

# 6LoWPAN 中的路由选择策略的改进

余建, 林志兴

(三明学院 现代教育技术中心, 福建 三明 365004)

**摘要:** 随着 IPv4 地址资源的耗尽, IPv6 网络替代 IPv4 成为不可逆转之势; 在近几年中无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 的发展, 使得 IPv6 网络的应用范围得到很大的拓展; 其中 6Lowpan 的提出使得 WSN 中的节点可以以 IP 地址的方式进行通信, 探讨了网络层的 IPv6 数据包长度和 MAC 层的数据包分片数量对网络性能的影响, 在 Contiki 实验平台下分析了不同的 RSSI 和网络负载下 6LoWPAN 的表现, 提出了基于 RSSI 的改进的 RPL 路由协议, 明显增强了 6LoWPAN 下的通信能力。

**关键词:** WSN; IPv6; 6LoWPAN; 路由选择; 丢包率

## Improvement of Routing Strategy in 6LoWPAN

Yu Jian, Lin Zhixing

(Sanming University Modern Education Technology Centre, Sanming 365004, China)

**Abstract:** With the depletion of address resources of IPv4, the internet of IPv4 replaced by IPv6 becomes a kind of tendency that cannot be turned back. The application range of the IPv6 internet is expanded because of the development of Wireless Sensor Network (WSN) in recent years. The nodes of WSN can be communicated by the way of IP address as a result of the revelation of 6Lowpan. The influence of IPv6 packet length of network layer and packet slicing number of MAC layer on network performance is explored. Based on Contiki experimental platform, the render of 6LoWPAN under different RSSI and internet load is analyzed. RPL routing protocol is proposed based on the improvement of RSSI, obviously strengthening the communication capability under 6LoWPAN.

**Keywords:** WSN; IPv6; 6LoWPAN; routing; packet loss rate

## 0 引言

近年来在低功耗无线传感器网络中物联网逐步成为一个非常热门的研究课题。6LoWPAN 成为 IPv6 可以应用于低功耗有损网络的一个标准<sup>[1-2]</sup>。IETF 的 6LoWPAN 工作组在 2007 年发布了第一个 6LoWPAN 文档, 其技术底层采用 IEEE 802.15.4 规定的物理层和数据链路层, 其中提出了数据的报头压缩、数据包的分片重组、6LoWPAN 网络的路由协议、IPv6 地址自动配置、网络管理等几个重点研究的目标。IEEE 802.15.4 是一个代价低、能耗小、传输速率低的无线个人局域网, 支持星型和对等网络拓扑<sup>[3]</sup>。对等网络拓扑需要经过多跳传输, 这种类型的网络通常应用于工业监测环境、健康看护等。在这些应用中, 无线感知节点需要通过路由协议建立多跳连接来从普通节点向汇聚节点传输数据。IETF 工作组为了解决这个问题定义了 RPL (The IPv6 Routing Protocol for Low-power and lossy Networks)。

在本文中, 我们用 Contiki 测试台来研究在不同的 RSSI 和负载数量时, IPv6 UDP 数据包在 IEEE 802.15.4 标准下的表现。通过不同长度的 IPv6 UDP 数据包在 6LoWPAN 下的传输来分析 IPv6 数据包的丢包率和吞吐量<sup>[4]</sup>。实验表明, 不同的 IPv6 帧长会影响 6LoWPAN 的表现。实验结果强调了 IPv6 UDP 数据帧长和 6LoWPAN 链路质量之间的平衡。最后基于实验本文提出在低功耗有损网络中的基于 RSSI 的

