

# 无线传感器网络协作无信标可靠路由协议\*

黄超<sup>1</sup>, 王国利<sup>2</sup>

(1. 广东技术师范学院 计算机科学学院, 广东 广州 510665;

2. 中山大学 信息科学与技术学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对无线传感器网络可靠性传输度量标准不够准确的问题, 提出了基于包接收率模型的协作无信标可靠路由协议 CBRR。CBRR 充分利用无信标转发和协作通信的优势, 完全避免冗余探测包的使用, 并通过等待响应时间设定、协作节点概率保证以及冗余数据包发送等方式实现单跳数据传输的可靠性保证。仿真结果表明, CBRR 协议不仅能够提供高可靠性支持, 而且具有良好的传递成功率、传输延迟和能量效率。

**关键词:** 无线传感器网络; 可靠路由; 无信标转发; 协作通信

**中图分类号:** TP31 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)04-0039-06

## Cooperative Beaconless Reliable Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

HUANG Chao<sup>1</sup>, WANG Guoli<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science, GuangDong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China;

2. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Based on the packet reception model for real wireless links, a cooperative beaconless reliable routing protocol (CBRR) is proposed. CBRR provides a novel forwarding policy combining with contention forwarding and cooperation forwarding, which can achieve the reliable guarantee between a single hop by the priority of waiting delay, cooperative probability guaranty and redundancy transmitting. Furthermore, CBRR can obtain packet reception rate through RTS-CTS handshake without using probing messages. Simulation results verify the validation of CBRR in term of its high reliability with better energy efficiency and shorter delivery delay.

**Key words:** wireless sensor networks; reliable routing; beaconless forwarding; cooperative communication

某些特定应用对无线传感器网络数据传输的可靠性提出了较高的要求, 比如在森林防火中, 监测区域的异常高温信息必须可靠地传送到监测中心。无线传感器网络的链路质量与工作环境密切相关, 恶劣的环境可能导致丢包率剧增以至链路失效<sup>[1-2]</sup>。如何度量无线链路质量是实现可靠性传输的关键。大多数可靠路由协议假定理想无线链路环境<sup>[3-5]</sup>, 度量策略通常使用探测包交互方式, 以接

收包和发送包的数量比值作为节点间的链路质量。然而, 无线链路质量会受到环境、通信距离等因素影响, 使得数据包在传输过程中存在丢包率和位误码率。文献 [6] 对 MICA2 组成的传感器网络进行了深入研究, 为实际无线衰减链路建立了包接收率 (PRR, Packet Reception Rate) 模型。由该模型可知, 理想无线链路环境的度量策略并不能反映衰减链路质量的实际变化, 原因在于假定一旦成功接收

\* 收稿日期: 2012-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61074167)

作者简介: 黄超 (1978 年生), 男; E-mail: superchaohuang@gmail.com

数据包后其内容都是无损的, 没有考虑所传数据包的位误码率, 即传输内容的损坏程度。

传统路由协议以牺牲能量来换取可靠性保证, 与能量高效的首要设计目标存在直接矛盾。协作通信利用无线广播特性, 当接收节点的数据包不能满足可靠性要求时, 选择协作节点提高数据传输的可靠性和能量效率<sup>[7]</sup>。无信标转发可以在没有邻居节点先验信息情况下, 让节点以能耗低, 开销小的方式选出下跳接收节点。无信标转发可以用于协作通信中协作节点的选择<sup>[8]</sup>。RRP 利用无信标转发在相邻 intend 节点间选择 guard 节点作为协作节点, 达到提高可靠性的目标<sup>[9]</sup>。ICGF 拓展了协作转发区域范围, 当所选择接收节点不能正确接收数据包时, 利用协作转发选择协作节点提高可靠性<sup>[10]</sup>。然而, RRP 和 ICGF 的无线链路质量度量策略过于理想, 都没有考虑传输内容的损坏程度, 也不能提供有保证的可靠传输, 而且冗余探测包的使用会降低能量效率。

