

无线传感器网络中基于链路层服务的最可靠路由路径建立算法

杜军朝¹ 刘惠¹ 陈平¹ 武波¹

摘要 无线传感器网络中, 链路通信质量随时空变化很大, 并且有 5% 到 15% 的非对称链路存在. 链路层服务不但可以发现邻居传感器节点, 测量和预测邻居节点间的链路通信质量, 而且还能提供链路数据转发机制减轻单向链路对其他协议的影响. 为了进一步提高路由路径的可靠性和减少能量损耗, 本文利用链路层服务, 采用分布式算法, 为每个传感器节点建立了到汇聚节点的最可靠路由路径, 并理论分析该算法的性能, 最后在无线传感器网络模拟器 TOSSIM 上进行了模拟. 实验结果表明, 基于链路层服务的最可靠路由路径建立算法, 可充分利用单向链路建立更可靠的路由路径, 有多于 17% 的节点建立了更可靠的路由路径, 路由路径的可靠性提高了 2% 到 51%.

关键词 无线传感器网络, 链路层服务, 链路数据转发机制, 最可靠路由路径算法
中图分类号 TP393.2

Building the Best Reliable Routing Tree Using Link Quality Services in WSNs

DU Jun-Zhao¹ LIU Hui¹ CHEN Ping¹ WU Bo¹

Abstract A recent study in wireless sensor networks (WSNs) has found that the link quality varies significantly with spatial and temporal factors and approximate 5% to 15% of all links are asymmetric links. The link quality services are used to measure and estimate the link quality between neighbors and provide the link layer relay mechanism to mitigate the effects of the unidirectional links. In order to provide the best reliable routing tree and reduce energy consumption, we developed a distributed algorithm to build the best reliable routing tree for every node using the link layer services. From statistic analysis and simulation using TOSSIM, we find that the algorithm can prevent from building a broken routing tree and build a more reliable routing tree. More than 17% nodes have built more reliable routing tree and the percentage of the improved reliability is about 2% to 51%.

Key words Wireless sensor networks, link quality services, link relay mechanism, algorithm to build the best reliable routing tree

1 概述

集成了感知、计算和通信能力的无线传感器网络可广泛地应用于环境监控、灾难救助、目标跟踪和战场态势感知等领域^[1~3], 受到国内研究者的广泛关注^[4~9]. 在这类应用中, 传感器节点从监测现场收集信息, 并把信息传送给用户. 无线传感器网络由两种节点构成: 汇聚节点 (Sink node) 和传感器节点 (Sensor node). 传感器节点自组织形成多跳的路由路径, 并通过该路由路径把收集到的信息传送到汇聚节点. 汇聚节点负责连接外部网络, 把从传感器节点收集的信息传送给用户. 因此, 如何为传感器节点建立一条最可靠路由传输路径, 提高无线传感器网络的性能并减少能耗是一个亟待解决的关键问题.

但是, 近来的研究发现, 在基于 Berkeley mote 平台的无线传感器网络中, 存在大量的不规则链路^[10~12], 给无线传感器网络中的 MAC 协议、邻居

和拓扑发现协议、路由协议等的设计带来了新的困难和问题, 具体体现在两个方面: 首先, 由于数据报文接收率随时间和空间因素变化较大, 使得发现邻居传感器节点以及获得邻居间的链路通信质量比较困难, 而这些信息对实现传感器节点之间数据的最佳路由有重要的应用价值; 其次, 大约 5% 到 15% 的链路是非对称链路, 这些非对称链路在节点的不同方位和距离变化很大. 尤其是单向链路的存在, 为无线传感器网络的协议设计带来了新挑战. 例如: 由于单向链路的存在, 在尝试建立最可靠路由路径的时候, 不但有可能建立断路由路径, 还有可能无法建立得到最可靠的路由路径.

这里, 非对称链路是指: 如果传感器节点 A 到传感器节点 B 的报文接收率很高, 而节点 B 到节点 A 的报文接收率很低, 则节点 A 和 B 之间的链路就属于非对称链路. 非对称链路的一种极端情况就是单向链路. 所谓单向链路是指: 节点 A 能够发送信息到节点 B , 而节点 B 发送的消息几乎无法传递到节点 A . 在单向链路中, 由于节点 B 不知道节点 A 接收不到它的消息, 就会导致建立断路由路径. 断路由路径会直接影响传感器节点 A 到汇聚节点的最可靠路径生成问题.

