗; LOAD

IPv6 Wireless Sensor Network Low Power Consumption Routing Algorithm

LI Chang^{1,2}, HAN Wei-Guang², SHI Fei-Fei^{1,2}, HE Bao-Yue^{1,2}

¹(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100139, China)

²(Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to meet the low power requirement of IPv6 wireless sensor network, this paper adopted the adaptation layer routing. Based on the LOAD Protocol, the paper proposed a simplified on-demand routing algorithm. The algorithm adopts simplified routing control messages, routing table and route request table. In addition, the algorithm simplifies the route discovery process and optimizes the route maintenance mechanism. The simulation results show that this algorithm can reduce the power consumption of the IPv6 wireless sensor network effectively.

Key words: wireless sensor network; IPv6; the adaptation layer routing; low power consumption; LOAD

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成一个多跳的自组织的网络系统, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息, 并发送给观察者。由于无线传感器网络是一门新兴技术, 国内和国外水平的差距并不大, 及时开展这项研究有着巨大的战略意义。

IPv6 作为下一代网络的核心协议, 具有地址资源丰富、地址自动配置、安全性高和移动性好等优点, 若能融入到无线传感器网络中来, 实现 IPv6 和 WSN 的结合, 将为最终实现物联网走出坚实一步。

IEEE 802.15.4 标准的网络特征与无线传感器网络存在许多相似之处, 很多研究机构把它作为无线传感器网络的通信平台。IETF 于 2004 年成立 6LoWPAN 工作组, 主要研究在 IEEE 802.15.4 上实现 IPv6 协议

栈。考虑到无线传感器网络节点资源有限, 要在 WSN 上实现 IPv6 协议栈就必须对原 IPv6 协议进行适当精简。此外, 由于 IPv6 数据报文支持的最小字节数(1280 字节)远大于 IEEE 802.15.4 帧所能包含的字节数(127 字节), 因此需要在网络层与 MAC 层之间加入适配层完成报文的分片重组等操作, 以实现 WSN 与 IPv6 的无缝连接^[1]。路由协议是协议栈的核心, 本文讨论的路由算法就是在适配层上实现的。

1 适配层路由

1.1 适配层路由

无线传感器网络与 IPv6 互连通信分为两部分: 一部分是 WSN 内部节点之间包括汇聚节点(sink)的通信; 另一部分是汇聚节点与 IPv6 外部网络的通信。内部通信不采用传统的网络层路由, 而是采用适配层路

① 收稿时间:2011-07-29;收到修改稿时间:2011-09-15

由，即路由协议在适配层实现，采用 MAC 地址来实现网内的路由查找和报文转发。适配层为网络层构造了一个透明的 MAC 层网络拓扑，使得 MAC 层多跳拓扑在网络层仍然是单跳的^[2]。

适配层路由协议不再完全依赖于 IPv6 地址，而是使用 MAC 层 16 位短地址或 EUI-64 位扩展地址。WSN 内部节点之间无论是多跳还是单跳，在网络层看来都是一跳的链路，网络层的一跳又对应适配层的多跳。如图 1 所示。

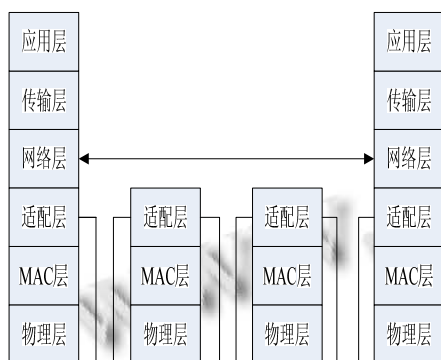


图 1 适配层路由

无线传感器网络是低功耗的网络，路由协议的设计要以减少功耗为前提。路由协议在适配层实现，转发节点只需在适配层对报文进行处理和转发，不用再进行适配层到网络层的处理，减少了网络层上的封装，并且无需对报文进行重组解压就可以根据 MAC 地址处理和转发，既提高了处理速度又降低了功耗。

1.2 路由拓扑结构

无线传感器网络的拓扑结构直接影响适配层路由协议的设计与实现。IEEE 802.15.4 网络根据设备所具有的通信能力，分为全功能设备 (full-function device, FFD) 和精简功能设备 (reduced-function device, RFD)。