为此, 本文基于包接收率模型提出一种协作无信标可靠路由协议 CBRR。CBRR 充分利用无信标转发和协作通信的优势, 在提高传输可靠性方面有如下优点: ①包接收率模型能反映传输内容的损坏程度, 可靠性度量标准更为准确; ②设定长等待响应时间和短等待响应时间, 优先选择包接收率大的节点成为接收节点; ③协作节点以概率保证提高接收节点所接收数据包的可靠性; ④当协作转发无法达到可靠性要求时, 采用冗余数据包转发保证可靠性。此外, CBRR 利用 RTS-CTS 交互捎带计算节点间包接收率, 完全避免冗余探测包的使用。

## 1 系统模型

### 1.1 网络模型

无线传感器节点均匀部署于监测区域内且满足以下条件: ①能获取自身位置信息; ②初始能量相同且能感知剩余能量; ③通信半径相同; ④有数据包合并处理能力; ⑤装配有忙音信号。本文所用的相关术语说明如下:

**转发区域:** 位于发送端节点通信范围内且比发送端节点离目标节点更近的区域。

**候选接收节点:** 位于转发区域内的节点。

**候选协作节点:** 位于发送端节点与接收节点之间的候选接收节点。

如图 1 所示, 假设  $S$  和  $T$  分别为发送端节点和目标节点, 则  $S$  的转发区域为弧  $OSP$  和弧  $OQP$  所包含区域, 候选接收节点为  $a-f$ ; 假设节点  $d$  为竞

争选出的接收节点, 则它的候选协作节点为  $a-c$ 。

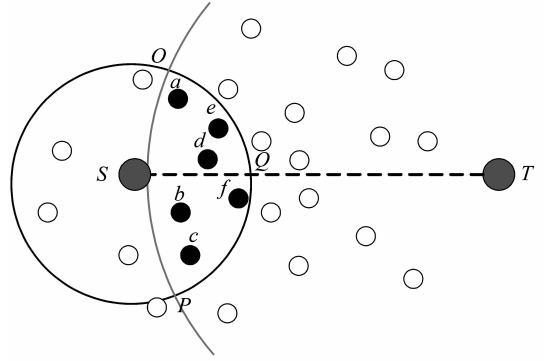


图 1 转发区域示意图

Fig. 1 Forwarding Area

### 1.2 包接收率模型

包接收率模型可以反映数据包的位误码率状况<sup>[6]</sup>。对于给定传输距离  $d$  和编码及调制模式, 接收端的包接收率  $p(d)$  可由式 (1) - (3) 计算得到:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (1)$$

其中  $PL(d)$  是距离为  $d$  的路径衰减,  $d_0$  是近地参考距离, 通常取值  $1m$ ;  $n$  是信号路径衰减指数, 一般满足  $2 \leq n \leq 4$ , 本文取值为 3;  $X_{\sigma}$  是 0 均值且标准偏差为  $\sigma$  的高斯分布随机变量;  $PL(d_0)$  是参考距离  $d_0$  处的路径衰减, 一般设定为 55 dB。

$$\gamma(d) = P_{i\text{dB}} - PL(d)_{\text{dB}} - P_n \quad (2)$$

其中  $\gamma(d)$  是与发送端相距  $d$  的信噪比,  $P_i$  为发送端功率,  $P_n$  与电路噪声有关, 通常设定为  $-115 \text{ dBm}$ 。

$$p(d) = \left( 1 - \frac{1}{2} \exp^{-\frac{\gamma(d)}{2 \cdot 0.64}} \right)^{8f} \quad (3)$$

其中  $f$  是数据帧长 (单位 byte)。

由式 (3) 可知, 包接收率与数据帧长密切相关。当使用探测包交互估计节点间链路质量时, 只有数据包大小不超过探测包, 节点才能在正确接收探测包的情况下也正确接收数据包, 否则它的包接收率会降低, 即数据包误码率更高。由此可见, 探测包交互方式估计链路质量会存在较大误差, 而包接收率更能准确反映实际链路的质量。

## 2 CBRR 协议设计

### 2.1 协议概述

如图 2 所示, CBRR 包括竞争转发、协作转发和冗余转发三个阶段。发送节点首先通过竞争转发

选出接收节点，当该接收节点不能满足可靠性要求时，进入协作转发阶段来提高接收节点的可靠性；当协作转发无法达到可靠性要求时，发送节点采用冗余数据包转发保证可靠性。需要指出的是，冗余数据包转发通常只会在链路质量非常差时使用。