针对单向链路问题, 本文在文献 [13] 的基础上,

收稿日期 2006-12-6 收修改稿日期 2007-5-23
Received December 6, 2006; in revised form May 23, 2007
国家部委重点基金 (9140A24070106DZ01) 资助
Supported by National Key Foundation of China (9140A24070106DZ01)
1. 西安电子科技大学软件工程研究所 西安 710071
1. Software Engineering Institute (SEI), Xidian University, Xi'an 710071
DOI: 10.1360/aas-007-1269

在 TinyOS 平台^[14] 上设计并实现了一个分布式的基于数据链路层服务的最可靠路由路径建立算法, 并且在 TOSSIM 模拟器^[15] 上模拟执行. 模拟结果表明, 有多于 17% 的节点建立了更可靠的路由路径, 路由路径的可靠性提高了 2% 到 51%.

在后续章节中, 首先简单介绍了文献 [13] 中实现的链路层服务; 然后在该链路层服务的基础上, 介绍分布式最可靠路由路径建立算法的设计和实现, 重点通过实例分析如何利用链路层服务建立更可靠的路由路径; 最后对理论分析和模拟执行的结果进行比较.

2 链路层服务

无线传感器网络可用一个带权重的有向图来表示, 如图 1 所示. 其中, 网络中的传感器节点属于有向图的点集合, 节点间的通信链路属于有向图的边集合, 链路的数据报文接收率作为边的权重.

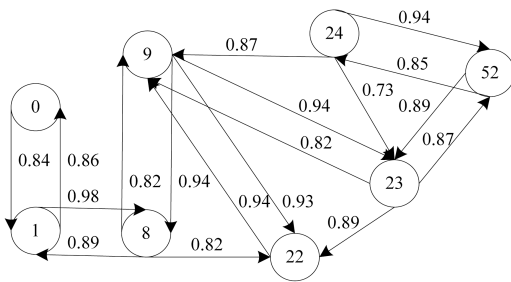


图 1 无线传感器网络拓扑结构示例

Fig. 1 An example topology of WSNs

在图 1 的拓扑结构中, 节点 0 是汇聚节点, 其他节点是传感器节点, 它们要传送数据到汇聚节点. 链路的数据报文接收率是经过测量和预测得到的, 它们会随着时间发生变化. 图 1 中, 某些传感器节点之间存在单向链路, 例如节点 9 和节点 24 之间的链路. 为了测量和预测邻居传感器节点之间链路通信质量, 并消除单向链路的影响, 本文基于国内外对链路通信质量估计的研究工作^[16, 17] 设计和实现了两个链路层服务^[13].

图 2 是该链路层服务软件体系结构. 链路层服务建立在 TinyOS 平台之上, 它包括两个主要服务: 邻居间链路通信质量服务和链路数据转发服务. 由于单向链路的存在, 把传感器节点的邻居节点分为入邻居和出邻居. 传感器节点可以从它的入邻居接收数据报文, 可以发送数据报文到它的出邻居. 传感器节点发现它的入邻居的方法比较简单, 它只须判断能否收到该邻居节点的数据报文. 而传感器节点要发现它的出邻居, 就需要从它的出邻居获得反馈信息. 而由于单向链路的影响, 有节点不能直接从它的出邻居获得反馈信息, 所以该节点不能发现它的

全部出邻居节点.

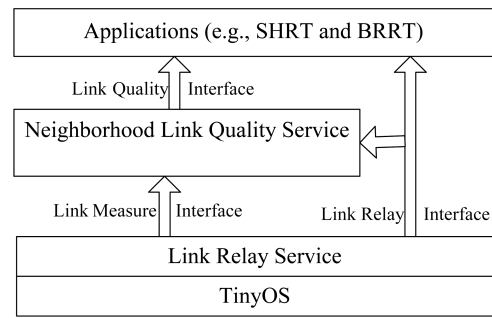


图 2 链路层服务软件体系结构

Fig. 2 The architecture of the link quality services

邻居间链路通信质量服务, 是用来发现节点的入邻居和出邻居, 并测量和预测邻居间的链路通信质量的一种服务. 在该服务中, 邻居节点通过主动广播探测数据报文和被动监听接收数据报文的方式, 并利用 WMEWMA^[16] 来测量和预测节点之间的链路通信质量. 应用程序还可以通过链路通信质量服务接口, 获取节点的入邻居和出邻居, 并且得到从入邻居来的和到出邻居去的最新链路通信质量.

