

基于 TinyOS 的无线传感器网络 AODV 路由协议的实现与优化

张贝贝¹, 王婷婷²

(1. 江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061; 2. 中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对无线传感器网络在矿山物联网的应用, 文章提出了 AODV 路由协议在 TinyOS 操作系统下的实现框架, 设计了数据帧、路由表与路由缓存机制; 文章针对传统型 AODV 协议的丢包率与跳数之间呈级数增长的问题, 分析了多跳衰减的原因, 提出了一种基于 RSSI 的改进型无线传感器网络 RSSI-AODV 协议, 采用 RSSI 作为路径选择的依据; 实际测试表明: 七跳链路总丢包率低至 0.3%, 优于传统 AODV 路由协议性能。

关键词: AODV 协议; 多跳; TinyOS 操作系统; RSSI; 无线传感器网络

Implementation and Optimization of AODV Routing Protocol Based on TinyOS for WSN

Zhang Beibei¹, Wang Tingting²

(1. Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222061, China;

2. China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to the application of Wireless Sensor Network (WSN) in Mine Internet of things (IOT), a framework of AODV routing protocol has been proposed based on TinyOS operating system. And the data frame, routing table and routing caching mechanism are designed. In traditional routing protocol AODV, the packet loss ratio gets higher with the number of hops increasing. Then a kind of improved RSSI-based routing protocol named RSSI-AODV has been proposed, after analyzing on the reasoning of multi-hops attenuation. Finally, actual test result shows that our improved protocol is more advantaged than the traditional one, as the packet loss rate is less than 0.3% in 7 hops.

Keywords: AODV; multi-hop; tinyOS; RSSI; WSN

0 引言

随着计算机通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的发展, 无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 技术日趋成熟, 并开始广泛应用于矿山物联网^[1-2]。目前, 基于 WSN 的井下应用主要有两个方面: 环境监测和人员定位。环境监测主要是对于井下一些危险信息的监测, 由于 WSN 网络具有自组织、低功耗和电池供电, 使得网络可以长期工作在人员不能到达的地方监测环境的信息, 如井下区域块的瓦斯浓度、一氧化碳浓度、风力和温湿度等, 亦可在采空区保留一些传感器来监测采空区的塌陷情况。文献[1-3]分别提出 WSN 用于监测井下环境的方案, 文献[4]提出一种以网络拓扑变化来检测井下的局部塌陷。

与传统网络路由协议更注重如何提高服务质量 (QoS) 和带宽的利用率不同, WSN 的路由以节约能量、延长传感器网络寿命和进行路径自我配置为主要目标。经过对不同的路由协议进行分析, 针对矿山无线通信对无线传感器网络的应用需求, 在 TinyOS 操作系统的环境下对经典的反应式路由 AODV 协议进行了实现与优化, 是无线传感器网络在矿山物联网大规模应用的一项基础性工作。

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2014-11-20。

作者简介: 张贝贝 (1987-), 男, 江苏连云港人, 硕士, 工程师, 主要从事电子产品设计与研发方向的研究。

1 TinyOS 操作系统 AODV 协议设计

1.1 AODV 协议实现框架

由于 AODV 协议是一种按需路由协议, 在没有数据传输的时候, 网络中的节点都处于侦听状态。当有数据需要传送时才发起路由请求, 建立路径。协议要在 TinyOS 2.x 系统上实现, 整个协议的框架设计要在 nesC 语言上设计。而 nesC 语言是以组件、接口、模块来描述。本流程图中给出了协议实现过程中的实际模块和接口的函数, 如图 1 所示。

1.2 协议帧格式

nesC 语言主要是由组件和接口组成, 协议的主要部分就是路由发现并实现路由的过程。对于每个帧的协议应有通用的类型定义, 在 TinyOS2.x 版本下, 已经定义了一些帧的功能, 例如字符 80、81、82 是 Deluge 插件的 AM_DELUGEADVMSG、AM_DELUGEREQMSG、AM_DELUGEDATAMSG 帧的标识符。因此在定义 AODV 协议的帧标识符时应避开 TinyOS2.x 一些插件的标识符。由于 TinyOS2.x 中系统和插件的标识符都大于 80, 因此在本协议的帧标识符定义在 2~20 之间。

