

无线传感器网络随机投递传输协议性能分析*

熊斌斌⁺, 林 闯, 任丰原

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

Performance Analysis of Stochastic Delivery Transport Protocols in WSNs

XIONG Bin-Bin⁺, LIN Chuang, REN Feng-Yuan

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: E-mail: xbb05@mails.tsinghua.edu.cn

Xiong BB, Lin C, Ren FY. Performance analysis of stochastic delivery transport protocols in WSNs. *Journal of Software*, 2009,20(4):942-953. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3265.htm>

Abstract: In general, the Wireless Sensor Networks (WSNs) are resource constrained, and with high Bit Error Rate (BER) links. Highly reliable transport protocol for this kind of network is challenging and costly in terms of energy and delay expenditure. On the other hand, many applications deployed on WSNs can live with some packets losses provided that the loss rate is tolerable. Hence, the stochastic delivery transport protocols emerge as the applications and network constrains require. The stochastic delivery transport protocols carry out a profitable trade-off between the reliability and resource cost, thereby are adopted by many applications in WSNs. To analyze the performance metrics of this kind of protocol in multi-hop WSNs, a Finite State Markov Chain (FSMC)-based model is developed in this paper. By using this model the performance parameters of the protocols can be calculated directly, easily and comprehensibly. The effects of different network parameters (such as number the hops, the bit error rate of the wireless link) on the performance are investigated. To enhance the efficiency of stochastic delivery protocols, hop by hop acknowledgement scheme is introduced in some stochastic reliable transport protocols, and so does the broadcast character of the wireless channel. The analytical results show that the effects of these schemes on performance are diverse with the change of network parameter settings. Finally, the paper presents some advice for improving these protocols based on the analysis. Simulation results also demonstrate the effectiveness of these improvements.

Key words: fundamental matrix; finite state Markov chains with absorbing states; modeling; performance analysis; transport protocol; wireless sensor networks (WSNs)

摘 要: 无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)通常是资源有限的,且具有较高的链路差错率.在这样的网络环境中,高可靠性的传输协议会消耗过多的能量并产生较大的传输延迟.而另一方面,许多部署在 WSNs 环

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60573122, 60773138 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2006AA01Z225, 2006AA01Z218 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Basic Research Program of China under Grant No.2003CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Program for New Century Excellent Talents in University of China (NCET) (新世纪优秀人才支持计划)

Received 2007-08-17; Accepted 2008-01-29

境中的应用可以容忍一定程度的数据包丢失,因此,在这种特殊的网络背景和应用需求环境中,随机投递传输协议应运而生.这种类型的传输协议在有限的网络资源和传输可靠性之间实现了适当的折衷,符合众多传感器网络应用系统的特殊需要.为了对已有的几种随机投递传输协议进行性能分析与评价,采用带吸收态的有限状态马尔可夫链模型对其进行建模.这种建模方法使得协议性能参数的分析计算过程更加直观、简练、易于理解.分析了不同网络参数条件(如源到目的节点之间的跳距,无线链路位差错率等等)对于协议性能的影响.为了提高随机可靠传输协议的效率,部分协议中引入了逐条应答机制或利用无线链路广播特性.分析结果显示,这些措施对协议性能的影响在不同的网络参数条件下也有所不同.最后,为体现分析模型的作用,基于理论分析结果对部分协议进行了改进,并仿真显示改进的效果.

关键词: 基础矩阵;带吸收态的有限状态马尔可夫链;建模;性能分析;传输协议;无线传感器网络

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

传输的可靠性是网络最为重要的要求之一.与传统网络不同,WSNs 通常作为末端网络来部署,进而连接到较大的网络环境之中.因此,它不仅仅是传输数据的基本组织,还担负着监控物理环境、感知目标状态等任务.这些依赖于应用的任务对 WSNs 提出了比可靠分组传输更多的可靠性要求.而且,不同类型的应用对传输协议的可靠性要求也不尽相同,这导致 WSNs 的可靠传输协议呈多样化趋势发展.

无线多跳传感器网络中的可靠传输不是一个容易解决的问题.网络部署环境的恶劣、无线信道的高误码率、有限的带宽、节点失效等都可能导致传输过程中分组的丢失.在这样的网络环境中,实现高可靠性的传输协议面临着众多的挑战.另一方面,许多 WSNs 应用可以容忍一定程度的丢包率.例如在监视一个缓慢变化的物理环境时,传感器节点周期性地感知数据发送给 sink 节点或簇首节点,这些数据通常具有较高的时空相关性.只要目的节点接收到一定数量的数据包,能够产生满足应用需求的结果,这些应用就可以正常运行.基于上述两点事实,在 WSNs 领域,一种新的传输协议应运而生.依据文献[1,2]中的分类方法,这种类型的可靠传输协议被称为随机投递(stochastic delivery)传输协议.

与传统的高可靠性传输协议不同,随机投递传输协议允许传输过程中存在一定程度的丢包.源节点并不需要确定被传输的分组是否成功抵达目的节点,因此放弃了端到端的差错检测与恢复机制.在特殊的应用要求与网络背景条件下,这种类型的传输协议以牺牲可靠性为代价,有效地降低了传输能耗,减少了传输时延,同时节省了带宽.根据应用的要求不同,有两种方式可以提供这种随机投递的传输服务:其一是从接收方考虑,可以规定其在特定周期内接收的数据包数量.例如,在固定时段内至少接收 m 个分组,小于 m 的任何数量都视为失败.ESRT(event-to-sink reliable transport)^[3]协议即采用这种机制;另一种是从发送方考虑,为传输的分组规定一个期望传递概率(desired delivery probability).诸如 HHR(hop by hop reliability),HHRA(hop by hop reliability with acknowledgments),HHB(hop by hop broadcast),HHBA(hop by hop broadcast with acknowledgments)^[4],ReInforM^[5]等协议即采用这种机制.注意,规定周期时间内接收数据包数量的随机投递传输协议与规定期望传递概率的随机投递传输协议在成功概率的计算上有所不同.

本文采用有限状态离散时间的马尔可夫链(finite state Markov chain,简称 FSMC)模型^[6,7]对几个规定期望传递概率的随机投递传输协议进行建模分析.采用 FSMC 模型的建模分析方法的好处在于,它可以极大地简化性能参数解析表达式的推导过程.这里所关注的协议性能参数主要包括平均能耗、时延、成功概率等.

1 预备知识

在对随机投递传输协议进行建模之前,首先需要对这些协议本身进行概要介绍.同时,为方便进行建模和理论分析,需要对系统模型环境给出合理的假设条件.最后,本节也会对 FSMC 相关知识进行简单叙述.