链路数据转发服务是一个通用的服务, 它不仅可以帮助邻居间链路通信质量服务来发现更多的邻居节点, 也可以帮助其他应用程序转发应用报文, 从而减轻由于单向链路造成的影响. 链路数据转发服务定义了转发协议和通用报文结构, 参与转发服务的节点相互协作, 建立一条绕过单向链路的路径. 链路数据转发服务提供了数据转发的机制, 而应用程序需要决定数据转发的策略. 数据报文可以采用单步转发、两步转发、或者多步转发, 每次转发时也可以采用多次重发手段来提高转发的可靠性. 数据报文转发的步数和重发的次数越多, 就最大可能的消除单向链路的影响, 但同时网络上发送的报文数就越多, 消耗的能量就越多.

链路层服务提供了邻居间链路通信质量服务接口和链路数据转发服务接口. 通过邻居间链路通信质量服务接口, 节点可以知道它的入邻居和出邻居的个数, 这些邻居节点的 ID, 以及和它们之间的链路通信质量. 通过链路数据转发服务接口, 应用程序可以转发报文以绕过单向链路. 应用程序需调用 Subscribe 命令注册转发服务, 然后通过 Receive 事件获取转发来的数据报文, 通过在 Relay 事件中发送要转发出去的报文. 对接口的详细使用请参考文献 [13].

3 最可靠路由路径建立算法

在图 1 的无线传感器网络的拓扑结构中, 由于节点之间存在单向链路, 虽然通过链路层服务, 每个节点可以发现它全部入邻居和部分出邻居, 以及

邻居间链路数据报文接收率, 但是每个节点并不知道它们各自到汇聚节点的距离, 以及选择哪个节点作为它的父节点来建立最可靠路由路径. 定义传感器节点 A 到汇聚节点 S 的某条路由路径的可靠性 $Reliability_A$ 为

$$Reliability_A = \prod_A^S PRR \quad (1)$$

其中, PRR 是该路由路径中从节点 A 到汇聚节点 S 的每跳链路数据报文接收率. 例如在图 1 中, 节点 9 到汇聚节点 0 有一条路由路径, 路径包括节点 1 和 8. 这条路由路径的可靠性为 $0.94 \times 0.89 \times 0.86 = 0.72$. 从该定义可知, 要建立节点 A 到汇聚节点 S 的最可靠路由路径, 需要节点 A 选择它的一个邻居节点作为父节点, 然后通过这个父节点来转发节点 A 到汇聚节点 S 的数据报文, 而经由这个父节点建立的路由路径就是该节点的所有路径中可靠性最高的路径. 下面描述最可靠路由路径建立算法, 并讨论存在单向链路的情况下, 算法是如何避免产生断路由路径, 并且建立最可靠路由路径的.

3.1 最可靠路由路径建立过程

汇聚节点广播一条开始建立最可靠路由路径的数据报文, 这个报文中包括节点 ID 和该节点到汇聚节点的最可靠路由路径的可靠性及跳数. 汇聚节点到它自己的路径可靠性为 1.0, 跳数为 0. 其他节点初始化它们各自到汇聚节点的路径可靠性为 0, 跳数为无穷大. 汇聚节点的邻居接收到广播报文后, 它会根据接收到的报文更新它的父节点. 例如, 当节点 A 接收到某个新节点 P 的报文后, 它发现通过这个新节点 P 建立的到汇聚节点 S 的路由路径比它通过当前的父节点建立的路由路径更可靠, 它就用新节点 P 替换它当前的父节点, 同时修改它到汇聚节点的跳数为 P 节点的跳数加一. 节点 A 通过下式计算它通过节点 P 建立的到汇聚节点的路径可靠性

$$Reliability_{A,P} = Reliability_P \times PRR_{A,P} \quad (2)$$

其中, $Reliability_{A,P}$ 是节点 A 通过节点 P 建立的到汇聚节点路由路径的可靠性, $Reliability_P$ 是节点 P 到汇聚节点的路由路径的可靠性 (从节点 P 的广播报文获得), $PRR_{A,P}$ 是从节点 A 到节点 P 的链路数据报文接收率 (从节点 A 的邻居间链路通信质量服务接口获得). 当节点 A 重新选择 P 为它的父节点后, 它就把它 ID 和它到汇聚节点路径可靠性及跳数广播出去, 以便让其他节点有机会选择它作为父节点. 在算法执行过程中, 节点 A 可能会更改几次它的父节点, 并且同一个父节点也会随着它的可靠性的改变而被选中多次. 当每个节点的父节点不再更改, 该算法中止.