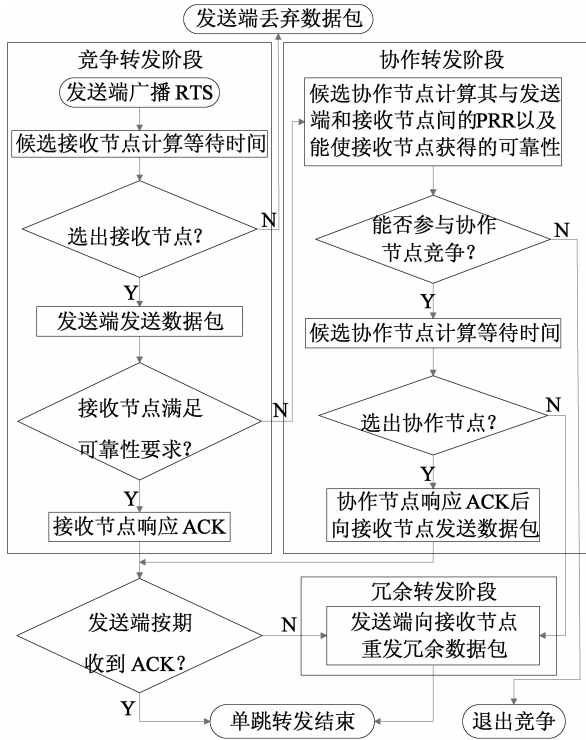


图 2 CBRR 协议工作流程

Fig. 2 Flowchart of CBRR

### 2.2 竞争转发阶段

当发送端节点需要转发数据包时，首先进入竞争转发阶段选择接收节点，它的工作过程是：

1) 发送端节点  $i$  广播 RTS 包 (RTS 包含发送端节点位置、目标节点位置、数据包大小以及可靠性要求  $R_{req}$  等信息)。

2) 转发区域内的候选接收节点  $j$  在正确接收 RTS 后，取出数据包大小和  $R_{req}$ ，然后通过式 (3) 计算它与  $i$  的包接收率  $PRR_{i,j}$ 。

3) 候选接收节点  $j$  根据包接收率来决定参与竞争的优先级。若  $PRR_{i,j} \geq R_{req}$ ，表明该节点若成为接收节点就可以保证可靠性，它将具有更高竞争优先级和短等待响应时间  $T_{short}$ ；否则，该节点即使成为接收节点，它仍然需要协作节点的帮助才能满足可靠性要求，因此它的竞争优先级必须低于满足可靠性要求的节点，它的长等待响应时间为  $T_{long}$ 。节点的竞争函数和等待响应时间的设定参照 2.6。

4) 等待时间最短的节点将最早响应 CTS，竞

争成为接收节点  $k$ 。CTS 除了包含接收节点的位置信息外，还有一个“标志位”，用于标识是否需要协作节点帮助。如果接收节点  $k$  的包接收率满足  $PRR_{i,k} \geq R_{req}$ ，则该“标志位”设为 0，否则将设为 1，表明该节点需要协作节点帮助。

5) 发送端节点在接收到 CTS 后立即发送忙音取消其它节点参与此次竞争，并向接收节点发送数据包。其它侦听到忙音且接收到 CTS 的候选协作节点根据 CTS 中的“标志位”决定是否要进行协作转发。若“标志位”为 0，则候选协作节点保持侦听状态，否则它们将进入协作转发阶段。

6) 在发送端节点发送完数据包后，如果接收节点不需要协作转发，它将直接向发送端响应 ACK，否则转入协作转发阶段 2.3。

7) 若发送端节点按期收到 ACK，则此次转发结束，接收节点将成为新发送端节点再转 1)；否则转入冗余转发阶段 2.4。

### 2.3 协作转发阶段

当接收节点不能满足可靠性要求时，需要选择协作节点来提高它的可靠性。候选协作节点从 CTS 中获知接收节点需要协作时 (即“标志位”为 1)，它将进入协作转发阶段，该阶段的工作过程是：

1) 候选协作节点  $m$  分别计算它到接收节点  $k$  和发送端节点  $i$  间的包接收率  $PRR_{m,k}$  和  $PRR_{i,m}$ 。

