

文章编号:1001-9081(2013)03-0618-03

doi:10.3724/SP.J.1087.2013.00618

接收端发起的异步无线传感器网络 MAC 协议

王 林, 王晓哲*

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(*通信作者电子邮箱 wangxz_xalg@163.com)

摘要:为了减少无线传感器网络中由于空闲侦听而产生的能量消耗,在接收端发起的介质访问控制(RI-MAC)协议基础上提出一种新的接收端发起的异步RP-MAC。该协议通过预测接收节点唤醒时间,采用随机数作为唤醒间隔,改进RI-MAC的重传机制,从而减少了空闲侦听和网络冲突。NS2仿真结果表明,改进后的MAC协议在高负载网络中显著降低了节点工作的占空比,提高了包交付率,从而减少了网络能耗。

关键词:无线传感器网络;介质访问控制协议;占空比;接收端发起;随机数

中图分类号: TP393.04 文献标志码:A

Receiver-initiated asynchronous MAC protocol for wireless sensor networks

WANG Lin, WANG Xiaozhe*

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on a Receiver-Initiated Medium Access Control (RI-MAC) protocol, a new receiver-initiated asynchronous Medium Access Control (MAC) protocol called Receiver-Predictive MAC (RP-MAC) protocol was proposed for the purpose of reducing the energy consumption caused by idle listening in wireless sensor networks. The wakeup time of the receiving node could be predicted by RP-MAC. In the proposed MAC protocol, a random number was used as a wakeup interval, the next wakeup time was forecasted by the previous two wakeup intervals, and the retransmission mechanism of RI-MAC was improved as well, thereby the idle listening and network conflicts were reduced. The simulation on NS2 shows that the duty cycle of the node work is significantly reduced by the improved MAC protocol in high load network, and the delivery rate of packet is successfully improved, and the network energy consumption is reduced at the same time.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Medium Access Control (MAC) protocol; duty cycle; receiver-initiated; random number

0 引言

无线传感器网络是由多个传感器节点组成的面向任务的无线自组织网络,与传统无线网络不同的是,由于环境等因素制约,如何降低节点能耗成为无线传感器网络重点考虑的问题^[1]。无线传感器网络中的介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议决定着无线信道的使用方式,负责为节点分配无线信道资源,因此MAC协议的能效直接影响了传感网络的节能效果^[2]。

造成网络能量浪费的主要原因之一就是空闲侦听,许多采用占空比方式解决空闲侦听的方案已经被提出。这些占空比的MAC协议主要分为两类:同步协议和异步协议^[3]。同步的有S-MAC^[4]、T-MAC^[5]和R-MAC^[6],这些协议要求相邻节点活动周期保持一致,邻居节点仅在活动状态交换数据,能使节点保持尽可能多的休眠而不错过发送过来的数据,极大地减少了空闲侦听,但要求相邻节点保持严格的同步,同步带来了额外的控制开销。

目前的异步协议有B-MAC^[7]、X-MAC^[8]和Wise MAC^[9]。这些协议普遍采用低功率侦听,在发送端有数据要求发送时先发送一个持续时间略长于接收端休眠时间的前导,当接收端唤醒后检测到前导准备开始接收数据。这种协议取得了较高的能效,消除了同步协议的同步控制开销,然而它们主要应用在低负载网络中,当网络负载增加就会因为前导长时间占

用无线信道资源引起严重延迟,增加网络能耗。

为了解决前导长时间占用无线信道资源的问题,一种由接收端发起的介质访问控制(Receiver-Initiated MAC, RI-MAC)^[10]被提出。这种接收端发起的协议里,发送节点仅在收到来自接收节点的信标帧(Beacon Frame)才开始发送数据,大幅度降低了信道占用率。但是RI-MAC却增加了发送端的等待时间,因此本文提出一种能够预测接收节点唤醒时间的接收端发起的异步MAC协议,以此来减少空闲侦听,提高网络能效。