1.1 协议描述

(1) 逐跳可靠传输协议(HHR)

在文献[4]中,为引出 HHB 和 HHBA 协议,作者首先提出了两种单路径的随机投递传输协议,它们分别是逐跳可靠传输协议 HHR 和带应答的逐跳可靠传输协议 HHRA.其中的 HHR 协议是最简单的随机投递传输协议.该协议中,距离目的节点 H 跳的转发者向其下一跳转发节点发送同一份数据包多次.在给定了从源到目的的跳距以后,期望的端到端传递概率 r 可以根据公式 $\prod_{i=1}^H H_i = r$ 转化成为一系列的逐跳传递概率 r_i .每一跳需要重复发送的数据包副本数用 M_i 表示.一旦下一跳转发节点至少成功接收到这 M_i 个拷贝中的一份,它就会像一个新的源节点那样继续整个发送过程.

(2) 带应答的逐跳可靠传输协议(HHRA)

该协议是 HHR 协议的一个变体.在这个协议中,第 h 跳的转发者发送至多向其下一跳邻节点转发同一数据包的 M_i' 份副本.每次发送一份副本后,转发节点会等待来自接收者的应答包.如果转发者成功收到了应答包,则终止本跳后续副本的转发过程.此协议的发送过程与链路层的停等 ARQ(automatic error request equipment)策略十分相似.

(3) 逐跳广播传输协议(HHB)

该协议利用了无线信道的广播特性.转发者 i 向其 k_i 个下一跳邻节点多次发送同一数据包.如果这 k_i 个邻节点中的任何一个成功地接收到了至少一个数据包,它就会以一定的概率继续转发该数据包.此概率保证在所有的 k_i 个邻居节点中,平均只有一个节点成功接收数据包并继续向下一跳转发.当中间节点决定转发数据包的时候,它表现得就如同一个新的源节点一样.

(4) 带应答的广播传输协议(HHBA)

该协议是 HHB 协议的一个变体.协议引入逐跳应答机制来增加传输的可靠性,同时减少传输过程中的能量消耗.与 HHB 协议类似,转发节点 i 向其 k_i' 个下一跳邻节点多次发送同一份数据包,但转发的时间间隔大于 HHB 协议.该时间间隔足够接收节点回送应答包.转发节点收到应答包后,停止广播剩余的副本.因此,这种协议使得转发者发送的副本数有可能少于 HHB 协议.特别是只有当一个节点决定成为一个新的转发者的时候,它才会向发送方回送应答包.

值得注意的是,Deb 等人在文献[4]中提到,通过利用无线信道的广播特性,HHB 和 HHBA 协议可以有效地降低数据传输过程的负载,并在期望的投递概率和负载之间寻找适当的折衷点.然而实际上,转发者下一跳邻节点的数目对协议的传输能耗影响很大,特别是在位差错率较低的链路条件下.当链路条件较好时,向所有邻居节点广播数据的做法会产生较大的冗余数据,从而造成能量的浪费.本文第 3 节对此同样会予以详细说明.

(5) ReInforM 协议

ReInForM 协议同样由 Deb 等人开发.该协议的主要思想是,通过在多条随机选择的路径上同时发送同一数据包的多个副本来产生发送数据的冗余,以提高传输过程的可靠性.在无线多跳的传感器网络中,为达到期望的传递概率,每次转发需要产生的数据包副本数(路径数),是根据数据包携带的动态数据包状态值实时计算而得到的.协议工作过程描述如下:

每一个转发节点掌握本地的信道差错率信息 d_i ,该节点到 sink 节点的跳距 h_i 以及它所有的邻居节点和邻居节点到 sink 节点的跳距信息.利用这些已知信息,转发节点可以计算出如果数据包以期望的概率到达 sink 节点,当前跳转发过程所需要的路径数(或者说是需要发送的副本数).转发节点 i 将其邻居节点分为 3 个集合 H_i^- , H_i^0 和 H_i^+ .集合 H_i^- 包含所有至 sink 节点跳距满足 $h_j=h_i-1$ 的邻居节点;集合 H_i^0 包含了所有至 sink 节点跳距满足 $h_j=h_i$ 的邻居节点;而集合 H_i^+ 包含了所有至 sink 节点跳距满足 $h_j=h_i+1$ 的邻居节点.在转发数据包时,转发节点首先随机选择集合 H_i^- 中的一员,然后指定由它在正确收到数据包后无条件地向下转发.接下来,依次在集合 H_i^- , H_i^0 和 H_i^+ 中分配剩余的 p_i-1 份拷贝.也就是说,当且仅当集合 H_i^- 中的所有节点分配完毕后再考虑集合 H_i^0 ,最后考虑集合 H_i^+ .如果这些邻居节点正确地接收到了数据包,它们分别按所属的集合以概率 PH_i^- , PH_i^0 和 PH_i^+ 转发数据包,3 个概率取值满足如下关系等式^[2]:

$$PH_i^- = \frac{PH_i^0}{1-d_i} = \frac{PH_i^+}{(1-d_i)^2} \quad (1)$$

多路径转发策略的使用可以避免严重的信道差错所导致的传输失败^[5]。同时,随机选择路径的方法还可以使得能量的消耗更为平均,有利于提高全网生存周期。协议的路径选择过程仅仅依赖于本地信道差错率而无须对多路径进行预先的计算和维护。但值得注意的是,为了决定是否转发一个数据包,中间节点必须了解其邻居节点的详细信息。例如,其邻居节点的数据和它们到目标节点的跳距。此外,协议正常运行的另一个重要前提条件是必须保证存在足够多的可用的路径数。因此,虽然协议通过在多条路径上发送数据包的多份副本,提高了发送的成功概率、有效地降低了发送延迟,但同时,它也对路由协议提出了严格而苛刻的要求。转发节点到目的节点的路由信息必须及时更新,尤其是在靠近目的节点时,失效的路径将会极大地影响发送过程可靠性。此外,协议的发送能耗相对较高,本文第3节在介绍协议的分析模型时将会对这一点进行详细说明。

1.2 系统模型

为方便对随机投递传输协议进行建模和理论分析,我们在这一节对 WSNs 环境进行必要的假设,建立系统模型。考虑包含 N 个传感器节点和一个 sink 节点的无线多跳传感器网络。相对于其他节点来说, sink 节点能量较为充足,处理能力较高,内存缓冲区较大。每一个传感器节点有固定的无线通信范围。节点的邻居与其共享同样的通信范围。这样的假设在密集的 WSNs 中比较容易满足。从源到 sink 节点的跳距由 H 表示。