3.2 节点路径可靠性计算

当节点 A 接收到节点 P 的广播报文后, 它首先获取该广播报文中节点 P 的 ID 和节点 P 到汇聚节点的路径可靠性; 然后通过链路层服务获取节点 A 到节点 P 之间链路的数据报文接收率; 当节点 A 获取了这些信息后, 节点 A 开始计算若以节点 P 作为父节点时, 它到汇聚节点的路由路径可靠性 $Reliability_{A,P}$; 再将 $Reliability_{A,P}$ 和 $Reliability_{A,C}$ (设 C 为节点 A 的当前父节点, 则 $Reliability_{A,C}$ 为节点 A 当前路由路径可靠性) 进行比较. 若 $Reliability_{A,P}$ 大于 $Reliability_{A,C}$, 则选择节点 P 为父节点.

3.3 避免建立断路由路径

需要注意的是, 在上述最可靠路由路径建立过程中, 如果有单向链路存在, 使用链路层服务可以避免建立断路由路径. 图 1 中, 节点 22 接收到节点 8 的广播信息, 节点 22 发现节点 8 到汇聚节点的路由可靠性高, 可以建立更好的路由路径. 然而, 节点 22 和节点 8 之间存在单向链路, 而节点 22 可利用链路层服务检查节点 8 是否是它的出邻居. 若不是, 节点 22 就不选择节点 8 为父节点, 从而避免产生断路由路径.

3.4 建立最可靠路由路径

同样由于单向链路的存在, 会阻止节点建立更好的路由路径. 图 1 中, 节点 24 最好选择节点 9 作为它的父节点. 可是, 由于单向链路的存在, 节点 24 不能接收节点 9 的广播消息, 它只能接收节点 52 的消息. 如果节点 24 选择了节点 52 作为它的父节点, 在这种情况下, 节点 24 到汇聚节点 0 的路由路径可靠性为 $0.94 \times 0.89 \times 0.82 \times 0.94 \times 0.89 \times 0.86 = 0.49$; 如果节点 9 能够利用链路数据转发服务, 它广播的消息就能够通过节点 23 和节点 52 最终转发到节点 24, 这样节点 24 就会选择节点 9 作为它的父节点, 这时节点 24 到汇聚节点 0 的路由路径可靠性为 $0.87 \times 0.94 \times 0.89 \times 0.86 = 0.63$. 通过链路数据转发服务可知, 转发的步数越多, 节点就越有可能选择更好的父节点. 然而, 转发的步数越多, 必然发送的消息就越多, 消耗的能量就越多, 所以需要有一个折衷.

3.5 报文转发策略

由于无线传感器网络中链路的不稳定, 导致了链路可变数据报文接收率. 为了减轻无线通信链路中转发报文的丢失, 需要定义一些转发策略, 即 P2 策略、P2R1 策略、P2R2 策略和自适应策略. 在算法的实现中, 假设节点 A 改变了父节点, 而在每次广播节点 A 的信息时, 在报文中可同时附加一个其他转发数据. 在 P2 策略中, 节点 A 的信息广播 2

次,并且在每个广播数据中附加一个转发数据,如果节点 A 的父节点没有改变,它不会主动转发其他的转发数据;在 P2R1 策略中,节点 A 的信息广播 2 次,并且在每个广播数据中附加一个转发数据,并且即使节点 A 没有重新选择父节点,也会转发其他节点的报文 1 次;类似地定义了 P2R2 策略,其他每个转发报文也要转发 2 次。

上面的转发策略比较简单,本文定义了自适应策略.在该转发策略中,针对每一个转发数据定义了两个参数来指导转发过程,它们分别是以 $x\%$ 的概率转发到 $y\%$ 的邻居节点.在已知邻居间通信链路的情况下,可以计算需要多少次转发.如图 1 中,若节点 22 需要以 80% 的概率转发消息到它 60% 的出邻居节点.而根据拓扑图可知,节点 22 的出邻居包括节点 9, 22 和 52.而根据邻居节点之间链路的通信质量,利用概率可以计算出,经过 1 次转发就可以完成上述的要求.若用户需要 95% 以上的概率转发到 90% 以上的节点,那么就需要转发 2 次.本文认为,自适应策略中两个参数的设置是应用相关的,需要根据具体的应用要求设置参数值.