1 RI-MAC 协议

1.1 RI-MAC 的工作机制

RI-MAC总是从将要接收数据的节点发起,每个节点周期性醒来检测是否有发送给自己的数据包。接收节点开始工作后检测到信道空闲会立即广播一个信标帧宣告自己开始工作,接收节点收到来自发送节点的信标帧后开始发送数据。如图1所示,收到来自接收节点R的信标帧后,发送节点S会立刻发送数据包。数据包接收完成后接收节点R会发送另一个信标帧确认数据发送完成。这个确认信标帧具有双重作用:一方面确认对发送数据的正确接收;另一方面邀请新的数据发送,如果没有将要发送的数据节点就转入睡眠状态。

1.2 RI-MAC 的重传机制

RI-MAC还提出了一种简单自适应二进制指数退避

收稿日期:2012-09-06;修回日期:2012-11-16。

作者简介:王林(1963-),男,江苏东台人,教授,博士,主要研究方向:无线传感器网络、复杂网络;王晓哲(1986-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络。

(Binary Exponential Backoff, BEB) 算法, 以减少多个发送节点在收到信标帧后同一时间向目的节点发送数据而产生的冲突, 如图 2 所示。信标帧包含一个指定发送端退避窗口大小的 BW 字段, 接收节点醒来后会发送一个 BW 字段为 0 的信标帧, 发送节点在收到信标帧后会立即发送数据包。当有多个节点等待发送数据包时就会发生冲突, 发送端会通过二进制指数退避算法增加 BW 字段值, 使得发送方在下一次重传时进行必要的退避。如果 BW 值达到最大退避窗口或者接收端在连续发送信标帧后检测到不断的冲突后, 接收端就会进入睡眠状态。

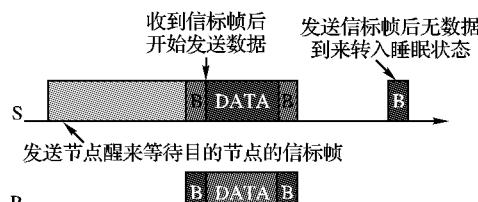


图 1 RI-MAC 工作机制

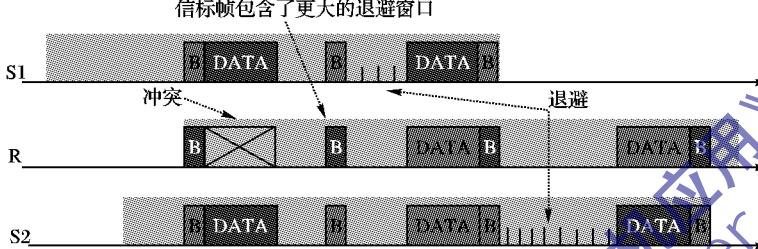


图 2 RI-MAC 的退避算法

在 RI-MAC 中仅有信标帧和传输数据占用信道, 消除了发送端前导对信道的占用, 提高了信道的利用率。但是 RI-MAC 中发送节点无法知道接收节点什么时候醒来, 所以会因为一直侦听信道而产生过听和盲等现象。特别是在高负载网络中, 发送端的盲等、过听会造成节点能量的大量消耗^[11]。

2 RP-MAC 协议

RP-MAC 协议是在 RI-MAC 基础上的改进, 采用了 RI-MAC 接收端发起的发送方式。与之不同的是, RP-MAC 为了减少空闲侦听, 预测接收端的工作状态使发送端在接收端唤醒之前很短的时间内才醒来侦听信道。为了避免多个同时发送的数据引起的冲突, 采用了随机唤醒间隔, 使传感网络中的每个节点产生不同的唤醒间隔, 减少了多个节点同时唤醒的概率, 并且改进了 RI-MAC 在网络冲突严重时的盲等现象。

2.1 减少空闲侦听

在 RI-MAC 中发送节点 S 如果有数据发送必须保持侦听状态, 直到收到节点 R 广播的信标帧后才开始发送数据, 若是 S 醒来时 R 刚转入睡眠状态, S 只能等到 R 下个周期醒来才能发送数据。RP-MAC 为了减少发送端的这种等待时间, 在信标帧中加入了节点自身的唤醒时间信息, 发送节点通过信标帧中的唤醒信息就能预测出接收节点的唤醒间隔, 然后在发送节点下一刻唤醒之前才从睡眠状态醒来, 如图 3 所示。