由于 AODV 协议是在 DSDV 的协议上改进得来的, 因此在本设计中还留有 DSDV 协议的帧标识符, 也留有一些扩展接口的标识符 (16~20)。AODV 协议在 TinyOS2.x 操作系统上实现, 数据帧格式如图 2 所示。

Dest addr: 此数据为帧的目的地址 (广播地址为 255);

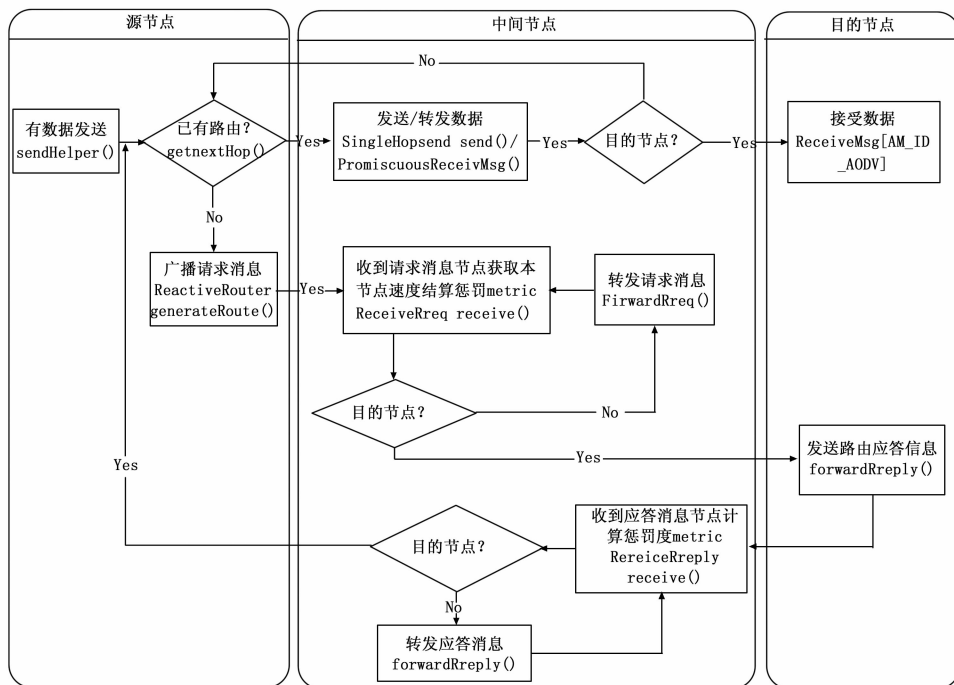


图 1 AODV 协议实现框架

中间节点会保存上一跳和下一跳的地址，就无需建立两个路由来进行双向通信。路由表从表号为 1 的地址开始使用，静态管理：即只有链路中有节点请求释放此条路由时才会被删除，路由位置不会改变。路由缓存里保存的是 RREQ 的信息，在目的节点返回 RREP 时中间节点转发 RREP 的下一跳信息保存在其中。缓存从表号最大的地址存储的，缓存实行动态管理即先进先出，若缓存满了则删除标号为 1 的缓存。为了防止中间节点的对于同一 RREQ 的重复转发（会造成网络内爆 Implosion），中间节点收到 RREQ 时先与自己的路由缓存进行比较，若缓存中没有则把缓存依次往下移，删除标号为 1 的缓存，空出来表号为 N (N 为路由缓存最高位置) 存放最新收到的 RREQ。如果是重复收到的 RREQ，则该 RREQ 缓存位置往上移动一个位置，并不转发此条 RREQ。