2) 节点  $m$  再根据式 (4) 计算自己若成为协作节点后能使接收节点获得的可靠性  $R_m$ 。若  $R_m \geq R_{req}$ ，则表明节点  $m$  成为协作节点后能够帮助接收节点满足所需可靠性要求，它将被允许参与协作节点的竞争，其优先级函数和竞争等待时间  $T_{wait}^m$  参照 2.6；否则，该节点退出竞争。

3) 若成功选出协作节点  $n$ ，它将首先响应 ACK，再向接收节点转发数据包。接收节点接收完数据包后，此次转发结束，接收节点将成为新发送端节点再转 2.2 中步骤 1)，否则转入冗余转发阶段 2.4。

### 2.4 冗余转发阶段

发送端节点由式 (6) 计算冗余数据包数量  $N$ ，然后向接收节点连续发送  $N$  个冗余数据包。发送结束后，接收节点将作为新的发送端节点再转 2.2 中 1)。

### 2.5 可靠性保证

为竞争协作节点的资格，候选协作节点  $m$  需要计算如果自己成为协作节点后，能够使得接收节点  $k$  所获得的可靠性  $R_m$ ，并依据  $R_m$  来决定自己能

否参与协作节点竞争。它的  $R_m$  由下式得到:

$$R_m = 1 - (1 - PRR_{i,m} \times PRR_{m,k})(1 - PRR_{i,k}) \quad (4)$$

当不能选出满足可靠性要求的协作节点时, CBRR 将采用重发冗余数据包方式。为保证单跳传输的可靠性, 发送节点  $i$  向接收节点  $k$  重发冗余数据包的数量  $N$  计算如下:

$$1 - (1 - PRR_{i,k})^N \geq R_{req} \quad (5)$$

$$N = \left\lceil \frac{\ln(1 - R_{req})}{\ln(1 - PRR_{i,k})} \right\rceil \quad (6)$$

## 2.6 竞争优先级函数和等待响应时间

CBRR 的竞争优先级函数综合考虑节点的包接收率、增进距离以及剩余能量。对于候选接收节点  $j$ , 它的竞争优先级  $P_j$  计算如下:

$$P_j = PRR \times \frac{d_j}{R_c} \times \frac{e_j}{E_i} \quad (7)$$

其中  $PRR$  为节点  $j$  的包接收率;  $d_j$  为节点  $j$  到目标节点的增进距离;  $e_j$  和  $E_i$  分别为节点  $j$  的当前剩余能量和初始能量。

在竞争转发阶段中, 候选接收节点  $j$  的短等待时间  $T_{short}$  和长等待时间  $T_{long}$  分别计算如下:

$$T_{short} = SIFS + (1 - P_j) \times SIFS \quad (8)$$

$$T_{long} = 2 \times SIFS + (1 - P_j) \times SIFS \quad (9)$$

其中  $SIFS$  由 IEEE 802.11 DCF<sup>[11]</sup> 定义为  $10 \mu\text{s}$ 。由式 (8) 和 (9) 知,  $T_{short}$  始终不大于  $T_{long}$ 。

在协作转发阶段, 候选协作节点  $m$  的竞争优先级  $P_m$  参照式 (7) 得到, 它的竞争等待时间计算如下:

$$T_{wait}^m = SIFS + (1 - P_m) \times (DIFS - SIFS) \quad (10)$$

其中  $SIFS$  和  $DIFS$  分别定义为  $10 \mu\text{s}$  和  $50 \mu\text{s}$ <sup>[11]</sup>。

## 3 仿真结果与分析

为评价 CBRR 的性能, 本文选择 MMSPEED 和 ICGF 两种协议进行比较。为公平起见, 我们对 MMSPEED 和 ICGF 进行修改, 均使用式 (3) 的包接收率作为链路质量度量标准, MMSPEED 只保留其可靠性功能, 而 ICGF 也只允许包接收率高于可靠性要求的候选协作节点参加协作转发竞争。修改后的协议分别称为 MMSPEED-PRR 和 ICGF-PRR, 所有协议都在 J-Sim 仿真器<sup>[12]</sup> 上实现。