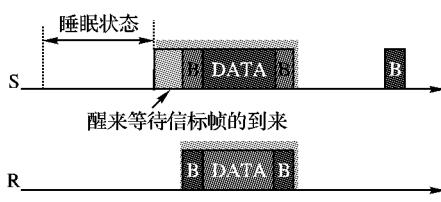


图 3 RP-MAC 的设计

2.2 随机数唤醒间隔

为了避免多个邻居节点同时唤醒而引起的冲突, 本文用一个随机数序列来作为节点的唤醒间隔。为了简单起见, 采用了计算机中运算速度比较快的斐波那契(Fibonacci)方法, 其递推公式为:

$$X_{i+2} = (X_i + X_{i+1}) \bmod M \quad (1)$$

其中: $i = 0, 1, 2, \dots; M$ 为模数。斐波那契法有两个种子, 每个新产生的伪随机数 X_{i+2} 被用作新的种子^[12]。

RP-MAC 协议初始阶段跟 RI-MAC 一样, 节点周期性醒来广播信标帧通知邻居节点它已经醒来准备接收数据, 信标帧中包含着源节点的唤醒间隔信息。发送节点 S 保持侦听状态等待信标帧的到来, 获得接收节点 R 两次的唤醒间隔后, 节点 S 由此可以推断出节点 R 的下一个随机数的值。当 R 用这些随机数作为唤醒间隔时, S 就能用前两次产生的随机数推断出 R 下一次的唤醒时间, 然后在 R 唤醒前醒来等待接收节点 R 广播的信标帧, 这样就大幅度降低了发送端的占空比。

2.3 RP-MAC 的信标帧

RP-MAC 中的数据的发送是由接收端控制的, RP-MAC 的信标帧是在 IEEE802.15.4 的基础上设计的, 如图 4 所示。其中帧长度、FCF 和 FCS 为原有的字段; Src 为发送信标帧的源节点地址; Dst 为信标帧的目的节点地址; Tstamp 是源节点唤醒信息。

在 RP-MAC 中, 唤醒间隔用随机数来计算。如果 S 有数据发送给 R, 但没有 R 的唤醒信息, S 进入侦听状态等待一个来自 R 的信标帧。在接收到 R 的信标帧后, S 在发送的数据包里设置一个请求标志请求来自 R 的唤醒信息。一旦 R 收到这个数据包, R 发送另一个信标帧作为对接收到数据的确认以及允许下一个数据包发送给 R; 同时为了回应来自 S 的请求, R 也将当前时间和唤醒信息加入到信标帧中。R 的当前时间被用来计算 S 和 R 时钟的不同。

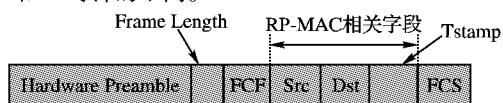


图 4 RP-MAC 的信标帧

为了精确预测节点 S 和节点 R 的时钟偏差, R 的当前时间为数据包发送成功后立即产生确认信标帧的发送时间(忽略了信标帧传输延迟情况下两个相距 200 m 的节点的传播延迟仅为 0.67 μs, 若两个节点的最大频率偏差为 0.03%, 每秒钟产生的时钟漂移为 60 μs), 当节点 S 节点收到来自 R 的确认帧, 就能计算出 S 和 R 的时钟偏差。这样就可以减小了无线传感器网络节点和操作系统延迟引起的误差。