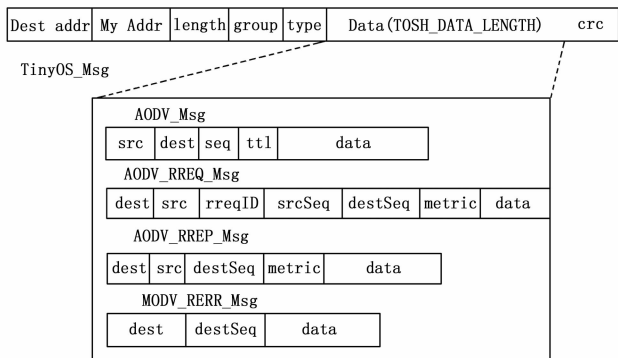


图 2 帧格式

- My addr: 发送此帧的节点地址；
- Length: Tynyos 帧的负载数据长度即 AODV 的帧长度；
- Group: 节点的工作组号；
- Type: 此帧的帧类型（例如 RREQ 为 10，RREP 是 11）；
- Src: AODV 中的源地址；
- Dest: AODV 中的目的地址；
- Seq: 数据帧的序列号；
- Ttl: 数据帧的跳数；
- RREQID: RREQ 的序列号；
- srcSeq: AODV 源地址的序列号；
- destSeq: 目的地址的序列号；
- metic: 惩罚值即跳数；
- data: 帧的负载信息；
- crc: 系统的 crc 校验；

1.3 路由表与路由缓存

路由表如图 3 所示，由于本系统是双向通信，因此链路的

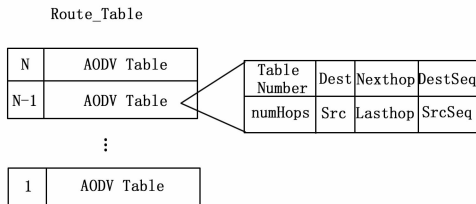


图 3 路由表

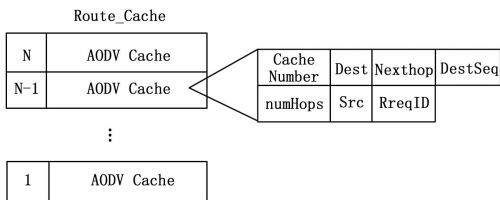


图 4 路由缓存

2 多跳型 AODV 协议优化

2.1 传统型 AODV 协议存在的问题

基于传统的 AODV 协议，发现数据多跳传输的丢包率非常严重^[3-4]。分析发现，AODV 协议是以惩罚值即跳数 metric 来选择路径，而在实际通信中很多链路都是非常不稳定的。链路中的某些节点可能在路由建立的时候可以顺利与链路节点收发数据，但在其它时刻就可能出现通信的丢包，这将严重影响链路的通信质量。

2.2 AODV 优化

考虑到系统应用对于稳定性的要求，本文提出以 RSSI 来提高协议链路质量 QOS (Quality of Service) 方法即 RSSI-AODV，如图 5 所示。在系统中任何节点收到 Rreq 请求时，

先进行接收信号的 RSSI 的判定。当接收到 Rreq 的节点判定收到的信号的 RSSI 值小于给定的值, 节点丢弃此 Rreq 帧, 不对之做任何的回应或者转发。这样就能保证所建立的链路的 QOS 是相对有保证的。按照传统的 AODV 协议, 路由路径将选择跳数最少的 1-7-5 作为路径, 基于 RSSI 改进型的 AODV 协议将选择 1-2-4-5 路径。

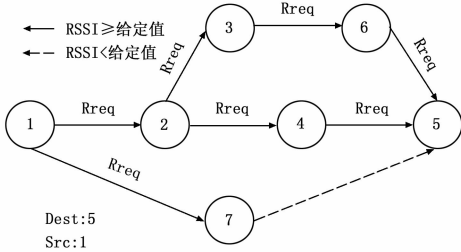


图 5 基于 RSSI 的 AODV 协议路由选择

在 TinyOS 2.x 的帧格式中有一个“packet metadata”的结构体, 在一般的通信中为了提高系统的效率, 这个结构体是隐藏的, 不对上层软件可视。标识这个结构体的使能位, 就可以把这个信息从系统的硬件适应层 (HAL) 中传输到上层软件中。在建立链路的过程中, 开始路径的消息是 Rreq。因此在路由申请的初期对 Rreq 进行 RSSI 的判决要比对其它消息判决要节省能量。