仿真策略是从网络场景右边任选两个节点作为目标节点 (节点 8 和 79), 从网络场景左边任取四个节点作为源节点 (节点 7、19、24 和 79), 其中

节点 7 和 72 的传递目标是 79, 节点 24 和 19 的传递目标是 8。数据包产生速率采用 CBR (Constant Bit Rate) 数据流, 考察协议在数据流 7→79、72→79、24→8 和 19→8 下的数据包可靠性和数据包大小实验中的性能。所有协议在 6 轮随机场景下运行 50 秒, 并且每个协议在同一场景下分别运行 2 次。仿真实验的参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数  
Table 1 Simulation parameters

参数	值	参数	值
网络规模	200 * 200 m <sup>2</sup>	CBR	2 packets/s
节点数量	200	节点初始能量	100 J
通信半径	40 m	信道带宽	2 Mbps
发送/接收/空闲功耗	660/395/35 (mW)		

### 3.1 数据包可靠性实验

数据包可靠性要求是衡量可靠路由协议的关键指标, 可靠性要求越低, 表明节点通信范围内能够满足可靠性要求的邻居节点也越多。本实验的数据包大小为 125 Bytes。由图 3 知, 当可靠要求较高时 ( $R_{req} \geq 0.8$ ), MMSPEED-PRR 很难找到满足可靠性要求的单个节点, 需要采用多路径冗余包转发来提高成功率, 然而冗余数据包不仅增加网络负载, 更会加剧网络冲突, 导致丢包率、延迟以及能量效率等性能快速下降。CBRR 和 ICGF-PRR 的性能明显优于 MMSPEED-PRR, 其原因在于协作节点可以提高单跳间数据包的可靠性, 减少传输延迟和能耗。CBRR 的可靠性保证策略能够使其始终保持接近 100% 的转发成功率, 而 ICGF-PRR 不能提供可靠性保证, 当可靠性得不到满足时只能丢弃数据包, 使得成功率低于 CBRR 10% 以上。ICGF-PRR 拓展了协作转发区域的范围, 能够选择更靠近目标的协作节点而使得传输延迟最小。此外, ICGF-PRR 传递成功率的下降以及 CONF 探测包的使用, 使其平均能耗高于 CBRR。

### 3.2 数据包大小实验

数据包的大小直接决定了包接收率, 图 4 显示了三种协议在数据包可靠性要求为 0.8 时数据包大小实验的性能。数据包大小对 MMSPEED-PRR 和 ICGF-PRR 的传递成功率有较大影响, 原因是数据包越大, 位于相同距离的包接收率越低, 当没有单个节点满足可靠性要求时, MMSPEED-PRR 和 ICGF-PRR 分别需要选择更多的路径转发或协作节点才能满足可靠性要求。然而, 当节点密度不变时,

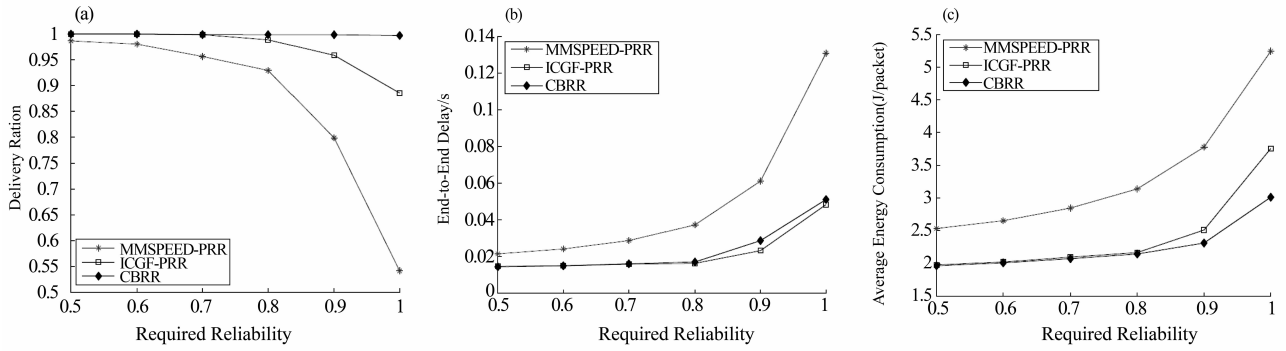


图 3 数据包可靠性实验：(a) 平均传递成功率、(b) 平均传递延迟、(c) 平均能耗

Fig. 3 Required reliability scenario: (a) average delivery ration, (b) average end-to -end delay, (c) average energy consumption