为了简化理论分析,假设所有的无线信道为简单的二进制对称信道(binary symmetric channel,简称 BSC)。数据包在某一跳无线链路上的传递期间,假定该信道的位差错率为常量。虽然现实环境中无线信道突发深衰落特性使得人们很难以 BSC 来对其进行建模,但研究者们已经开发出很多专门用于改善和提高无线信道质量的协议^[8,9],尽力消除多径衰落、漫射、移动、通信距离等因素给无线信道带来的影响和引入的差错。因此,借助适当的数据链路层协议和物理层增强机制后,相邻节点之间的无线链路被优化为一个可靠的或半可靠的数据传输链路是可行的。

传感器节点的能量消耗问题一直为人们所重视,并早已成为 WSNs 应用系统研究的重点和热点。诸如文献 [9,10] 等很多研究都提出了不同级别、不同精确程度的能量消耗模型。但这些模型仅适用于底层协议研究,对于高层协议(如传输协议)来说,采用这些模型显得过于繁杂。因此,在研究高层协议的能量消耗问题时,需要选择适当简化的节点能耗模型,这样可以大大降低理论分析过程的复杂度。考虑两个传感器节点通过 BSC 连接,该信道在一个数据包的传输过程中位差错率是稳定的。那么,节点在发送和接收一个 l 位长数据包时,其能耗可以由如下公式表示^[1]:

$$e_t(l) = e_{t,0} + e_t \cdot l \quad (2)$$

$$e_r(l) = e_{r,0} + e_r \cdot l \quad (3)$$

其中, $e_{t,0}$ 和 $e_{r,0}$ 分别是发送和接收一个数据包时节点消耗的固定能量。这种固定能量消耗包含无线电收发器切换能量、处理器唤醒能量等因素。参数 e_t 和 e_r 分别是传输和接收一比特数据所消耗的能量。相对于前面提到的能耗来说,节点的其他能量消耗较少,可忽略不计。这里,符号 $e_{t,0}$, $e_{r,0}$, e_t 和 e_r 可以认为是底层可变能耗参数的统计平均值。最后,在通信范围固定的假设条件下,通信距离参数不再出现在模型之中。需要注意的是,本文假设接收节点完全检测不到接收信号的情况较少,不予考虑,因此每次传输过程均需要计算发送和接收能耗。

接收和发送一个 l 比特的数据包时的延可由如下公式表示:

$$t(l) = t_b \cdot l \quad (4)$$

其中, t_b 是接收/发送一比特数据的平均时延。因为本文研究的重点是传输协议本身所产生的能耗和时延等,所以发送/接收数据的排队延迟、调制/解调产生的延迟在这里都忽略不计。它们应该是拥塞控制和流量控制协议所需要考虑的问题。

对于路由层协议,本文假设网络总是全连通的。根据传输协议的需要,从源节点到 sink 节点的单路径、多路径或广播路径总是存在的,并随时可以使用。

1.3 数学预备知识

如果某一随机过程确定是要终止的,那么它显然包含相应的“最终”或“停止”状态.在马尔可夫链理论中,这种状态称为吸收态(absorbing state).如果一个 FSMC 的所有状态或者是瞬态、或者是吸收态的话,那么它就被称为带吸收态的有限状态马尔可夫链.

吸收态的集合是一个闭集.为了研究从瞬态转移到吸收态的相关问题,我们首先假设一个拥有 $r+q$ 个状态的马尔可夫链,其状态分别为: $s_1, s_2, \dots, s_r, s_{r+1}, \dots, s_{r+q}$. 其中, s_1, s_2, \dots, s_r 表示吸收态,剩余的 q 个状态表示瞬态.这样一个马尔可夫链的转移状态概率矩阵可用分块矩阵的形式表示为^[7]

$$P = \begin{pmatrix} E & 0 \\ R & Q \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, Q 是一个 $q \times q$ 阶子矩阵,表示随机过程在瞬态之间的转移概率.而 $q \times r$ 阶矩阵 R 对应着从瞬态到吸收态的转移概率.矩阵 E 代表一个 $r \times r$ 阶单位阵,矩阵 0 代表 $r \times q$ 阶零矩阵.

现在我们感兴趣的问题在于:到达吸收态之前的平均等待时间是多少?随机过程最终要向哪个状态转移?要回答第 1 个问题,我们需要计算过程在到达吸收态之前在各个瞬态之间转移的平均步数.要解决第 2 个问题,就必须确定过程到达每一个吸收状态的概率.下面我们对解决这两个问题的方法分别加以描述.

当 $n \rightarrow \infty$ 时,可以证明存在一个 $q \times q$ 阶矩阵 N 满足 $N = E + Q + Q^2 + \dots = (E - Q)^{-1}$. 该矩阵的元素 $n_{i,j}$ 表示过程从瞬态 i 出发,在进入到吸收态之前进入瞬态 j 的平均次数.因此,过程从瞬态 i 出发,到达吸收态之前的平均等待时间就是过程进入各个瞬态的次数之和,也就是矩阵 N 的第 i 行元素之和.可由以下公式表示^[6]:

$$E_i = \sum_{j=1}^q n_{i,j} \quad (6)$$

定义一个 $q \times r$ 阶矩阵 $B = N \cdot R$. 矩阵的元素 $b_{i,j}$ 表示过程从瞬态 i 出发,最终进入吸收态 j 的概率^[6].

$$p_{i,j} = b_{i,j} \quad (7)$$

矩阵 N 通常被称为基础矩阵,因此这一方法也相应地被称为基础矩阵法^[6].

带吸收态的 FSMC 可以很好地描述带吸收壁的随机游动过程.作为状态转移概率矩阵的子矩阵,其基础矩阵 N 描述了随机过程在到达吸收态之前与各个瞬态之间的转移关系.而随机游动过程恰好契合了数据包的传递过程.因此,基于 FSMC 的建模分析方法也逐渐被应用于网络协议的性能分析领域.文献[11]使用带吸收态的 FSMC 模型,针对不同的 ARQ 策略,对多跳无线网络环境下端到端的单数据包传输过程进行建模和性能分析.文献[12]同样使用该模型,在无线多跳、多速率的网络环境下,分析端到端的成块数据传输性能.