节点 S 用收到的确认信标帧就能预测到节点 R 的唤醒时间, 因此 RP-MAC 就可以把发送端的空闲侦听减少到最小程度, 从而大幅度地减少了网络能耗。

2.4 RP-MAC 的重传机制

当网络负载较大时, 多个节点同时发送数据包就会引起冲突, 此时, 行之有效的包重传机制就成为无线传感器网络的一个重要问题。

基于前导的异步占空比 MAC 协议, 在发送端产生冲突后会有一个固定退避窗口对数据包进行重传, 以这种方式进行重传会大幅度增加发送端的占空比, 在冲突后接收端会因为没有收到有效地数据包而认为数据包发送已经完成, 从而提前进入睡眠状态, 因此这种重传作用不大。在 RI-MAC 中发

送节点会一直保持侦听状态直到接收节点再次唤醒,而不去管接收节点处于何种工作状态,这将使得发送端占空比增大。

RP-MAC 的重传机制如图 5 所示,节点 S 检测到冲突后不会再次立即发送,而是转入睡眠状态,等到下一次唤醒时间重传数据,这样就减少了发送端的能耗。如果发送节点 S 收到来自接收节点 R 的非接收完成的确认信标帧,节点 S 就认为数据包发送失败或者确认帧发送失败,S 也会再次进入睡眠状态在 R 下次醒来重传数据来减少接收端由于等待而造成的能力消耗。

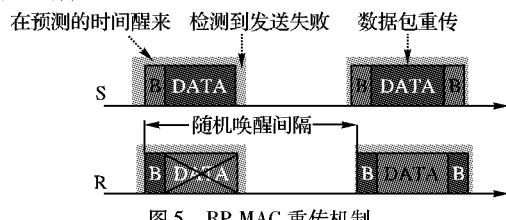


图 5 RP-MAC 重传机制

3 仿真结果

本文的仿真平台为 VMware + Ubuntu10.4 + NS2.34^[13],最后用 Matlab 处理仿真数据。为了验证 RP-MAC 的性能,仿照 RI-MAC 的实验设置在网状拓扑结构下与 X-MAC 和 RI-MAC 进行仿真对比。仿真采用 7×7 网络拓扑结构,49 个节点组成的方阵同行同列相邻节点间的距离设置为 200 m,每个节点的通信半径为 250 m,仿真参数如表 1 所示。网络中设有 5 条独立的数据流,通过改变网络中的数据流数来改变网络负载。网络从仿真开始后 10 s 开始产生数据流,数据包发送间隔均匀地分布在 0.5 s 和 1.5 s 之间,仿真时间为 1000 s,观察网络中的平均占空比和包交付率,平均值由 10 次仿真结果算出^[10]。

表 1 仿真参数

参数	值
初始能量	1000 J
发送能耗	0.368 W
接收能耗	0.3682 W
空闲侦听能耗	0.3442 W
休眠能耗	0.00005 W
状态转换能耗	0.05 W
数据包大小	30 B

从图 6 可以看出 X-MAC 由于前导的存在,当网络中的数据流增加时占空比会迅速增加,RI-MAC 发送端占空比在只有一个数据流时在 50% 左右,随着数据流数增加,占空比也会增加,因为发送节点必须保持侦听等待接收节点广播的信标帧的到来,即使数据发送成功也仅有很短的睡眠时间后去等待下一个发送请求,而 RP-MAC 即使在数据流增加后也保持一个很低的发端占空比,因为它能准确地预测到发送端的唤醒时间从而减少空闲侦听,这就意味着 RP-MAC 在高负载网中能获得一个较高的能效。

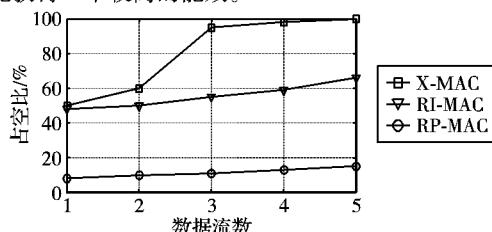


图 6 发送端占空比

图 7 显示三种协议的接收端的占空比都比较小,因为接收端仅周期性醒来接收数据包。当网络中发生冲突后 X-MAC 和 RI-MAC 会做一个短暂的退避,所以当网络负载增加时接收端占空比会有所增加。RP-MAC 只是周期性醒来发送信标帧和接收数据,所以一直维持一个很低的占空比。