IPv6 路由协议, 提高了网络的传输效率。

## 1 相关研究工作

### (1) 6LoWPAN:

6LoWPAN 是基于 IPv6 通信协议, 采用低功耗无线个人局域网来传输 IPv6 数据包的<sup>[5]</sup>。相比于传统的 TCP/IP 网络, 要使 WSN 直接连接到互联网, 6LoWPAN 将面临许多难题, 例如: 在数据链路层上 IPv6 的 MTU (Maximum Transmission Unit) 比 IEEE 802.15.4 的最大帧长要大很多<sup>[6]</sup>。为此 IETF 的 6LoWPAN 工作组建议在网络层和 MAC 之间增加网络适配层。表 1 是 6LoWPAN 的协议栈, 分别为应用层、传输层、网络层、网络适配层 (6LoWPAN)、IEEE 802.15.4 的 MAC 层和 PHY 层, 它提供报头压缩以减少报文传输开销, 同时还提供 IPv6 数据包的分片和重组。

表 1 6LoWPAN 协议栈

应用层
传输层(TCP/UDP)
网络层(IPv6)
网络适配层(6LoWPAN)
IEEE 802.15.4 MAC 层
IEEE 802.15.4 PHY 层

### (2) RPL 路由协议:

RPL 协议是目前被广泛应用于低功耗、低计算复杂度和内存受限网络中的 IPv6 路由机制。该协议呈现树状性质, 并为每个节点估算等级值。等级值用来估计表示链接质量的期望连接数 (Expected Transmission Count, ETX) ETX

收稿日期:2018-06-26; 修回日期:2018-07-25。

作者简介:余建(1980-)男,福建三明人,实验师,主要从事网络技术与网络信息安全方向的研究。

作为动态链接机制来构建一个有向无环图。通常对 RPL 路由协议链路质量的估计可以使得节点之间建立准确而稳定的通信连接<sup>[7]</sup>。但是在本文的实验中可以看出,不同 IPv6 帧长将会影响 6LoWPAN 的表现。

在路由过程中网格节点之间的 RSSI 信息的提取、融合成 ETX 信息。该过程中网格节点间低质量的链接将会导致过度重传和路由错误。在基于 RSSI 的适应性路由协议中,路由发现协议根据接收信号强度策略优先选择更稳定的链路连接。当 IPv6 数据包是最小的 1280 bytes 的 MTU 时,将会分解为 13 个 125 bytes 的 IEEE 802.15.4 的帧结构,这些帧就称之为数据包分片。因此稳定的链路路径更适合传输长的 IPv6 数据包,分片通过这类路径成功到达目的地的概率更高。所以在 RPL 协议中的链路连接度量机制应该引入 IPv6 包的长度和不同 RSSI 情况下的丢包率。

(3) 6LoWPAN 测试平台:

6LoWPAN 测试平台是在 Contiki 开源系统和 Zigduino 设备的基础上开发用来评估 6LoWPAN 在室内的性能<sup>[8]</sup>。其系统图如图 1 所示。每个链接的 RSSI 的值用来估计 IPv6 在 RPL 路由机制中的丢包率。在这个测试平台中,我们在传感器节点的通信过程中放置包嗅探器,嗅探包含分片的 IPv6 UDP 数据包来评估 6LoWPAN 在实际无线信道条件下的性能。其中的 ATmega128RFA1 是新一代的集成微控制芯片,能很好与 Contiki 操作系统兼容,在 Zigduino 设备上执行 6LoWPAN 协议。

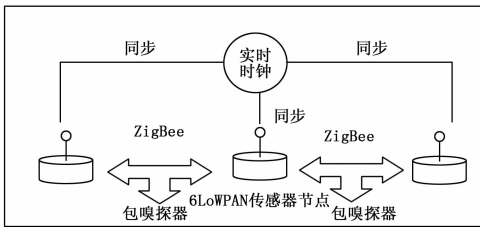


图 1 Contiki 6LoWPAN 测试平台

Contiki 是一个开源系统,其设计初衷就是为了在内存受限的条件下部署网络系统。Contiki 支持多种平台,仅需几比特的内存就能支持多任务运行环境,同时它还还为 6LoWPAN 提供 RPL 路由协议。实时时钟 (Real Time Clock, RTC),用于源节点和目的节点之间的时钟同步。它提供微妙级精度测量 IPv6 数据包的端到端传输时延并计算 6LoWPAN 的传输性能<sup>[9-10]</sup>。图中的包嗅探器采用的是 CC2531。通过嗅探器我们可以截获传输的数据包,分析由 ATmega128RFA1 传输的数据包的内容,并比较不同长度的 IPv6 数据包的长度来其对 6LoWPAN 性能的影响。