2 协议模型

我们现在开始对前面介绍的随机投递传输协议用 FSMC 模型进行建模.不同的随机投递传输协议的 FSMC 模型具有一定程度的相似性:给定了从源到 sink 节点的跳距 H ,这些模型的瞬态数量也是 H .每一个瞬态 h 对应于发生在第 h 跳的数据包传递子过程.模型之间的区别是由于具体协议在每一跳上的数据传递策略不同,从而导致的模型状态转移概率表达式的不同.

2.1 逐跳可靠传输协议(HHR)

该协议非常简单,推导性能计算公式的关键在于如何获得第 h 跳成功地投递数据包所需要重复发送的副本数 M_h .第 h 跳的发送节点在获取了逐跳投递期望概率 r_h 、当前跳无线链路的比特差错率 p 之后,则可以按公式(8)计算该跳接收节点至少成功接收到一个长度为 l 比特的数据包所需要发送的副本数 M_h ^[11]:

$$M_h = \left\lceil \frac{\log(1-r_h)}{\log d_h} \right\rceil; (h \in [1, H]) \quad (8)$$

其中, $d_h = 1 - (1-p)^l$ 表示由无线信道的比特差错而产生的丢包概率.数据包从源到目的端的传输过程可用上一节介绍的 FSMC 过程描述.设数据包从源至目的端所经过的传输路径共 H 跳,则 FSMC 过程共 $H+2$ 个状态 s_0, s_1, \dots ,

s_{H+1} ,其中, s_0,s_1 表示最终传输成功和失败状态,为吸收态; s_2,\dots,s_{H+1} 表示在某一跳链路上传输时的状态,为瞬态.传输过程的状态转移概率矩阵 P 为公式(5)所示的 $H+2$ 阶方阵,其 $H \times H$ 阶子矩阵 Q 的矩阵元素和 $H \times 2$ 阶子矩阵 R 的矩阵元素可以分别用公式(9)及公式(10)表示:

$$q_{h,k} = \begin{cases} 1-d_h^{M_h}, & h \in [1, H-1]; k = h+1; \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$r_{h,k} = \begin{cases} d_h^{M_h}, & h \in [1, H]; k = 1 \\ 1-d_h^{M_h}, & h = H; k = 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $d_h^{M_h}$ 表示第 h 跳无线链路上所有 M_h 份副本全部传递失败的概率,则 $1-d_h^{M_h}$ 表示至少有一份传递成功的概率.进一步考虑,根据前面介绍的带吸收态的有效状态马尔可夫链理论,整个数据包传输过程的能量消耗可用公式(11)表示,其中, $M_h(e_i(l)+e_r(l))$ 表示长度为 l 比特的数据包在第 h 跳无线链路上传输 M_h 次时所消耗的平均能量.传输过程的平均时延可以用公式(12)来表示,其中, $M_h \cdot t(l)$ 表示传输过程在第 h 跳所消耗的平均时延.

$$E_{hhr} = \sum_{h=1}^H n_{1,h} \cdot M_h \cdot (e_i(l) + e_r(l)) \quad (11)$$

$$T_{hhr} = \sum_{h=1}^H n_{1,h} \cdot M_h \cdot t(l) \quad (12)$$

2.2 带应答的逐跳可靠传输协议(HHRA)

文献[4]在分析该协议的性能参数时,作者假设应答包是无条件成功回送给发送者的.这种假设忽略了引入应答机制所带来的不确定性,从而也忽略了它给传输性能所带来的负面影响.为了获得更加准确的分析结果,我们在性能计算公式的推导过程中考虑了这种不确定性,提高了模型计算结果的精确度.

与 HHR 协议一样,如果下游邻居节点正确接收到至少一份被转发的数据包,就可以认为传输过程成功地经过了这一跳.该协议与 HHR 协议的区别在于,应答机制的引入为其提供了在保证当前跳期望传递概率的前提下转发次数少于最大副本数的机会.

转发副本数的计算公式以及 FSMC 模型的状态转移概率矩阵元素计算公式可以分别用公式(8)~公式(10)来表示.相比较于 HHR 协议,分析该协议的传输过程中每一跳的平均能量消耗以及平均时延则更为复杂,但仍比文献[4]中直接分析整个传输过程性能的方法更直观、更简单.值得注意的是,无论每一跳最后一份副本的应答数据包是否能够成功回送给转发者,都不会影响该跳的最终传输结果.因此,我们对原有协议进行修改,取消最后一份应答包的回送.也就是在成功接收到应答包或发送出最后一份副本时,第 h 跳的传递过程即视为结束.当第 h 跳上的传递过程在传递第 i 个副本时结束,则接收节点至多产生 i 个应答包.各种不同的情况及其发生的概率、对应的能耗在表 1 中列出.其中, d_h, d'_h 分别表示数据包和应答包在第 h 跳的丢失概率. M_h 是由公式(8)计算而得到的第 h 跳最大传输副本数.根据表 1 中的数据,可以直观地计算出数据传输过程在第 h 跳的子传递过程中消耗的平均能量.将每一跳的平均能耗与传输过程进入该跳所对应的瞬态的次数相乘,再对跳数取和,即可以得到如公式(13)所表达的从源至 sink 节点的整个数据包传输过程的平均能耗.

表 1 中, ED 和 EA 分别表示数据包和应答包的接收发送能耗. $(1-d'_h) \cdot (1-d_h)^a \cdot d_h^{m-a} \cdot d_h^{(a-1)}$ 表示第 h 跳上的子传递过程在传输了 $m(m < M_h)$ 个副本后成功且接收节点共产生了 a 个应答包的概率,而 $m \cdot ED + a \cdot EA$ 则为该情况对应下的平均能耗. $(1-d_h)^a \cdot d_h^{M_h-a} \cdot d_h^{(a-1)}$ 表示第 h 跳上的子传递过程在传输了 M_h 个副本后成功且接收节点共产生了 a 个应答包的概率,而 $(M_h \cdot ED + (a-1) \cdot EA)$ 为该种情况下对应的平均能耗. $d_h^{M_h}$ 表示第 h 跳上的子传递过程失败的概率,而 $M_h \cdot ED$ 为该情况下对应的能耗.因此,如公式(13)所示,第 h 跳上的子传递过程的平均能耗可由 E_h 表示.最后, $n_{1,h}$ 表示传输过程从第 1 个瞬态出发(源节点开始发送数据包状态),进入第 h 个瞬态(第 h 跳的子传递过程)的次数.由此可得传输过程的平均能耗 E_{hhra} .