基于 RSSI 的改进型 AODV 协议, 虽然能大大保证链路的通信质量, 但是会增加路径的跳数。而增加路径跳数的多少取决于所设定 RSSI 的门限值, 门限值越高链路的可靠性越强, 相应协议通信的跳数也会增加。在大规模网络中通信链路跳数的增加会使链路的不稳定性增加, 因为中间节点有可能不稳定, 链路变长后受到干扰的可能性也会增加。因此 RSSI 门限值的设定多少是决定整个链路质量的一个重要因素。

对于每个节点的 RSSI 寄存器值的设定, 可以由式 (1) 可以算出接收信号的功率的值。

$$P_{RF} = \text{RSSI_BASE} + 3 * (\text{RSSI} - 1) \quad (1)$$

$$P(d) = P_0 - 10n_p \lg(d/d_0) \quad (2)$$

式 (2) 是 RSSI 值的统计模型^[5], $P(d)$ 是在距离为 d 的处的信号强度, P_0 是在距离为 d_0 处的信号强度, n_p 是是路径损耗因子, 范围在 2 到 4 之间。由于使用的是同一种类型的节点, 每个节点的信号接收增益应是相同的, 所以这里的信号强度可以看成接收功率。因节点通常能收到比给定门限值 -91 dbm 更小的信号, 在这里指定 P_0 为 -95dbm。在文献 [5] 中对于 2.4G 的 WSN 节点在建筑物楼道中进行了大量测试, 得出了 n_p 的参考值是 2.4。

为了方便对 RSSI-AODV 协议测试, 每个节点 20 m 的距离比较适合节点的铺设, RSSI-AODV 协议中相邻节点的通信距离 d 的值是 25 m。由式 2 可以得出 $P(d)$ 的值是 -85 dbm。知道所需接收功率为 -85 dbm, 通过式 1 可以得出无线通讯芯片寄存器 RSSI 的值应为 3。通过实际测试得出在把无线通讯芯片的寄存器“PHY_RSSI”设定为大于等于 3 进行接收信号筛选时, 两个节点的最大通信距离为 22~28 m, 完全符合期望的测试距离需求。

3 验证测试

由于 AODV 是按需路由, 网络中的节点可以是无序铺设,

目的地址也可以是网络中的任意节点。在测试协议的时候需要铺设很多的节点, 由于目前的节点数目有限, 只有十二个节点。为了保证源节点到目的节点有多条多跳的可达路径, 中间相邻节点之间的距离要小于 40 m。由于没有为节点设计合适的室外使用的外壳, 节点在室外测试将会丢失或者遭到自然环境因素的破坏。所以协议测试还是在室内楼道里测试。

测试协议地点在长楼道内, 为了方便节点的铺设, 相邻节点之间的距离为 20 m, 如图 6 所示。

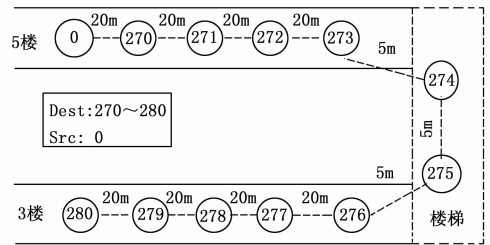


图 6 节点分布

如图 6 是节点的分布图, 为了防止源节点 0 与目的节点 280 的直接通信, 把节点 280 放到三楼, 使之与 0 节点相隔两层楼, 经过测试两者时间收不到对方的数据。在楼梯上放置两个节点 274 和 275 防止节点因为楼梯处过厚的混凝土而无法通信。在节点 0 上对网络中每个节点进行通信, 并测试跳数与丢包率。为验证改进型 AODV 协议, 采用 12 个无线节点, 节点间距 20 m。在根节点上对网络中每个节点进行通信, 并测试跳数与丢包率。