为了在 IEEE 802.15.4 中发送长的 IPv6 帧,源节点会分割将数据包分成多个分片,并独立发送这些分片。这些分片通过不同的多跳路径传送到目的节点,并重新组合。这里我们在不同的 RSSI 环境中测试 1 000 个 UDP 数据包的传输,分析在目的节点端的数据包计算出 IPv6 的丢包率。RPL 路由协议可以成功在本测试平台中运行。传感器节点

也能传输最多 1280 bytes 的 IPv6 UDP 数据包,并将它们分为 14 个分片通过多跳传输。

## 2 IPv6 丢包率与分片数量和 RSSI 值之间的关系评估

对于 IPv6 数据包在无线个人局域网中的表现,已经有一些文章对此做过研究,其中文章<sup>[11]</sup>中提出了可信 IPv6 数据包传输策略 (RIPDS),该策略是在无线个人局域网中通过对数据包分片来编码来保证数据包传输效率。文章<sup>[12]</sup>中介绍了通过内置的 IPv6 移动代理来减少数据包移交时延。下面我们通过实验研究来分析 IPv6 UDP 数据包在 6LoWPAN 适配层的性能,同时对与本文提出的在低功耗有损网络中的基于 RSSI 的 IPv6 多跳路由选择机制也给出了性能分析<sup>[13]</sup>。

6LoWPAN 作为一种全新的网络传输方式,充分应用在许多通信领域上:如物联网和工业化操作上,其体系结构使用链路层地址来实现网内的路由查找和报文转发。使用 IPv6 丢包率与分片数量和对 RSSI 测距的值的对应,只需要较低的实现复杂度和较少的通信开销,对于在传输有限的网络节点中是相当重要的。为了验证无线传感网中 IPv6 丢包率与分片数量和 RSSI 之间的关系,我们做了如下实验。在源节点处发送 1000 个 IPv6 UDP 数据包直接到目的节点,并不断调节这 2 个节点之间的距离,重复实验数次。在目的节点处观察接收到的 IPv6 UDP 数据包和收到的包的 RSSI 值。数据包分片数的计算是由嗅探器计算得出。为了测试不同长度的 IPv6 数据包帧的长度与 IEEE 802.15.4 的适应程度,源节点将 IPv6 包分成单帧到最多 13 个帧。该过程重复 10 次,取平均值作为实验结果。

图 2 展示了 IPv6 数据包在不同 RSSI 值时的丢包率。图中可以看出随着分片数量的增加,数据的丢包率也是成倍增长。而且随着 RSSI 的值从 -80 到 -91,数据包的丢包率也增长明显。同时,如图中所示,稳定的链接路径也适合传输长的 IPv6 包。在不同的 RSSI 值时,RPL 中标志链路质量的 ETX 也和 IPv6 包的长度和丢包率有关。

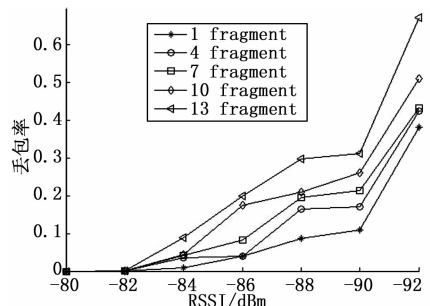


图 2 IPv6 在不同 RSSI 下的丢包率

## 3 RPL 路由协议的改进

### 3.1 在 RPL 的链路度量中引入 RSSI

在 DODAG 建立的过程中,RPL 路由协议的开销主要来自于通告信息 (Destination Advertisement Object, DAO) 消息,首先在 6LoPAN 路由环境中,每一个路由节点在收