Table 1 Probabilities and energy costs for HHRA
表 1 HHRA 协议投递成功概率与能耗

Outcome	Probability	Energy costs
Finished by 1st transmission, 1 ack generated	$(1-d_h) \cdot (1-d'_h)$	$(e_t(l)+e_r(l))+(e_t(l')+e_r(l'))$
Finished by 2nd transmission, 1 ack generated	$(1-d_h) \cdot (1-d'_h) \cdot d_h$	$2(e_t(l)+e_r(l))+(e_t(l')+e_r(l'))$
Finished by 2nd transmission, 2 ack generated	$(1-d_h)^2 \cdot d'_h \cdot (1-d'_h)$	$2(e_t(l)+e_r(l))+2(e_t(l')+e_r(l'))$
...
Finished by M_h th transmission, 0 ack generated	$(1-d_h) \cdot d_h^{M_h-1}$	$M_h(e_t(l)+e_r(l))$
Finished by M_h th transmission, 1 ack generated	$(1-d_h)^2 \cdot d'_h \cdot d_h^{M_h-2}$	$M_h(e_t(l)+e_r(l))+(e_t(l')+e_r(l'))$
...
Finished by M_h th transmission, M_h-1 ack generated	$(1-d_h)^{M_h} \cdot d_h^{M_h-1}$	$M_h(e_t(l)+e_r(l))+(M_h-1)(e_t(l')+e_r(l'))$
Failed	$d_h^{M_h}$	$M_h(e_t(l)+e_r(l))$

$$\left. \begin{aligned}
 ED &= e_t(l) + e_r(l) \\
 EA &= e_t(l') + e_r(l') \\
 E_h &= \sum_{m=1}^{M_h-1} \sum_{a=1}^m (1-d'_h) \cdot (1-d_h)^a \cdot d_h^{m-a} \cdot d_h^{(a-1)} \cdot (m \cdot ED + a \cdot EA) + \\
 &\quad \sum_{a=1}^{M_h} (1-d_h)^a \cdot d_h^{M_h-a} \cdot d_h^{(a-1)} \cdot (M_h \cdot ED + (a-1) \cdot EA) + d_h^{M_h} \cdot M_h \cdot ED \\
 E_{hhra} &= \sum_{h=1}^H n_{1,h} \cdot E_h
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

同样,在求传输过程的平均时延时也首先计算每一跳子传递过程的平均时延,然后分别与传输过程进入对应瞬态的次数相乘,再依次相加取和.传输过程平均时延可用公式(14)表达:

$$\left. \begin{aligned}
 T &= t(l) + t(l') \\
 T_h &= \sum_{m=1}^{M_h} \sum_{a=1}^m m \cdot T \cdot (1-d_h) \cdot (1-d'_h) \cdot (d_h^{(a-1)} \cdot d_h^{m-a} \cdot (1-d_h)^{(a-1)}) + \\
 &\quad \sum_{m=1}^{M_h} M_h \cdot T \cdot (1-d_h) \cdot (d_h^{(m-1)} \cdot d_h^{m-1} \cdot (1-d_h)^{(m-1)}) + M_h \cdot T \cdot d_h^{M_h} \\
 T_{hhra} &= \sum_{h=1}^H n_{1,h} \cdot T_h
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

公式推导过程与公式(13)类似,鉴于篇幅所限,这里不再赘述.

2.3 逐跳广播协议(HHB)

直观感觉,利用无线信道的广播特性可以降低数据传输过程的时延,但对于能量消耗的影响却不易确定.与 HHR 协议类似,为达到期望的逐跳投递概率,第 h 跳需要投递的副本数可按如下公式计算^[1]:

$$MB_h = \left\lceil \frac{\log(1-r_h)}{K_h \cdot \log d_h} \right\rceil \quad (15)$$

其中, K_h 表示转发节点的下一跳邻节点数目.

下一跳邻节点平均接收到数据包数为 $K_h \cdot (1-d_h^{MB_h})$. 如果这些邻居节点成功接收到数据包后以概率 $1/K_h \cdot (1-d_h^{MB_h})$ 转发该数据包,则达到的实际效果是,所有邻居节点中平均只有一个节点能够继续向下广播该数据包.

用 $K_h \cdot MB_h$ 来替换 M_h ,则该协议转移概率矩阵中的 $H \times H$ 阶子矩阵 Q 和 $H \times 2$ 阶子矩阵 R 的元素可分别用公式(9)和公式(10)表示.

用 $K_h \cdot e_r(l)$ 来替换 $e_r(l)$,用 MB_h 替换 M_h ,则该协议数据传输过程的平均能耗可用公式(11)表示.最后,以 MB_h 替换 M_h ,则传输过程的平均时延可用公式(12)来表达.

2.4 带应答的逐跳广播协议

与 HHRA 协议类似,在对本协议进行建模分析时,也必须在 HHB 协议模型的基础上,考虑引入应答机制对能耗、时延等性能所产生的影响.用 $d_h^{K_h}$ 替换 d_h ,为满足第 h 跳的期望传递概率所必须发送的最大副本数,其表达如公式(8)所示,其中 K_h 表示该跳转发节点的下一跳邻居节点数目.经过同样的置换之后,该协议的 FSMC 模型的状态转移概率矩阵的元素可分别用公式(9)和公式(10)表示.

用 $K_h \cdot e_r(l)$ 替换 $e_r(l)$,协议数据传输过程的平均能耗可用公式(13)来计算.最后,协议的平均传输时延可直接用公式(14)表示.该协议的性能计算公式的分析过程与 HHRA 协议相似.鉴于篇幅所限,我们在这里忽略其推导过程和具体表达.

2.5 ReInforM协议

通过对该协议的简介我们知道,该协议要求每一个数据转发节点 i 了解它的本地信道误码率 d_i 、至 sink 节点的跳距 h_i 以及它所有的邻居节点和它们各自到 sink 节点的跳距信息.转发节点根据这些信息计算为满足端到端的期望传递概率所需要的路径数(或者说需要发送的副本数).计算公式如下所示:

$$M_i = \frac{\log(1-r_i)}{\log(1-(1-d_i)^{h_i})} \quad (16)$$

其中, r_i 表示从转发节点 i 到 sink 节点的端到端的期望传递概率,可用如下公式表示:

$$r_i = \begin{cases} r, & i=1 \\ 1-(1-(1-d_{i-1})^{h_{i-1}})^{M_{i-1}-(1-d_{i-1})}, & H > i > 1 \end{cases} \quad (17)$$