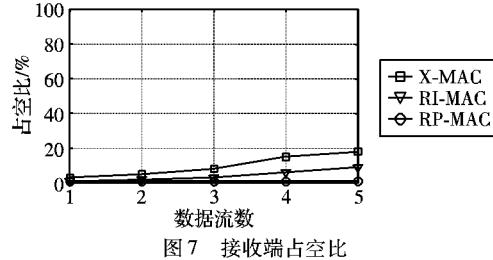


图 7 接收端占空比

RP-MAC 达到了几乎百分之百的包交付率,如图 8 所示。由于 X-MAC 在网络负载增加时其长前导很容易产生冲突,所以当数据流增加时包交付率会迅速降低。能够看到 RP-MAC 比 RI-MAC 取得了一个更高的包交付率,因为 RP-MAC 中的节点会在不同间隔醒来,可以有效地避免信标帧和数据包的发送冲突。

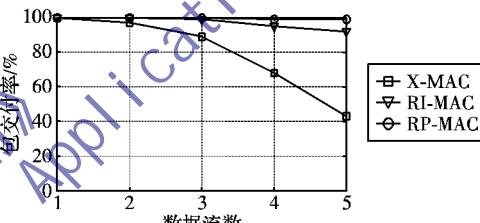


图 8 包交付率

4 结语

本文在 RI-MAC 的基础上,通过准确地预测接收端唤醒时间,引入随机数来避免节点在不同的时间唤醒,改进 RI-MAC 的重传机制来提高网络能效。通过 NS2 仿真结果表明,RP-MAC 在相当大的程度上减少了发送端的能耗,减少了网络中的冲突,从而能够延长整个网络生存时间。以后的工作中将在实际网络中对 RP-MAC 的性能进行测试。

参考文献:

- [1] 郑国强,孙若玉.基于路由信息的跨层 WSN MAC 协议[J].计算机工程,2009,35(17):117-119.
- [2] 唐宏,谢静,鲁玉芳,等.无线传感器网络原理及应用[M].北京:人民邮电出版社,2010:61-66.
- [3] 唐震洲,施晓秋,金可仲.PA-MAC:一种被动的异步低占空比无线传感器网络 MAC 协议[J].传感技术学报,2011,24(3):423-428.
- [4] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 21th Annual IEEE Conference on Computer and Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002, 3: 1567-1576.
- [5] van DAM T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 171-180.
- [6] DU S, SAHA A K, JOHNSON D B. RMAC: a routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1478-1486.
- [7] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 95-107. (下转第 639 页)

法的提取特征的过程符合“高斯滤波器的形状和大小要与图像结构相适应”的原则,并且在变换图像的过程中能够保证图像被正确地采样,所以FAIF算法所提的特征是完全仿射不变的局部特征,它可以适应大的视角和尺度变化。但是,可以看到在FAIF算法的匹配效果图中仍有错误的匹配点,这是局部特征提取算法无法避免的,因为此类算法是根据图像特征构造描述符的,图像中的不同的物体有可能有相似的图像特征,好的算法可以保证同一图像特征的特征描述符是一样的,不同的图像特征的特征描述符不一样,而不考虑同一图像特征是否对应同一物体。SIFT算法针对所有的图片都无法匹配,这是因为SIFT算法是一种相似不变特征提取算法,在检测特征点时使用圆形高斯滤波器,在构造特征描述符时也是统计正方形区域内的梯度分布信息,这种处理方式不适合用于解决视角变化问题,因为视角变化会引起图像结构的形状发生变化。Harris-Affine和Hessian-Affine算法虽然基于仿射高斯尺度空间理论对视角做了处理,但从实验结果可以看出并没有实现预期的效果,它们除了在图9(a)、(d)和(g)中有少量的匹配点外,在其他的图片中均失效,这说明Harris-Affine和Hessian-Affine算法提取的特征并非仿射不变。出现这种结果的原因是:1) Harris-Affine和Hessian-Affine算法提取的仿射不变特征是建立在尺度不变特征点之上的,而尺度不变特征点和仿射不变特征点极有可能不是同一个点。2)在将各向异性的图像结构转换成各向同性的图像结构时采用了归一化的方式,没有相应的高斯平滑,会导致图像被错误地采样,进而造成后续的计算无效。