到一个 DIO (DODAG information) 请求信息后, 会反向发送一个 DAO 消息, 并根据需要被转发到对应的父节点上, 再由父节点统一对整张 DODAG 的路由表进行调节, 因而信息量庞大, 由于 DIO 消息只在单跳距离内进行传输, DIO 消息是一种在建立 DODAG 过程中, 为了让附近节点发现而产生的少量信息, 且传输距离小短。由于 DIS 消息开销很小, 开销可以忽略不计。同时在大量 DAO 消息在被转发至父节点的过程中, 会造成对父节点周围的节点巨大的通信压力, 且会引发网络堵塞、中断的情况发生, 导致 DAO 消息重新传送, 破坏网络传输。

根据以上分析, 在 RPL 路由协议中, 链路度量是路径选择的一个重要考量。通过上述实验的观察, 本文设计了一个基于改进 RSSI 的 RPL 路由协议, 其具体实施如下所示:

- 1) Initially;
- 2) Root broadcast the DIO message;
- 3) While node receive DIO message & node joining DODAG;
- 4) Node update ETX\_RSSI value;
- 5) Node broadcast the new DIO message;
- 6) Return the DAO message to Root;
- 7) End while
- 8) If node receive the DIS message;
- 9) Node broadcast the DIO message;
- 10) While node receive DIO message & node want to join DODAG
- 11) Node update ETX\_RSSI value;
- 12) Node broadcast the new DIO message;
- 13) Return the DAO message to root;
- 14) End while;
- 15) End if;
- 16) Done;

在路由发现过程中, 每个节点接受 DIO 信息并将 RSS 值转化为 ETX\_RSSI。每条链接分片数的适当估计用来计算链接的 ETX 值。将每条路径上的 ETX 值在重播前写入到 DIO 中, 然后目标节点将携带平均 ETX 值的目的地 DAO 通过路由路径发送到 ROOT 上。在本文中的 RPL 算法经过改进, 该存储模式中 Root 作为汇聚节点, 实现信息存储转发, 在有向无环图中的其他节点不设存储模式。

### 3.2 IPv6 UDP 数据包在 6LoWPAN 下的传输分析

在表 2 的 6LoWPAN 中的 IPv6 UDP 数据包分片长度中, 展示了在提出的基于 RSSI 的 RPL 路由机制下节点单跳和两跳情况下网络的性能。在发送节点处, IPv6 的负载长度分别被设置成: 1, 81, 90, 91, 176, 272, 464, 656, 848, 1040 和 1232 字节。一个比特的负载也是 IPv6 传输中的最小负载长度。IPv6 中的 81 字节正好可以分解成 IEEE 802.15.4 的一个帧结构。90 字节的 IPv6 负载长度是 IEEE 802.15.4 单跳传输时的最大单个帧的负载长度。91 字节则可以分解成一个最大负载帧和一个最小负载帧。1232 字节是 Contiki 测试平台下能够传输的最大 IPv6 数据包负载的长度。

### 3.3 端到端传输时延分析

这里的传输时延是指 IPv6 UDP 数据包从源节点传输到

表 2 在 6LoWPAN 中的 IPv6 UDP 数据包分片长度

UDP 负载字节数	第一跳中的分片数	第二跳中的分片数
1	1	1
81	1	1
90	1	2
91	2	2
176	2	3
272	3	4
464	5	6
656	7	8
848	9	10
1040	11	12
1232	12	14

目的节点的传输时间。传输时延是由处理时延、排队时延和传播时延组成的。所以 6LoWPAN 传输时延必须精确到毫秒。图 3 展示了在 IPv6 UDP 数据包传输中单跳和两跳端到端传输时延。结果显示传输时延和 IPv6 UDP 数据包负载有线性相关。由于长的 IPv6 数据包会增加分片数量, 这回造成传输时延和更多的分片开销。同时图中可以看出两跳传输的时延大概是单跳传输时延的两倍, 这是因为在 6LoWPAN 中的包转发会在每一跳中进行包分片和重组, 因此传输时延和跳数也是线性相关的。跳数会很大程度上影响 6LoWPAN 的传输性能。