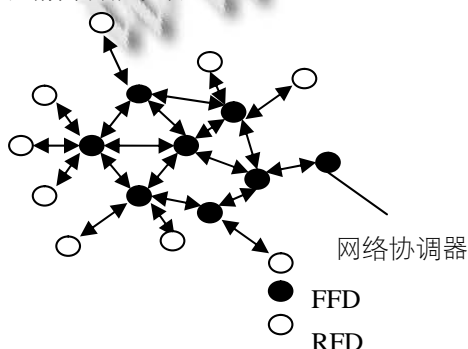


图 2 网状拓扑结构

RFD 只能和 FFD 通信，FFD 之间可以相互通信。本文采用网状拓扑结构，FFD 兼顾节点终端和路由转发功能，RFD 只作为节点终端，如图 2 所示。

1.3 Mesh 头部

由于 MAC 帧头部的目的地址仅能表示下一跳节点的目的地址，无法表示最终节点的目的地址，因此在适配层头部加入了 Mesh 头部来实现适配层的路由，格式如下：

10	V	F	Hops Left	Originator address	Destination address
----	---	---	-----------	--------------------	---------------------

V (1 位):

0-源地址 (Originator address) 为 EUI-64 位扩展地址

1-源地址 (Originator address) 为 16 位短地址

F (1 位):

0-目的地址 (Destination address) 为 EUI-64 位扩展地址

1-目的地址 (Destination address) 为 16 位短地址

Hops Left: 规定了报文转发跳数，每转发一次，剩余跳数减 1；当为 0 时，报文不再转发。

当中间节点无法转发报文时，当前节点应向 Mesh 头部字段中的源节点发送路由错误报文，通知最终目的地址不可达。

1.4 IPv6 报文处理

从网络层封装的 IPv6 报文，在适配层先进行 IPv6 报文压缩和分片，然后加上 Mesh 头部。

网络层提供报文的 IPv6 目的地址，并将地址填写在 IPv6 报文头部，根据目的 IPv6 地址找到网络层下一跳 IPv6 地址，由 IPv6 邻居发现协议得到 IPv6 地址对应的 MAC 地址，从而再将此 MAC 地址填入适配层 Mesh 头部目的地址字段。适配层再根据适配层路由算法，得到到达目的地址的下一跳 MAC 地址，并将该 MAC 地址填入 MAC 帧头部，将报文转发到下一跳节点。

在中间节点转发过程中，到达适配层的报文无需进行解压和重组操作，只需根据 Mesh 头部就可处理报文的转发。

2 路由算法

无线传感器网络节点能量有限、结构简单、处理能力低，针对这些特点，路由协议的设计要能够简单高效

地实现信息传输。由于原有 IPv6 路由协议是在网络层以上基于 IPv6 地址实现的，代码量大且实现复杂，因此对 IPv6 路由协议精简再移植到 WSN 上是不合适的。

IETF 提出了基于 AODV 的按需路由协议 LOAD，其基本思想是使用广播方式来查找路由，请求节点以广播方式向目的节点扩散路由请求报文，并由目的节点对该请求报文进行响应回复^[3]。

本文在 LOAD 路由协议基础上提出一种简化的按需式路由算法。

2.1 数据结构

2.1.1 路由控制报文

路由控制报文包括路由请求报文 RREQ、路由回复报文 RREP 和路由错误报文 RERR。报文格式如下：

type	D	O	reserved	RREQ ID	Destination address	Originator address
------	---	---	----------	---------	---------------------	--------------------

type (2 位)：

01-RREQ

10-RREP

D (1 位)：

0-Destination Address 为 EUI-64 地址

1-Destination Address 为 16 位短地址

O (1 位)：

0-Originator Address 为 EUI-64 地址

1-Originator Address 为 16 位短地址

reserved(4 位)：保留

RREQ ID (8 位)：源节点创建一个 RREQ 时，RREQ ID 加 1；目的节点收到 RREQ 后，RREP 取对应的 RREQ ID。

路由错误报文 RERR 格式如下：

type	D	reserved	unreachable Destination address	Fail packet ID
------	---	----------	---------------------------------	----------------

type (2 位)：11

D (1 位)：

0-unreachable Destination Address 为 EUI-64 地址

1-unreachable Destination Address 为 16 位短地址

reserved(5 位)：保留

unreachable Destination Address：不可达目的节点地址

Failing packet ID：第一个未成功发送的报文序列号

2.1.2 路由表和路由请求表

每个节点都维护着路由表和路由请求表。

路由表包括目的节点地址、下一跳地址。节点收到 RREQ 或 RREP 后，建立或更新反向路由。路由表采用 FIFO 队列的形式管理。路由表格式如下：

目的节点地址	下一跳地址

路由请求表包括源节点地址、RREQ ID、无效时间。节点收到 RREQ 后，将源节点地址和 RREQ ID 信息存入路由请求表。当时间超过无效时间后，路由请求表中的表项自动删除。