4 结语

本文提出了一种完全仿射不变的局部特征提取算法,用于立体目标的宽基线图像匹配。该算法以MSER特征的协方差矩阵作为局部图像结构的度量,根据仿射高斯尺度空间理论中的高斯滤波器要与图像结构相适应的原理,将图像结构由各向异性变为各向同性,使其能够使用圆形高斯滤波器进行滤波,从而将各向异性的尺度变化转化为各向同性的尺度变化。由于在变换图像的过程中要引起图像尺度的变化,为了保证图像被正确地采样,FAIF算法采用了旋转压缩的方式,使图像在进行下采样前能够被正确地滤波。通过以上操作,FAIF算法解决了视角变化问题,能够提取完全仿射不变特征。由于提取的特征都是局部特征,所以可用于立体目标的宽基线图像匹配。实验结果表明,FAIF算法在立体目标的宽基线图像匹配中有优异的表现,在目标图像发生大的视角和尺度变化的情况下仍有大量的匹配点。当然立体目标的宽基线图像匹配还有很多问题要解决,FAIF算法只是解决了特征提取问题,如何匹配这些特征是一个亟须解决的问题。从图7的FAIF算法的实验结果可以看出,在目标的有些区域没

有匹配特征,但事实上这些区域是有匹配特征的,只是它们被RANSAC算法错误地过滤掉了或者由于模型数量的限制而无法被显示。现有的RANSAC算法只能处理单模型的特征匹配,而立体目标的特征分布在多个面上,有多个模型,因此需要一种基于多模型的错误过滤和匹配划分算法,这是今后的工作方向。

参考文献:

- [1] TUYTELAARS T, MIKOLAJCZYK K. Local invariant feature detectors: a survey [J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2008, 3(3): 177–280.
- [2] MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al. A comparison of affine region detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65(1): 43–72.
- [3] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615–1630.
- [4] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91–110.
- [5] LINDEBERG T. Feature detection with automatic scale selection [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(2): 79–116.
- [6] MOREL J M, YU G S. Is SIFT scale invariant? [J]. Inverse Problems and Imaging, 2011, 5(1): 115–136.
- [7] LINDEBERG T, GARDING J. Shape-adapted smoothing in estimation of 3-D shape cues from affine deformations of local 2-D brightness structure [J]. Image and Vision Computing, 1997, 15(6): 415–434.
- [8] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63–86.
- [9] RUAN L, SRIDHA S, CLINTON F. Hessian-based affine adaptation of salient local image features [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2012, 44(2): 150–167.
- [10] YU G S, MOREL J M. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 438–469.
- [11] MATAS J, CHUM O, URBAN M, et al. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(10): 761–767.
- [12] GÅRDING J, LINDEBERG T. Direct computation of shape cues using scale-adapted spatial derivative operators [J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 17(2): 163–191.
- [13] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381–395.

(上接第620页)

- [8] BUETTNER M, YEE G V, ANDESON E, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 307–320.
- [9] EL-HOYIDI A, DECOTIGNIE J D. WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks [C]// Proceedings of ALGOSENSORS 2004, LNCS 3121. Berlin: Springer, 2004: 18–31.
- [10] YAN J S, GUREWITZ O, JOHNSON D B. RI-MAC: a receiver ini-

- tiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. New York: ACM Press, 2008: 1–14.
- [11] 丁亮, 华蓓. 无传感器网络高效的MAC协议 [J]. 电子技术, 2011, 38(3): 43–46.
- [12] 林国顺, 黄梯云. 模拟随机数统计性质比较 [J]. 数理统计与管理, 2000, 19(2): 30–33.
- [13] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2与网络模拟 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.