为便于进行理论分析和计算,我们假设转发节点 i 的下一跳邻居节点中集合 H_i^0 足够大,可在其中分配 P_i 个副本.那么,此假设可保证每一个被转发的副本都沿着最佳路径向目的节点传播.在该协议的数据传输过程中,不同的副本在距离目的节点相同跳距的不同链路上传递的子过程可称为一轮(round).从转发节点 i 所衍生出来的路径数可以从公式(16)中减去 $(1-d_i)$ 得到.而每一轮当中的转发节点数目可以由等式(18)计算.这些转发节点总共在第 i 轮衍生出 $F_i \cdot M_i$ 条路径.

$$F_i = \begin{cases} 1, & i=1 \\ F_{i-1} \cdot (1-d_{i-1}) + F_{i-1} \cdot (M_{i-1} - (1-d_{i-1})) \cdot (1-d_{i-1}), & M_{i-1} - (1-d_{i-1}) \geq 1 \\ F_{i-1} \cdot (1-d_{i-1}) + F_{i-1} \cdot (M_{i-1} - (1-d_{i-1}))^2 \cdot (1-d_{i-1}), & M_{i-1} - (1-d_{i-1}) < 1 \end{cases} \quad (18)$$

如果该协议的数据传输过程在所有路径上的距离目的节点跳距为 i 的链路上(或说所有副本在距离目的节点跳距为 i 的链路上)传输失败,则称该传输过程在第 i 轮失败.而其失败的原因可以认为由两部分组成:一是所有的缺省下一跳邻居节点(即以概率 1 转发数据包的节点)都没有正确接收到要被转发的数据包;另一种是其他邻居节点未成功接收到数据包或即使接收到数据包但以概率 $M_i - (1-d_i)$ 放弃继续转发该数据包.基于上述分析,我们可以按如下方法推导本协议 FSMC 模型的状态转移概率矩阵计算式:给定从源节点到目的节点的跳距 H 、期望的端到端传输概率 r ,则状态转移概率矩阵的 $H \times H$ 阶子矩阵 Q 和 $H \times 2$ 阶子矩阵 R 的矩阵元素可分别用等式(19)及等式(20)表示:

$$q_{i,j} = \begin{cases} 1-d_i^{M_i \cdot A_i}, & (M_i - (1-d_i)) \geq 1; i \in [1, H-1]; j = i+1 \\ 1-d_i^{A_i} \cdot (d_i + (1-d_i) \cdot (1-(M_i - (1-d_i))))^{(M_i - (1-d_i)) \cdot A_i}, & (M_i - (1-d_i)) < 1; i \in [1, H-1]; j = i+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$r_{i,j} = \begin{cases} d_i^{M_i \cdot A_i}, & (M_i - (1-d_i)) \geq 1; i \in [1, H-1]; j = 1 \\ d_i^{A_i} \cdot (d_i + (1-d_i) \cdot (1-(M_i - (1-d_i))))^{(M_i - (1-d_i)) \cdot A_i}, & (M_i - (1-d_i)) < 1; i = H; j = 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

因此,传输过程的平均能耗和时延可分别用等式(21)及等式(22)计算:

$$E_{ReInforM} = \sum_{j=1}^H n_{i,j} \cdot (e_r(l) \cdot A_j + e_r(l) \cdot A_j \cdot M_j) \quad (21)$$

$$D_{ReInforM} = \sum_{j=1}^H n_{i,j} \cdot t(l) \quad (22)$$

3 性能分析与比较

在前面一节中,我们给出了随机传输协议 HHR,HHRA,HHB,HHBA 以及 ReInforM 基于 FSMC 模型的分析模型,并据此得出了它们的平均传输能耗及平均传输时延的计算公式.这一节中,我们将在不同的网络环境参数设置条件下,对比评价这些协议的性能表现.

首先对公式中涉及到的常量进行说明如下: $e_t=e_r=1$ 表示传感器节点发送和接收一个比特的数据时所消耗的能量; $e_{t,0}=e_{r,0}=50$ 表示传感器节点在接收和发送一个数据包时所消耗的固定能量;假设数据包的长度固定为 $l=150\text{bits}$;应答包的长度固定为 $l'=30\text{bits}$;从源到 sink 节点的跳数固定为 $H=10$,当长度为变参时无此假设;对于 HHB 和 HHBA,假设每个转发节点的下游邻居节点数目平均为 $K=2$.

3.1 能耗分析与比较

图 1 显示出被评价的 5 种协议传输一个数据包所消耗的平均能量随平均信道位差错率变化的情况(包长为 150bits,ACK 包长为 30bits,源至目的跳距为 10 跳,期望传递概率为 0.8).从图中可以看出,ReInforM 协议的平均能耗随链路位差错率状况的恶化而呈指数型增长.其原因是因为该协议没有采用逐跳的随机投递机制.而协议用于计算转发者需要衍生的路径数(或副本数)的公式是基于端到端的期望传递概率推导生成的.因此,随着从源到 sink 节点跳距的增加以及链路平均位差错率的下降,每一个转发节点所需要衍生的路径数是呈指数级别增长的.

表 2 列出了在指定包长度为 150bits 条件下,按公式(16)中计算的衍生路径数.

Table 2 Path number generated by source node of the ReInforM protocol

表 2 ReInforM 协议源节点路径数列表

Desired probability	Bit error rate	Hop distance	Spawned paths
0.7	10e-5	12	0.299 0
	10e-4	12	0.667 6
	10e-3	8	3.361 9
	10e-3	12	6.670 1
	3.0e-3	8	43.697 6

从表 2 中显示的源节点衍生路径数我们可以看出,ReInforM 协议从“出发点”便丧失了能耗方面的优势.虽然在实际的无线传感器网络环境中,路径数量的制约、邻节点集合的划分等因素会限制路径数的指数增长趋势,但同时,传输过程的实际传递概率也会因此而有所降低,从而导致无法保证达到期望的传递概率.从以上分析中我们可以得出这样的结论:对于随机传输协议来说,将端到端的期望传递概率划分成为逐跳的期望传递概率是有利于节省能耗的.