3.6 延迟转发策略

模拟研究发现,距离汇聚节点越远的节点改变父节点的频率越大,其主要原因是它的父节点由于距离汇聚节点远,因而有更多的候选路由路径,并且父节点在改变候选路径的情况下,它到汇聚节点的可靠性就发生了变化.根据转发协议,当节点由于父节点改变而导致它到汇聚节点的可靠性改变时,节点要广播它的可靠性信息.节点频繁地改变父节点,会产生大量的广播信息,而且这个广播信息会引起连锁反应,导致节点的子节点及之下的节点广播大量的报文.目前的解决方案是,节点接收到其他节点的广播后,并不马上改变它的父节点,并广播它的可靠性,而是让节点延迟一段时间再广播.这样做的主要目的是在这段延迟时间内,如果节点的父节点又发生变化,它就可以减少一次广播消息.这个延迟的时间比较难估计,本文采用的原则是,节点距离汇聚节点的跳数越大,延迟的时间就越长.

3.7 分布式算法的实现

图 3 是利用链路数据转发服务建立最可靠路由路径的分布式算法,该算法通过分布的方式运行在各个参与算法的节点上.

该算法通过链路数据转发服务的 Receive 事件和 Relay 事件实现.当节点从 Receive 事件接收到广播报文后,它利用接收的报文信息更新暂存在节点的转发数据,或者当前的父节点.它通过调用邻居间链路通信质量服务接口,来判断广播报文中的节点是否是该节点的出邻居,再判断能否通过该节点建立到汇聚节点的最可靠路由路径.

Algorithm 1 Building the best reliable routing path

```

Event Receive (data)
Begin Event
1: if is-more-reliable-than-before(data.id,data.reliability,&i) then
2:   if is-outbound-neighbor(data.id) then
3:     if is-more-reliable-based-on-it(data.reliability) then
4:       current.update ← true
5:       current.id ← data.id
6:       current.reliability ← data.reliability * PRR(data.id)
7:       current.hop ← data.hop + 1
8:       current.delay ← α * current.hop
9:       current.policy ← policyparent
10:    end if
11:   end if
12:   relay[i].update ← true
13:   relay[i].relay ← data.relay
14:   relay[i].id ← data.id
15:   relay[i].reliability ← data.reliability
16:   relay[i].hop ← data.hop
17:   relay[i].delay ← α * current.hop
18:   relay[i].policy ← policyrelay
19: end if
End Event
Event Relay (data)
Begin Event
1: set ← false
2: if is-updated-parent() then
3:   if is-delay-time-expired() then
4:     if is-meet-retransmission-policy() then
5:       set ← true
6:       data.relay ← relayparent
7:       data.id ← idcurrent
8:       data.reliability ← current.reliability
9:       data.hop ← current.hop
10:      change-parent-status()
11:    end if
12:   end if
13: end if
14: if set == false then
15:   if is-need-relay(&i) then
16:     data.relay ← relay[i].relay - 1
17:     data.id ← relay[i].id
18:     data.reliability ← relay[i].reliability
19:     data.hop ← relay[i].hop
20:     change-relay-status(i)
21:   end if
22: end if
End Event

```

图 3 节点最可靠路由路径建立的分布式算法

Fig. 3 The distributed algorithm for a node to build the best reliable routing path

如果节点重新选择了父节点,节点在 Relay 事件中就把其 ID 和它到汇聚节点的路径可靠性及跳数转发出去,以便让其他节点选择它为自己的父节点.如果暂存的转发数据更改,则节点在 Relay 事件中,利用各种转发策略把转发数据转发出去.在转发数据前,通过一个与跳数相关的延迟来减少转发的报文数.链路数据转发服务通用报文采用 TinyOS 平台^[16]上的活动消息 (Active message),它的报文结构为 <sender, msgid, type, count, relay_data[]>,其中字段 sender 是发送节点的 ID, msgid 是该报文的序列号, type 是链路转发数据的

类型, count 是链路转发数据数目, relay_data[] 中存放多份链路转发数据. 在最可靠路由路径建立算法中, relay_data[] 中可存放两份转发数据. 每份转发数据格式为 <relay, nid, hop, reliability>, 其中 relay 字段用来存放该数据需转发的次数, nid 中存放节点的 ID, hop 是该节点到汇聚节点的跳数, 而 reliability 中存放该节点到汇聚节点的路径可靠性.

3.8 理论分析

在已知网络拓扑结构和节点的链路通信质量的情况下, 可以理论分析每个节点建立的最可靠路由路径. 图 4 就是这个理论分析的算法. 通过这个算法不仅可以计算节点的路由路径可靠性, 同时还可以计算采用了链路数据转发服务, 节点建立的路由路径的可靠性比没有采用该服务建立的路由路径的可靠性提高了多少. 算法的基本思想是计算每个节点在不同的转发步数下的出邻居, 然后节点尝试基于它的每个出邻居计算它到汇聚节点的路由路径可靠性, 从中选择最可靠的路径. 这是一个从节点到汇聚节点的递推过程. 这个过程不停地循环迭代, 直到每个节点的父节点都不再改变. 理论分析是理想结果, 它尝试了所有的链路, 而在模拟执行中或者实际运行中, 由于报文丢失, 导致最后的结果要差一些.