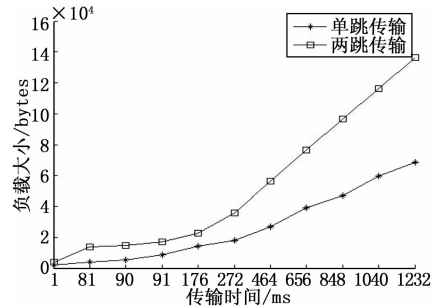


图 3 6LoWPAN 中单跳和两跳的传输时延

### 3.4 6LoWPAN 的性能分析

图 4 展示了 IPv6 UDP 数据包在 6LoWPAN 中的实际吞吐量。在 UDP 的客户端/服务器模式下, 从客户端发送不同长度的 IPv6 数据包负载到服务器端来估计 6LoWPAN 的实际吞吐量。从图 4 中可以看出实际吞吐量与 IPv6 负载长度密切相关。在 IPv6 负载为一个字节的情况下, 性能非常低。这是因为分片开销大大高于 IPv6 负载。当 IPv6 UDP 数据包负载达到最大负载 81 时, 此时的实际吞吐量最高。当传输负载达到 91 字节是, 实际吞吐量会突然下降, 这是因为分片只是为了传输额外 1 字节的负载, 使得分片开销过大。由于 6LoWPAN 是严格分层的, IPv6 数据包在每一跳处都被重组, 所以传输开销和跳数信息是直接相关的。

### 3.5 基于 RSSI 的路由协议的性能分析

我们使用 Contiki 平台 COOJA 仿真工具中来做实验, 图 5 是在 COOJA 仿真器下的网络拓扑图。为了测试基于

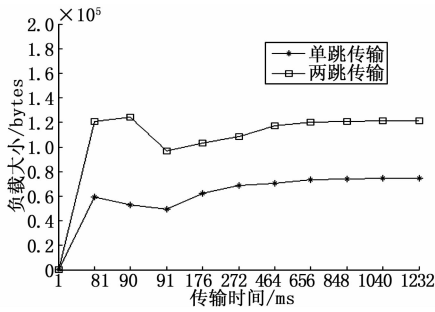


图 4 6LoWPAN 中单跳和两跳传输的实际吞吐量

RSSI 的 RPL 路由协议的性能, 实验中使用 500 个 1032 字节的 IPv6 UDP 数据包从节点 5 传输到节点 1。RSSI\_ETX 在路径 1-4-2-5 的数值为 1.148, 在路径 1-3-6-7-5 中的数值为 1.121。因此路径 1-3-6-7-5 将被基于 RSSI 的 IPv6 路由协议选中。基于路径 1-3-6-7-5 中最小的 RSSI 值得出合适的包长度应为 264 字节。

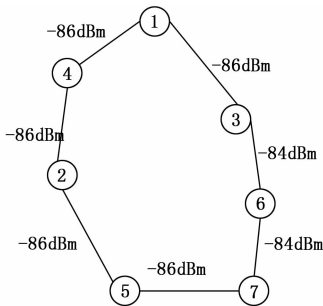


图 5 COOJA 仿真工具中的 RPL 拓扑图

图 6 中展示了本文提出的 RSSI 的路由协议的性能估计。我们分别在 MTU (最小传输单元) 为 246 字节和 1032 字节两种环境进行测试, 在原始的 RPL 选择最小的 ETX 路径和最长的 IPv6 数据包长。原始的 RPL 路由对数据包总的传输时间是 39 分 29 秒。而基于 RSSI 的路由协议则用时 16 分 24 秒, 两者总传输时延竟相差了 13 分钟左右, 测试结果表明, RSSI 路由协议的性能远高于原始的 RPL 协议。