节点可能无法找到足够能满足可靠性要求的邻居节点数，此时发送节点只能作丢包处理。另外，MMSPEED-PRR 过多的冗余路径转发会增加网络负载，加剧网络冲突，导致丢包率急剧上升，大大提高了传输延迟和能耗。相反，CBRR 的传递成功率几乎不受数据包大小的影响，在无法找到满足可靠性要求的单个节点时，CBRR 利用冗余数据包方式仍然可以保证接近 100% 的成功率。随着数据包大小的增大，三种协议的延迟都增加，一方面是更大的数据包需要更多的时间传递，另一方面协议需要

选择离自己更近的邻居节点才能保证更高的可靠性，这就增加了传输所需的跳数。此外，与数据包可靠性实验相似，ICGF-PRR 的平均能耗高于 CBRR，它的平均延迟总体上略好于 CBRR，但当数据包大小不小于 225 Bytes 时，ICGF-PRR 的传输延迟超过 CBRR，其原因是数据包越大，相距同等距离的包接收率越小，为满足可靠性要求，ICGF-PRR 必须选择更靠近发送节点的邻居转发数据包，从而增加了数据包传输所需的跳数。

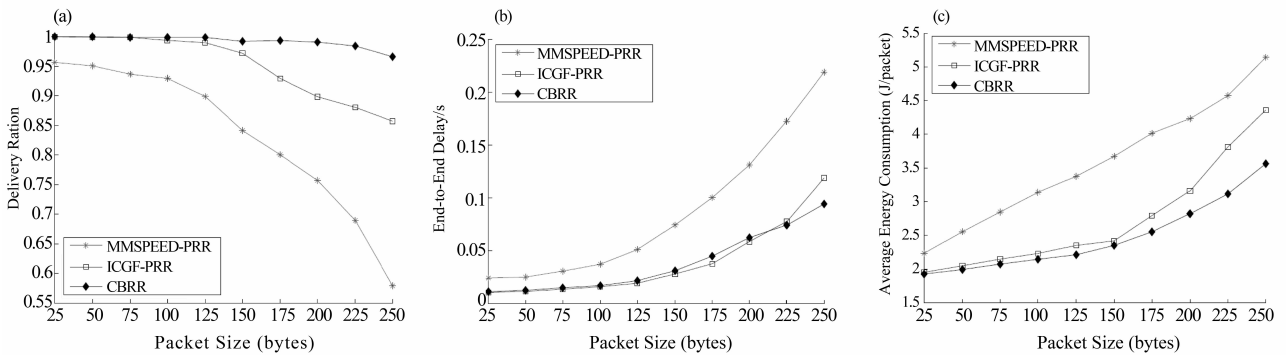


图 4 数据包大小实验：(a) 平均传递成功率、(b) 平均传递延迟、(c) 平均能耗

Fig. 4 Packet size scenario: (a) average delivery, (b) average end-to-end delay, (c) average energy consumption

## 4 结 论

针对无线传感器网络可靠性传输度量标准不够准确的问题，提出了基于接收率模型的协作无信标可靠路由协议 CBRR。CBRR 建立包括包接收率、距离和能量等参数的竞争函数以选择接收节点；当接收节点的可靠性不能满足要求时，协议将使用协作转发或冗余转发方式来满足单跳节点的可靠性要求，从而实现数据传输的可靠性保证。仿真结果表明，与多路径转发方式相比较，协作转发在无线衰

减链路环境下不仅可以提高单跳数据传输的可靠性，还具有较好的传递成功率、端对端延迟以及能量效率等传输性能。但是，仅仅依靠协作转发并不能完全满足可靠性要求，必须在协作转发中考虑可靠性保证策略，这也是 CBRR 传输性能优于 ICGF 的根本原因。