AODV 协议以惩罚度 metric 作为路径选择的首要因素时, 链路中的相邻节点的丢包率大约在 20%。经历七跳后, 总链路的丢包率为: $P=1-(0.8)^7=79%$ 。当链路越长, 受到干扰越多, 丢包率就越大, 实际测试结果是 84%。

如图 7 所示, 通过协议测试比较可以看出, 传统的 AODV 协议在 WSN 中实现以跳数 metric 惩罚值来作为链路选择, 是不适合无线传感器网络的。在经过 7 跳后的丢包率就能达到 80% 左右, 由于丢包率太大, 协议基本上不能面向应用。在经过基于 RSSI 信号改进后, 再对协议的跳数 metric 来作为链路选择, 大幅度降低了丢包率, 能满足应用需求。

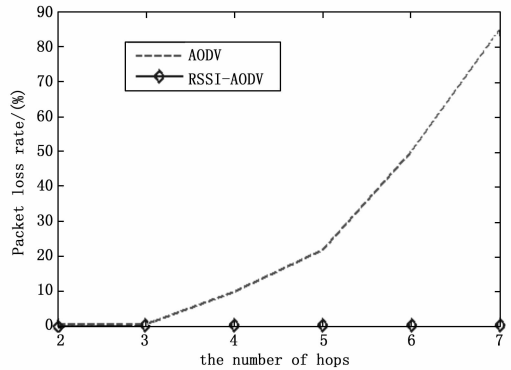


图 7 测试结果对比

4 结论

本文以无线传感器网络在矿山物联网的应用为背景, 在 TinyOS 操作系统的环境下, 提出了 AODV 路由协议实现框

架。为改善传统 AODV 协议单纯以跳数惩罚度 metric 作为路选依据造成多跳衰减严重的情况，提出了改进型 RSSI—AODV 协议，采用 RSSI 和跳数作为路径选择的依据。通过对改进型 RSSI—AODV 路由协议的实际测试表明：七跳链路总丢包率可达到 0.3%，远远优于传统路由算法。本文作为无线传感器网络在矿山无线通信中的应用基础研究，具有重要的意义。

参考文献：

[1] Yang W, Huang Y. Wireless Sensor Network Based Coal Mine Wireless and Integrated Security Monitoring Information System [A]. IEEE Proceedings of the Sixth International Conference on Networking (ICN07) [C]. 2007.

[2] Hao L, Wang Q P, Su Y, et. A CUT-based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks in Coal Mine [J]. Proceeding of the IEEE, 2008: 978-1-424.

[3] Enjie D, Wang M Y, Wen J C. Performance Evaluation of 2.4GHz Wireless Sensor Nodes Transmission in Coal Mine [J]. IEEE, DOI 10.1109/CSIE.2009.257.

[4] Li M, Liu Y H. Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks [J]. IEEE 2007, IPSN'07.

[5] 朱明辉, 张会清. 基于 RSSI 的室内测距模型的研究 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29 (8): 19-22.

[6] Raychaudhuri D, Mandayam N B. Frontiers of Wireless and Mobile Communications [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100 (4).

(上接第 1742 页)

——输出数据率：根据等式 (8) 和 (12)，输出流曲线是

$$\alpha^* = [\rho_i t + (\sigma_i + \rho_i \times (T + \frac{\rho_{n-1} T + \sigma_{n-1}}{R - \rho_{n-1}}))]^T \quad (15)$$

其中：

- (1) $i=1, 2, \dots, n$;
- (2) $R = \min \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, 在 AFDX 里, 这里的 R 是 12.5×10^6 B/S;
- (3) $T = T_1 + T_2 + \dots + T_m$, 根据 ARINC 664, Part 7, 在交换机里的延迟被限制在 $16 \mu s$, 因此 $T = m \times 16 \mu s$;

(4) $\sigma_i = L_{\max}$, $\rho_i = \frac{L_{\max}}{BAG}$;

(5) $\sigma_{n-1} = \sum_{j=1}^n \sigma_j - \sigma_i$;

(6) $\rho_{n-1} = \sum_{j=1}^n \rho_j - \rho_i$.