Algorithm 2 Calculate the improved path reliability

Procedure Calc-im-reliability ($G, N0, N1, N2, IP1, IP2$)

Begin Procedure

- 1: call Calc-reliability($G, N0, P0$)
- 2: call Calc-reliability($G, N1, P1$)
- 3: call Calc-reliability($G, N2, P2$)
- 4: **for all** $v \in V(G)$ **do**
- 5: $IP1(v) \leftarrow Reliability(v, P1) - Reliability(v, P0)$
- 6: $IP2(v) \leftarrow Reliability(v, P2) - Reliability(v, P0)$
- 7: **end for**

End Procedure

Procedure Calc-reliability (G, N, P)

Begin Procedure

- 1: **for all** $v \in V(G)$ **do**
- 2: initialize $P(v)$ based on parent of the shortest path
- 3: **end for**
- 4: **repeat**
- 5: **for all** $v \in V(G)$ **do**
- 6: **if** $\exists u \in N(v) \wedge NewReliability(v, u) > CurrentReliability(v)$ **then**
- 7: update $P(v)$ based on u
- 8: **end if**
- 9: **end for**
- 10: **until** No Change of P

End Procedure

图 4 节点最可靠路由路径分析算法

Fig. 4 The algorithm for a node to analyze the best reliable routing path

在该算法中, G 是网络拓扑图, $N0$ 存放每个节点的无转发出邻居, $N1$ 存放每个节点的单步转发出邻居, 而 $N2$ 存放每个节点的两步转发出邻居. 这些数据结构作为理论分析算法的输入. $IP1$ 存放经过单步转发, 每个节点最可靠路由路径可靠性的提高

值, 而 $IP2$ 存放经过两步转发, 每个节点最可靠路由路径的可靠性的提高值. 这些数据结构作为理论分析算法的输出.

4 理论分析及模拟结果比较

本文在 TinyOS 平台^[14]上, 基于链路层服务^[13]实现了最可靠路由路径建立算法, 并利用 TOSSIM 模拟器^[15]模拟了算法的执行. TinyOS 是传感器网络中使用的嵌入式操作系统, 它采用部件化的开发方法; 而 TOSSIM 是传感器网络的模拟器, 它可以设置无线传感器网络中每条通信链路的比特出错率, 用来模拟真实的无线传感器网络通信环境. TinyOS 和 TOSSIM 在传感器网络研究方面被广泛应用. 本文利用 TOSSIM 搭建了一个 156 个节点的无线传感器网络. 这些节点随机分布, 节点之间的比特出错率来自通过搭建小规模 Berkeley MICA2 硬件网络收集到的真实数据. 在最可靠路由路径建立算法模拟执行时, 先运行链路层服务, 收集了节点之间的链路通信质量信息, 以及每个节点的单步转发和两步转发的出邻居. 在此基础上, 利用链路层服务, 来建立最可靠路由路径. 当每个节点重新选择父节点时, 节点就把它的新父节点, 以及基于新父节点到汇聚节点的路由可靠性采用不同的转发策略转发出去.

图 5 (见下页) 是采用了链路数据转发服务后, 节点的路由路径可靠性提高的百分比的 CDF 图. 其中, x 轴是节点路由路径可靠性提高的百分比, y 轴是节点所占总节点数的百分比. 从图 5 可看出, 从理论分析和模拟执行中, 有多于 17% 的节点提高了路径可靠性, 而路径可靠性提高的百分比在 2% 到 51% 之间. 两步转发算法比单步转发算法效果要好, 同时 P2R2 策略比 P2R1 策略好, 而 P2 策略效果相对较差.

图 6 展示了采用不同的转发步数和转发策略, 节点发送报文的 CDF 图. 其中, x 轴是节点发送的报文数, y 轴是节点所占总节点数的百分比. 从图 6 可以看出, 增加了转发步数和重发次数后, 节点发送的报文数也明显地增加.

图 7 中比较了采用不同的转发策略时, 节点发送报文增加数的 CDF 图. 从这些图中可以看出, 增加转发步数和重发报文导致节点会多发送报文. 而从长期来看, 选择一个好的路由路径会减少网络发送的报文数.