### 参考文献：

[1] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[C]. Proc

- of SenSys'03, Los Angeles, 2003:1 – 13.
- [2] WOO A, TONG T, CULLER D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks [C]. Proc of SenSys'03, Los Angeles, 2003:14 – 27.
- [3] BHATNAGAR S, DEB B, NATH B. Service differentiation in sensor networks[C]. Proc of WPMC'01, 2001, 51 – 62.
- [4] DEB B, BHATNAGAR S, NATH B. ReInForM: reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks[C]. Proc of LCN'03, Bonn, 2003:406 – 415.
- [5] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E. MMSPEED: multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6):738 – 754.
- [6] ZAMALLOA Z M, KRISHNAMACHARI B. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links [J]. ACM Transactions on Sensors Networks, 2007, 3(2):7.
- [7] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):74 – 80.
- [8] SANCHEZ J A, RUIZ P M, MARIN-PEREZ R. Beaconless geographic routing made practical: challenges, design guidelines, and protocols[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(8):85 – 91.
- [9] HUANG X X, ZHAI H Q, FAN Y G. Robust cooperative routing protocol in mobile wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):5278 – 5285.
- [10] CHENG L, CAO J N, CHEN C F, et al. Towards intelligent contention-based geographic forwarding in wireless sensor networks [J]. IET Communications, 2011, 5(12):1711 – 1719.
- [11] IEEE Committee. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. New York:IEEE Press, 1999.
- [12] HUNG Y T, GAO Y, HOU J. Tutorial: working with J-Sim [EB/OL]. <http://j-sim.cs.uiuc.edu/index.html>, 2005 – 01 – 28.

(上接第 38 页)

### 参考文献:

- [1] THURSTON W. The finite Riemann mapping theorem [C]//Invited address, International Symposium in Celebration of the proof of the Bieberbach Conjecture, Purdue University, 1985.
- [2] RODIN B, SULLIVAN D. The convergence of circle packings to the Riemann mapping [J]. J Differential Geom, 1987, 26:349 – 360.
- [3] MARDEN A, RODIN B. On Thurston's formulation and proof of Andreev's theorem [J]. Lecture Notes in Math, 1990, 1435: 103 – 115.
- [4] STEPHENSON K. The approximation of conformal structures via circle packing [J]. Computational Methods and Function Theory, Ser Approx Decompos, Volume 11, World Sci Publishing, River Edge, NJ, 1999: 551 – 582.
- [5] HE Z X, SCHRAMM O. Hyperbolic and parabolic packings [J]. Discrete Comput Geom, 1995, 14: 123 – 149.
- [6] STEPHENSON K. Introduction to circle packing (the theory of analytic functions) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [7] SHARON E, MUMFORD D. 2D-Shape analysis using conformal mapping [J]. Intern J Comput Vision, 2006, 70: 55 – 75.
- [8] RADNELL D, SCHIPPERS E. Quasisymmetric sewing in rigged Teichmüller space [J]. Commun Contemp Math, 2006, 8(4): 481 – 534.
- [9] WILLIAMS G B. Constructing conformal maps of triangulated surfaces [J]. J Math Anal Appl, 2012, 391(1): 113 – 120.
- [10] WILLIAMS G B. Discrete conformal welding [J]. Indiana Univ Math J, 2004, 53(3): 765 – 804.
- [11] LEHTO O, VIRTANEN K I. Quasiconformal mappings in the plane [M]. New York: Springer-Verlag, 1973.
- [12] HE Z X, RODIN B. Convergence of circle packings of finite valence to Riemann mappings [J]. Comm in Anal and Geom, 1993, 1: 31 – 41.
- [13] LAN S Y, DAI D Q.  $C^\infty$ -convergence of circle packings of bounded degree to the Riemann mapping [J]. J Math Anal Appl, 2011, 376: 1 – 10.
- [14] KELINGOS J A. Boundary correspondence under quasiconformal mappings [J]. Michigan Math J, 1966, 13: 235 – 249.
- [15] PFLUGER A. Über die konstruktion riemannscher flächen durch verheftung [J]. J Indian Math Soc, 1960, 24: 401 – 412.
- [16] BEURLING A, AHLFORS L. The boundary correspondence under quasiconformal mappings [J]. Acta Math, 1956, 96: 125 – 142.