3 案例分析

这一节通过两个具体的案例来分析 AFDX 网络性能的数学算法。这个案例假设有 8 个 switches 在物理链路上, 每个 switch 有 8 个输入流 VL, 研究的对象是虚拟链路 VL_i。

1) 假设除了 VL_i, 所有的虚拟链路 = 1 (ms), $L_{\max} = 1518$ (byte)。VL_i 的 $L_{\max} = 1518$ (byte)。当 VL_i 的 BAG 在从 1 到 128 (ms) ($2^k = 1 \sim 7$) 的范围内变化时, 它的延迟计算参数 SDF 和预留缓冲区大小 h_{\max} 的计算结果被显示在图 5。

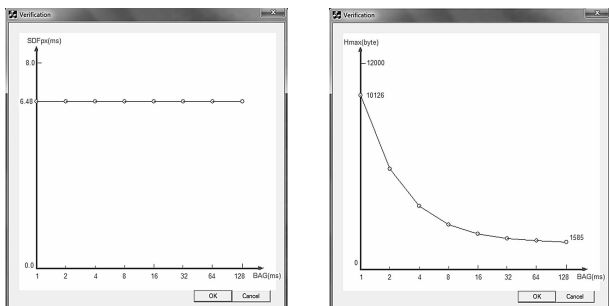


图 5 case1 的计算结果示意图

2) 假设, 对于所有的虚拟链路, $BAG = 1$ (ms), $L_{\max} = 1518$ (byte), 包括 VL_i。但是对于 VL_m (其他的 7 虚拟链路中的一条) 的 $L_{\max m}$ 的变化范围是从 64 到 1518 (byte)。VL_i 的延迟和缓冲区大小计算结果被显示在图 6 中。在图 6, x 轴代表 $L_{\max m}$ 的变化, y 轴代表 SDF_{pxi} and H_{maxxi} 的计算结果。

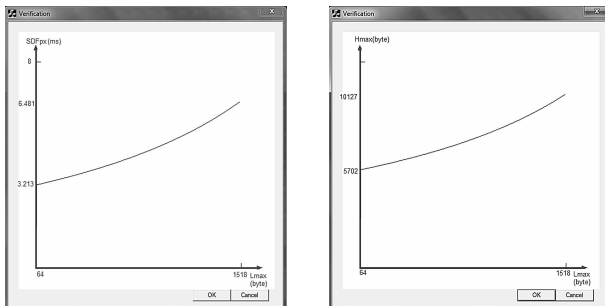


图 6 SDF_{pxi} 和 H_{maxxi} 在例子 3 中的计算结果

4 结论

航电总线设计工程师需要在 AFDX 总线系统结构和性能方面针对不同的逻辑和物理配置提供详细的设计, 其中包括网络延迟、预留缓冲区大小、对输出流的最大范围等性能分析。为了有效地依据地指导航电总线的设计过程, 需要寻找更为简洁准确的方法来确保网络拓扑结构的无丢失确定性服务, 也就因此向航电总线系统设计工程师们提出了挑战。上述简单介绍了网络设计和配置时估计网络性能参数的几种方法, 并详细介绍了 NC 在这一领域的应用。未来还需在方法验证对比和延迟计算精度方面开展更深入的研究。

参考文献：

[1] Boudec J L, Thiran P. Network Calculus—A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet [M]. Online Version of the Book Springer Verlag—LNCS 2050; Version May 10, 2004.

[2] ARINC 664. Aircraft Data Network Part 2: Ethernet Physical and Data Link Layer Specification [S]. 2003.

[3] ARINC 664. Aircraft Data Network Part 7: Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network [S]. 2005.

[4] 赵永库, 唐来胜, 李 贞. AFDX 网络测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (4): 945-947.

[5] 周天然, 张勇涛, 何 锋, 等. 基于 AFDX 的航空电子系统可调度性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012 (1): 75-79.

[6] Ritu Chadha. Applications of policy-based network management [A]. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium [C]. 2004: 907-908.

[7] IETF RFC 2753, A framework for policy-based admission control [S]. Yavatkar R, Pendarakis D, Guerin R, 2000.