图 8 是采用了基于节点跳数的延迟转发机制, 节点较少发送报文数的 CDF 图. 从图 8 可以看出, 采用延迟转发策略可以减少节点发送的报文数, 而且转发的步数越多, 节点减少的报文数就越多. 总之, 从上面的分析和模拟结果可以看到, 为了建立更可靠路由路径, 就需要多步转发, 并且重发报文, 但是采用这种方式会增加节点发送和接收的报文数.

所以, 需要根据具体的应用来调整发送的策略. 而基于节点跳数的延迟转发策略, 可以减少发送的报文数, 同时不损害最终的执行结果.

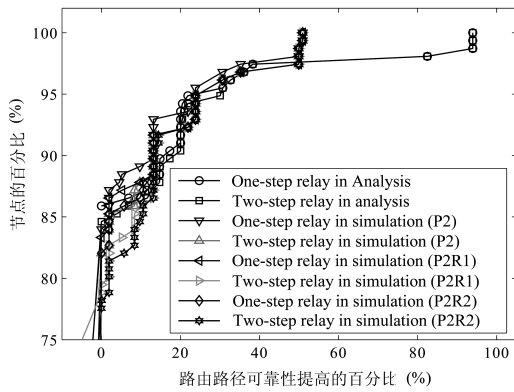


图5 节点路由路径可靠性提高的 CDF 图

Fig.5 The CDF of the improved reliability of the routing path

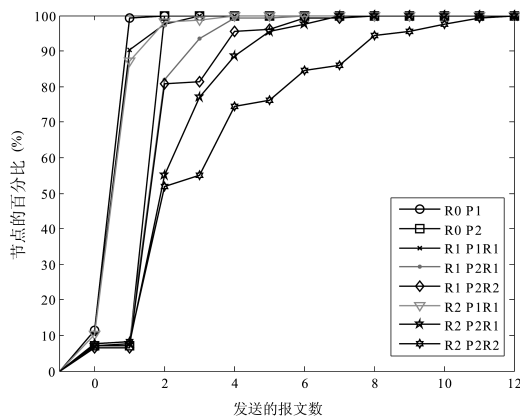


图6 节点发送的数据报文的 CDF 图

Fig.6 The CDF of the sending packets

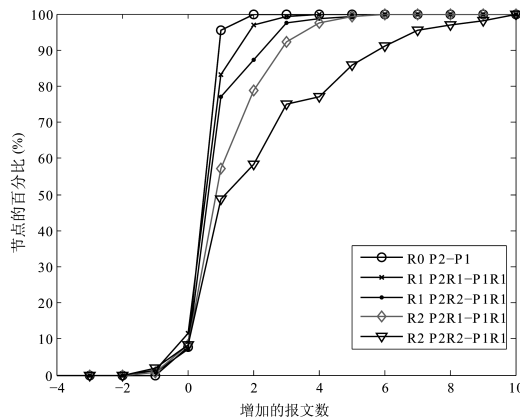


图7 不同转发策略增加的报文数的 CDF 图

Fig.7 The CDF of the increased packets for different relay policies

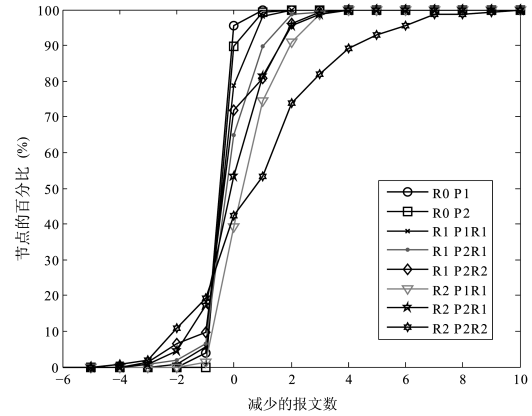


图8 延迟转发节点减少数据报文的 CDF 图

Fig.8 The CDF of the reduced packets for delay relay mechanism

5 结论

本文在无线传感器网络链路层服务的基础上, 设计并实现了一个分布式的最可靠路由路径建立算法. 该算法利用链路层服务, 避免建立由于单向链路造成的断路由路径, 同时通过链路数据转发服务, 传感器节点可以建立更可靠的路由路径. 本文实现了基于单步转发和两步转发的算法, 及 P2、P2R1、P2R2 等转发策略. 通过在 TOSSIM 上的模拟执行发现, 有多于 17% 的传感器节点提高了它们到汇聚节点之间的路由路径可靠性, 提高的可靠性在 2% 到 51% 之间. 模拟结果表明, 随着转发步数增加, 报文重发次数增加, 建立的路由路径更优, 然而节点需要发送和接收更多的数据报文.