至于剩余的 4 个协议 HHR,HHRA,HHB 以及 HHBA,从图 1 中可以看出,其传输过程的平均能耗随链路平均位差错率的降低而呈线性增长.根据函数曲线可知,HHR 和 HHB 协议的平均能耗随位差错率降低而增加的速度要高于 HHRA 和 HHBA 协议.这说明应答机制的确能够显著提高协议的能量消耗性能,特别是在位差错率较高的链路条件下.因为应答包使得转发者实际发送的副本数有可能少于为达到期望传递概率而需要的最大副本数.因此,除了第 1 份数据包以外,其余的副本并不确定被转发,其转发概率可由公式(23)来表达:

$$p_m = (d_h + (1 - d_h) \cdot d'_h)^m, \quad h \in [1, H] \quad (23)$$

值得注意的是,本文取消了最后一份数据包的应答包,这将进一步提高 HHRA 和 HHBA 协议的性能.特别是在位差错率较低的链路情况下,良好的链路条件使得一次发送的成功概率就可以保证期望的逐跳传递概率,此时,取消最后一份数据包的方法将会极大地降低协议能耗.这一小小的改进,使带应答包的随机传输协议几乎处处比不带应答包的协议更要节能.这一结论与文献[4]略有不同.

我们用图2来进一步比较 HHRA 和 HHBA 协议的能耗情况,其中,HHBA 协议的邻节点分别取不同值.从图中可以发现:一方面,当链路位差错率较低时,HHBA 协议较 HHRA 协议更为耗能.这是因为多余的下流邻节点在接收数据包时消耗了过多的能量.尤其是在邻节点较多的情况下,这种现象尤为明显;另一方面,在链路位差错率高于某一门限值时,利用无线链路的广播特性的确可以节省由于多次发送同一份数据包而消耗的能量.但是应当注意到,当节点密度很大、转发节点的邻节点过多时,在合理的链路位差错率取值范围内,HHBA 协议总是比 HHBA 协议更加耗能.

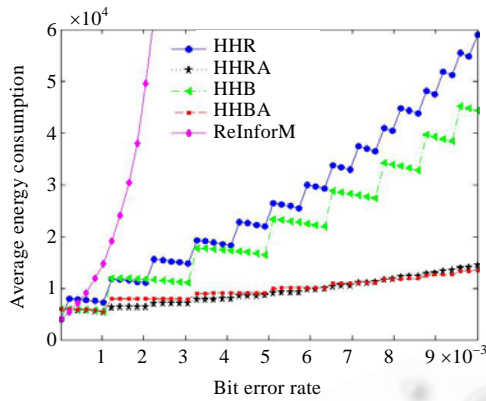


Fig.1 Variation in average energy costs with BER

图1 传输能耗随 BER 变化情况

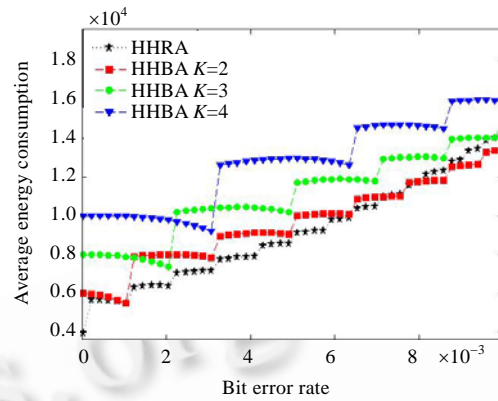


Fig.2 Variation in average energy costs with BER for HHBA and HHRA

图2 HHBA 及 HHRA 协议能耗随 BER 变化情况比较

3.2 延迟分析与比较

图3比较了5种随机传输协议的平均传输延迟随链路位差错率的变化而变化的情况(包长为150bits,ACK包长为30bits,源至目的跳距为10hop,期望传递概率为0.8).

从图中的曲线可以看出,ReInforM 协议的平均传输延迟性能最佳.这是因为每个转发节点的所有副本都是同时沿各个路径向下游转发的,从而在最大程度上缩短了传输时延.在剩余的4种传输协议中,HHR 协议的平均传输时延最大,这是因为它缺少适当的节能策略,在每一跳链路的数据传递过程中,为满足该跳链路上的期望传递概率,转发节点的发送次数都与最大副本数相同.HHB 协议则利用了无线链路的广播特性,把为满足每一跳链路的期望传递概率而必须发送的最大副本数从 HHR 协议的 M_h 降低到了 M_h/K ,从而节省了总的传输时间,降低了平均传输时延.

从图中曲线还可以看出,HHRA 协议的时延特性要好于 HHB 协议.这是因为应答机制的引入使得每一跳的转发节点有机会在最大副本数之前完成该跳的数据传递过程,从而降低端到端数据包传输过程的平均时延.这再次证明逐跳应答机制是改善随机投递传输协议性能的重要方法之一.

最后,我们还可以从图中发现,采用了逐跳应答机制的同时也利用了无线链路广播特性的 HHBA 协议在这4种协议中的时延性能表现最佳,在 WSNs 合理的链路位差错率取值范围之内,仅次于 ReInforM 协议的时延性能表现,并且在链路条件良好的较大范围内基本接近于 ReInforM 协议.

从 HHR,HHRA,HHB 和 HHBA 协议的能耗和时延性能曲线可以发现,这些协议尚有改进空间.从图中曲线可以发现,这4种协议的能耗和时延随链路平均位差错率的降低呈阶梯状上升.这是因为在计算满足逐跳期望传递概率的最大副本数时采用向上取整操作造成的.因此,如果考虑在发送最后一份副本时不是确定发送,而是以一定概率发送,则可以使平均发送副本数随链路位差错率的降低而平缓增加,那么协议的能耗曲线及时延曲线也会趋于平缓,从而提高协议性能.以 HHR 协议为例,我们称采用上述方法改进后的协议为 HHRP 协议,其最后一份副本的发送概率可按如下公式来计算:

$$p_h = \frac{d_h^{M_h} - 1 + r_h}{d_h^{M_h} \cdot (1 - d_h)} \quad (24)$$

该方法对协议性能的影响如图 4 所示.对于其他 3 种协议,可以用同样的方法加以改进,但最后一份副本的发送概率的计算方法各不相同,并且略显复杂.受篇幅所限,这里不再详述.