2.2 按需式路由

按需式路由是只在需要的时候才进行路由查找和维护。

当 IPv6 报文到达中间节点适配层时，先判断是否是广播报文，如果是，则向自己的邻居广播转发。否则，依据 Mesh 头部的目的地址查找路由表，若找到路由则转发此报文；若找不到路由，则备份此 IPv6 报文，根据 Mesh 头部信息创建并广播 RREQ 进行路由查找。

2.2.1 路由查找

RREQ 通过 IEEE 802.15.4 MAC 层广播传遍整个网络以发现目的节点。当节点收到 RREQ 时，先检查自己的路由请求表是否有相应的条目，若没有，创建一个新的表项。否则，丢弃该 RREQ^[4]。每个节点只接收最先到达该节点的 RREQ，之后重复收到的相同的 RREQ 都将会被丢弃，避免 RREQ 循环和重叠问题。RREQ 经过的每一个中间节点都会建立到达源节点的反向路由，此路由唯一且时间最短。路由表的目的地址为 RREQ 的源地址，下一跳地址为发送给此节点的上一个节点的 MAC 地址。若此节点不是目的节点，就再广播转发 RREQ^[5]。如图 3 所示。

当目的节点收到 RREQ 后，创建一个路由回复报文 RREP 并沿着获得的新路径反向单播给源节点；节点收到 RREP 后，检验是否与 RREQ 匹配，若不匹配，则丢弃 RREP。RREP 经过的每个中间节点均会建立到目的节点的路由，路由表目的地址为 RREP 源地址，下一跳地址为前一个发送 RREP 的节点的 MAC 地址。

只有目的节点才能构造 RREP，中间节点即便有到目的节点的路由，也会广播 RREQ，由此可避免无效 RREP 问题。当源节点收到 RREP 消息，就在源节点和目的节点之间建立了一条双向路由，源节点依据此路由发送备份的 IPv6 报文。如图 4 所示。

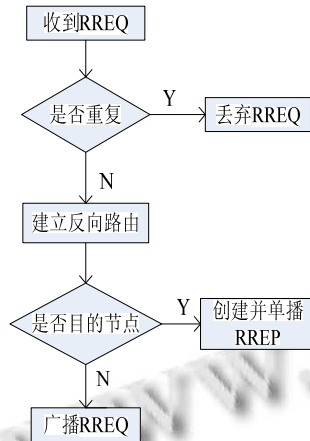


图 3 RREQ 处理流程

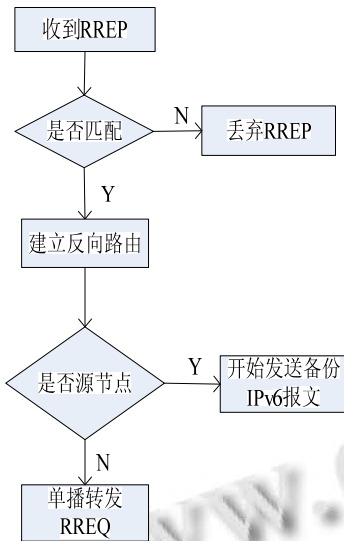


图 4 RREP 处理流程

若源节点在预期内未收到 RREP，重新创建一个 RREQ 进行路由查找，预期内仍未收到，则认为路径不可达。

2.2.2 路由维护

在 IPv6 报文沿着路由转发过程中，若中间节点路由表信息丢失查找不到路由，或因下一跳节点失效无法转发 IPv6 报文，这时此中间节点继续缓存收到的 IPv6 报文，根据 Mesh 头部信息，向目的节点广播

RREQ 修复路由，若收到 RREP，表明路由修复成功，发送缓存的报文；若预期内未收到 RREP，表明路由修复失败，丢弃缓存的报文，创建路由错误报文 RERR 单播给源节点以通知链路失效；并告知其第一个未成功发送的报文序列号，可保证修复失败后报文不会丢失。如图 5 所示。