References

- Simon G, Ledeczi A, Maroti M, Balogh G, Kusy B, Sallai J, Pap G. Sensor network-based countersniper system. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor System. New York, USA: IEEE, 2004. 1~12
- Szewczyk R, Osterweil E, Polastre J, Hamilton M, Mainwaring A, Estrin D. Habitat monitoring with sensor networks. *Communications of the ACM*, 2004, 47(6): 34~40
- Xu N, Rangwala S, Chintalapudi K K, Ganesan D, Broad A, Govindan R, Estrin D. A wireless sensor network for structural monitoring. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor System. New York, USA: IEEE, 2004. 13~24
- Ren Feng-Yuan, Huang Hai-Ning, Lin Chuang. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282~1291 (任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282~1291)
- Ma Zu-Chang, Sun Yi-Ning, Mei Tao. Survey on wireless sensor networks. *Journal of China Institute of Communications*, 2004, 25(4): 114~124 (马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述. *通信学报*, 2004, 25(4): 114~124)

- 6 Cui Li, Ju Hai-Ling, Miao Yong, Li Tian-Pu, Liu Wei, Zhao Ze. Overview of wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, **42**(1): 163~174 (崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 李天璞, 刘巍, 赵泽. 无线传感器网络研究进展. *计算机研究与发展*, 2005, **42**(1): 163~174)
- 7 Li Jian-Zhong, Li Jin-Bao, Shi Sheng-Fei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. *Journal of Software*, 2003, **14**(10): 1717~1727 (李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. *软件学报*, 2003, **14**(10): 1717~1727)
- 8 Wang Rui, Liang Yan, Pan Quan, Cheng Yong-Mei. A self-organization algorithm in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(5): 829~833 (王睿, 梁彦, 潘泉, 程咏梅. 无线传感器网络信息感知中的自组织算法. *自动化学报*, 2006, **32**(5): 829~833)
- 9 Wen Ying-You, Feng Yong-Xin, Wang Guang-Xing. Sensor distribution optimization based on extending-tree in sensor network. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(5): 737~742 (闻英友, 冯永新, 王光兴. 无线传感器网络中基于伸展树的感知节点分布优化. *自动化学报*, 2005, **31**(5): 737~742)
- 10 Zhao J, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. California, USA: 2003. 1~13
- 11 Zhou G, He T, Krishnamurthy S, Stankovic J A. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Boston, USA: 2004. 125~138
- 12 Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Los Angeles, USA: IEEE, 2004. 517~526
- 13 Du J Z, Shi W S, Sha K W. Asymmetry-aware link quality services in wireless sensor networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, **3824**: 745~754
- 14 Levis P, Madden S, Gay D, Polastre J, Szewczyk R, Woo A, Brewer E, Culler D. The emergence of networking abstractions and techniques in tinyOS. In: Proceedings of the 1st Conference on Symposium on Networked System Design and Implementation. California, USA: 2004. 1~14
- 15 Levis P, Lee N, Welsh M, Culler D. TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire tinyOS applications. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor System. California, USA: 2003. 126~137
- 16 Kim M, Noble B. Mobile network estimation. In: Proceedings of ACM Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy: IEEE, 2001. 298~309
- 17 Woo A, Tong T, Culler D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor System. California, USA: 2003. 14~27



of this paper.)



杜军朝 西安电子科技大学软件工程研究所讲师, 在职博士. 主要研究方向为无线传感器网络. 本文通信作者.

E-mail: dujz@xidian.edu.cn

(**DU Jun-Zhao** Lecturer and Ph.D. candidate at SEI, Xidian University. His main research interest is wireless sensor networks. Corresponding author

刘惠 西安电子科技大学软件工程研究所讲师, 在职博士. 主要研究方向为嵌入式系统. E-mail: liuhui@xidian.edu.cn

(**LIU Hui** Lecturer and Ph.D. candidate at SEI, Xidian University. Her main research interest is embedded system.)

陈平 西安电子科技大学软件工程研究所教授. 主要研究方向为面向对象技术.

E-mail: chenping@sei.xidian.edu.cn

(**CHEN Ping** Professor at SEI, Xidian University. His main research interest is object-oriented technology.)

武波 西安电子科技大学软件学院教授. 主要研究方向为互联网技术.

E-mail: bowu@xidian.edu.cn

(**WU Bo** Professor at Software School, Xidian University. His main research interest is web technology.)