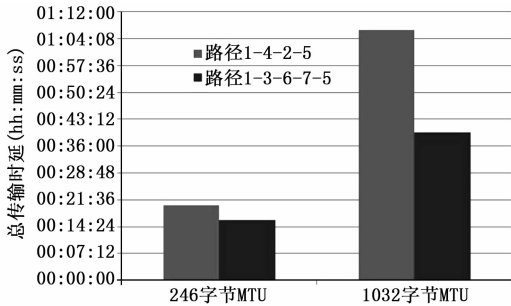


图 6 基于 RSSI 的路由协议在 COOJA 中的性能分析

图 7 为我们选取示例中的拓扑结构, 将改进的基于 RSSI 的 RPL 路由协议写入程序中。通过在 6LoWPAN 网络中, 部署 30 个节点, 仿真的时间为设置为 1 个小时, 观察节点的拓扑建立过程。包括路由负载、端到端平均时延等。对比 RPL 路由协议, 基于 RSSI 的更加高效、快速。这是因为在好的链路上, 数据包选择传输的几率更大, 所以链

路更能够做到负载均衡。拓扑建立过程如图 7 所示。

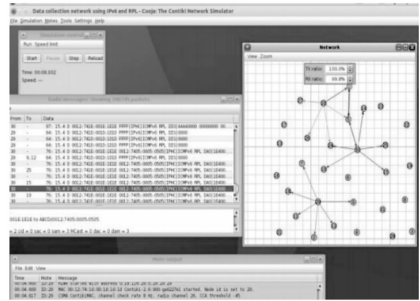


图 7 RSSI-RPL 在 COOJA 工具下的拓扑建立过程

### 4 结束语

本文针对 6LoWPAN 中 RSSI 路由协议向下传输的建立过程, 通过实验分析了 IPv6 数据包长度对 MAC 层分片数量的影响。并运用 Contiki 6LoWPAN 工具, 分析了在 6LoWPAN 网络中实际的 IPv6 UDP 数据包的传输性能, 传输延迟等。通过实验结果, 我们提出了一个改进的 6LoWPAN 网络下基于 RSSI 的 IPv6 路由协议。从实验中发现 6LoWPAN 性能与 IPv6 负载长度线性相关, 分析发现在大负载的 IPv6 网络中, 该方案数据传输效率高于原来的方案。下一步我们将逐步探索基于 RSSI 的路由机制在信道条件差的情况下的性能。同时下一步可以考虑将改进的 6LoWPAN 地址压缩方案考虑进来, 探索 IPv6 UDP 数据包长度对两者的影响。同时希望加入更多的参考指标, 例如 6LoWPAN 地址压缩方案的复杂度分析, 设备能量消耗分析等, 进行综合的评估, 得出更为实用和高效的路由寻址策略和地址压缩方法。

### 参考文献:

- [1] Ko, Jeong Gil, et al. Connecting low-power and lossy networks to the internet [J]. Communications Magazine, IEEE, 2011, 49.4, 96-101.
- [2] Hui, Jonathan W, David E. Culler. IPv6 in low-power wireless networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98.11, 1865-1878.
- [3] Yick, Jennifer, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey [J]. Computer networks, 2008, 52.12, 2292-2330.
- [4] Belonovsky A V, Makukha V K, Markov A V, et al. Development of Low-Power Device for Wireless Data Transmission under the 6LoWPAN Standard [A]. International Conference [C]. 2013.
- [5] Zimmermann A, Sa Silva J, Sobral J B M, et al. 6glad: Ipv6 global to link-layer address translation for 6lowpan overhead reducing [A]. Next Generation Internet Networks, 2008, NGI 2008 [C]. IEEE, 2008: 209-214.
- [6] Ludovici, Alessandro, Anna Calveras, and Jordi Casademont. Forwarding techniques for IP fragmented packets in a real 6LoWPAN network [J]. Sensors, 2011, 11 (1): 992-1008.