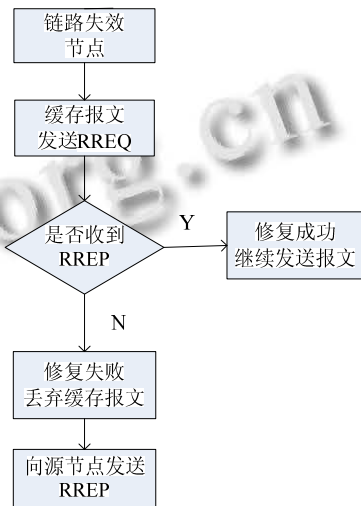


图 5 路由维护

源节点收到 RERR 后发起一个新的 RREQ 重新路由查找，更新路由后，继续从未成功发送的报文开始发送。

3 仿真实验

NS2 是一种开源免费的网络仿真模拟软件，在学术界被广泛使用。本实验利用 NS2 建立仿真环境，采用网状拓扑结构^[6]。NS2 中仿真参数设置如图 6 所示。

实验以网络能量剩余率为指标分析和评估路由算法的性能。网络能量剩余率是网络中所有节点剩余能量总和与网络初始总能量的比率。该指标反映了路由算法的功耗^[7]。

参数	值
MAC层	IEEE802.15.4
传输速率/kpbs	250
发射功率/dBm	3
接收功率/dBm	3
传输距离/m	10
数据包大小 /Byte	80
仿真时间/s	1000

图 6 NS2 参数设置

实验仿真区域为 50m*50m, 设置节点个数 30~80 个。实验结果如图 7 和图 8 所示。

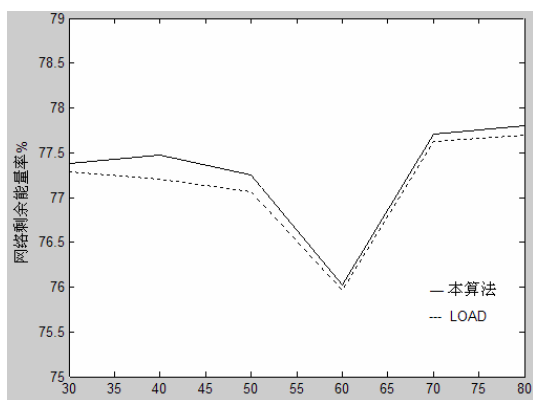


图 7 实验结果 1

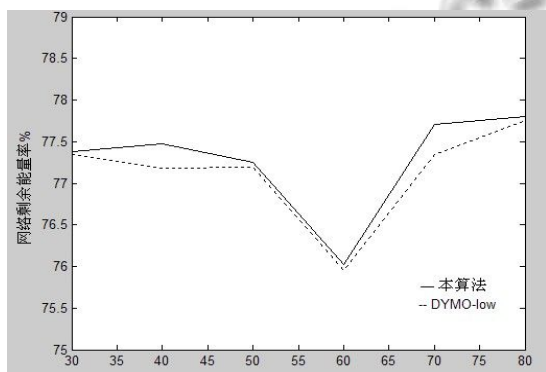


图 8 实验结果 2

网状路由协议主要包括 LOAD 和 DYMO-low, 两者都是基于 AODV 的按需式路由协议, 特征基本相同。只是在 DYMO-low 协议中, 序列号 (Sequence numbers) 字段用于无环检测, LOAD 协议则没有。

相比于 LOAD 和 DYMO-low 路由协议, 本路由算法采用精简的路由控制报文、路由表和路由请求表, 降低了节点收发和处理数据所消耗的能量; 简化了路由查找过程, 减少了路由处理的功耗。

该算法优化了路由维护机制, 减少了网络丢包。但是不以链路质量为权重, 得到的路径不一定是链路质量最佳的路径, 链路质量越差, 丢包越多。这方面还有待进一步完善。

仿真实验表明, 使用本算法网络能量剩余率较大, 因此路由功耗较小。

4 结语

本文详细分析了 IPv6 无线传感器网络适配层路由, 设计了一种低功耗按需式路由算法。仿真表明, 该算法能有效降低 IPv6 无线传感器网络的功耗。

参考文献

- 1 Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, Culler D. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks. IETF RFC 4944, 2007.
- 2 Kim E, et al. Problem Statement and Requirements for 6LoWPAN Routing. draft-ietf-6lowpan-routing-requirements-09, 2011.
- 3 Kim K, et al. 6LoWPAN Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing (LOAD). draft-daniel-6lowpan-load-adhoc-routing-03, 2007.
- 4 程宏斌. 6LoWPAN 多跳网状路由协议设计与仿真. 淮阴工学院学报, 2010, 19(1): 58-61.
- 5 王晓楠, 钱焕延, 唐振民. 基于 6LoWPAN 的无线传感器网络路由协议. 计算机应用研究, 2009, 26(10): 3881-3882.
- 6 王利国, 张宏科. 基于 6LoWPAN 的传感器网络动态路由协议研究. 重庆邮电学院学报 (自然科学版), 2006, 18(6): 740-742.
- 7 刘小刚, 张思东, 季策, 黄呈章. IPv6 低速无线个域网的路由设计与实现. 重庆邮电学院学报 (自然科学版), 2006, 18(1): 38-42.