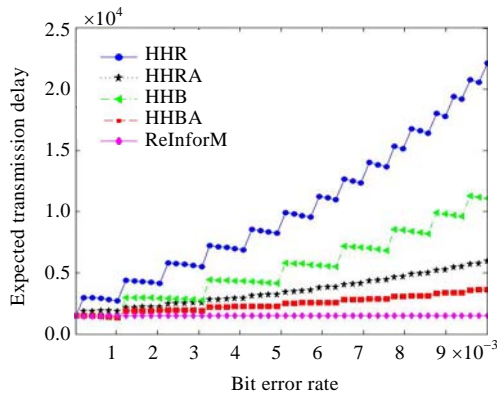


Fig.3 Variation in expected transmission delay with BER

图 3 平均传输时延随 BER 变化情况

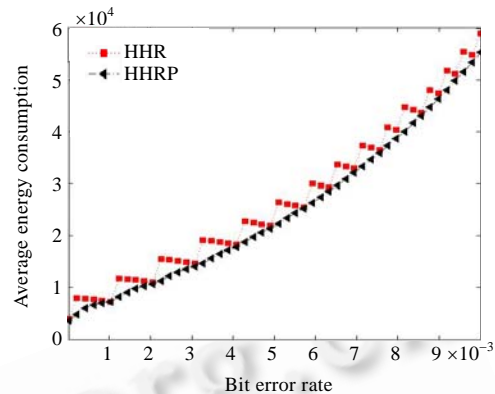


Fig.4 Variation in average energy costs with BER for HHR and HHRP

图 4 HHR 及 HHRP 协议平均传输时延随 BER 变化情况

4 结论

本文针对 5 种不同的随机投递传输协议,分别以带吸收态的马尔可夫链模型为基础,对其进行了建模和性能分析.本文采用的建模方法有效地简化了随机投递传输协议的理论分析过程,其性能参数计算公式直观.根据随机投递传输协议的特点,从源到目的节点的端到端数据传输过程可被划分为多个逐跳的数据传递子过程,传输过程的状态转换仅发生在相邻子过程之间,分析相邻子过程的状态转换概率即可得到整个协议模型的状态转移概率矩阵.而在推导协议性能计算公式时,只需关注每个子过程的数据传递步骤,然后根据数据传输过程在各个子状态之间的平均逗留时间(或进入次数)来计算协议各性能指标的统计平均值.

这种基于带吸收态的马尔可夫链建模方法的另一个重要意义在于,它为源节点提供了根据至目的节点跳距、链路平均位误码率、下游邻节点数目及其他参数来选择最适合当前网络环境的随机投递传输协议的机会和手段.根据当前的网络环境参数,源节点在发送数据包之前,可预先采用模型推导出的性能计算公式来计算各个协议的相关性能数据,然后根据应用需要,在备选的协议当中选择性能表现最佳的协议完成数据传输过程.性能计算的复杂度主要在于矩阵运算,当跳距较大时,矩阵规模也随之增加,计算复杂度呈平方规模上涨,这是影响矩阵计算效率的主要原因.但是,通过本文的建模分析过程我们可以发现,由于随机投递传输协议的状态转移仅发生在相邻状态之间,且有规律可循,因此,状态转移概率矩阵均为稀疏矩阵.矩阵计算可转化为简单的解析式表达.例如,本文公式(6)所表达的平均转移步数可由如下求和公式来表达:

$$E_1 = \sum_{j=1}^H n_{1,j} = 1 + q_{1,2} + q_{1,2} \cdot q_{2,3} + \dots + q_{1,2} \cdot q_{2,3} \cdot \dots \cdot q_{j-1,j} \quad (25)$$

因此,协议性能指标的计算复杂度可控制在传感器节点可接受的复杂度范围之内.

对于随机投递传输协议,本文通过建模及性能分析发现,逐跳应答机制以及无线链路广播特性的利用,对于提高协议性能指标都有较大的帮助.但在不同的网络环境参数下,两种机制对协议性能的影响效果是不同的.例如,在位差错率较低的良好链路状态条件下,两种机制对协议性能改进起到的作用都不十分明显,甚至会导致性能的下降(如能量的浪费和延迟的增加).但随着位差错率的下降,链路状态逐渐恶化,两种机制对协议性能的改进效果逐步显现.在其他参数固定的情况下,当位差错率高于某一门限值时,采用了两种机制的 HHBA 协议具有

最佳的能耗性能表现,其时延性能也仅次于高能耗的 ReInforM 协议.

References:

- [1] Karl H, Willing A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. New York: Wiley, 2005. 314–340.
- [2] Wang CG, Sohrawy K. A survey of transport protocols for wireless sensor networks. IEEE Network, 2006,20(3):34–40.
- [3] Sankarasubramaniam Y, Akan ÖB, Akyildiz IF. ESRT: Event-to-Sink reliable transport in wireless sensor networks. In: Gerla M, ed. Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2003). New York: ACM Press, 2003. 177–188.
- [4] Wan CY, Campbell AT, Krishnamurthy L. PSFQ: A reliable transport protocol for wireless sensor networks. In: Raghavendra CS, Sivalingam KM, eds. Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2002). New York: ACM Press, 2002. 1–11.
- [5] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForM: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks. In: Strayer T, ed. Proc. of the 28th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN 2003). Bonn/Königswinter: IEEE Computer Society, 2003. 406–415.
- [6] Trivedi KS. Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications. 2nd ed., New York: Wiley, 2001. 351–358.
- [7] Lin YL. Stochastic Processes with Applications. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 74–116 (in Chinese).
- [8] Khalili R, Salamati K. A new analytic approach to evaluation of packet error rate in wireless networks. In: Ilow J, ed. Proc. of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conf. (CNSR 2005). Washington: IEEE Computer Society, 2005. 333–338.
- [9] Schurgers C, Aberthorne O, Srivastava M. Modulation scaling for energy aware communication systems. In: Macii E, De V, Irwin MJ, eds. Proc. of the Int'l Symp. on Low Power Electronics and Design (ISLPED 2001). New York: ACM Press, 2001. 96–99.
- [10] Sinha A, Chandrakasan A. Dynamic power management in wireless sensor networks. IEEE Design & Test of Computers, 2001, 18(2):62–74.
- [11] Issariyakul T, Hossain E. Analysis of end-to-end performance in a multi-hop wireless network for different hop-level ARQ policies. In: Rocchetti M, ed. Proc. of the Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2004). Dallas: IEEE Communication Society, 2004. 3022–3026.
- [12] Issariyakul T, Hossain E, Alfa AS. Analysis of latency for reliable end-to-end batch transmission in multi-rate multi-hop wireless networks. In: Lee YK, Lee BG, eds. Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2005). Seoul, 2005. 3494–3498.

附中文参考文献:

- [7] 林元烈.应用随机过程.北京:清华大学出版社,2002.74–116.



熊斌斌(1975—),男,重庆人,博士生,主要研究领域为传感器网络关键技术.



任丰原(1970—),男,博士,副教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络流量控制与管理,网络控制与控制网络,无线网络.



林闯(1948—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络及服务质量控制和安全,系统模型,模拟和性能评价,随机 Petri 网的理论和应用,基于 Petri 网模型的逻辑推演和推理系统.