

基于直接序列扩频网络的 O-ALOHA 协议研究

王 骐, 王青萍

(湖北第二师范学院 物理与电子信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘 要: 针对 SENMA 的访问, 把物理层的特征和媒体接入控制结合起来, 提出了一种基于直接序列扩频网络的机会型 ALOHA(O-ALOHA)协议, 用其实现 SENMA 的媒体接入控制。该传输控制在吞吐量方面具有良好的性能, 最主要特点在于它是一种常规类别传输控制的较优方案, 接收模型考虑了多数据包的接收。仿真表明, 这种机会型 ALOHA 协议可用于多种传感器网络的应用场合, 能够向采集代理进行可靠的数据传输。

关键词: 直接序列扩频; 移动代理无线传感器网络; 机会式 ALOHA 协议; 媒体接入控制

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)09-0057-05

Research on the O-ALOHA protocol based on direct sequence spread spectrum network

Wang Qi, Wang Qingping

(Institute of Electronics Information and Physics, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

Abstract: This paper considered an approach that integrates physical layer characteristics with medium access control. And proposed opportunistic ALOHA based on a direct sequence spread spectrum network as the medium access control for SENMA. The proposed transmission controls demonstrated good performance in terms of throughput. The major feature was that this scheme is optimized over a general class of transmission control. In addition, the reception model also took into account multipacket reception. Simulation shows that the proposed opportunistic ALOHA protocol can be used in a variety of sensor network applications, and can be used by the sensor network to transmit information reliably to the collecting agent.

Key words: direct sequence spread spectrum; sensor networks with mobile agents; opportunistic ALOHA; medium access control

根据移动节点功能的不同, 把移动性无线传感器网络分为普通节点移动型和代理节点(或中继节点)移动型 SENMA(Sensor Network with Mobile Agents)^[1]两类, 其网络模型如图 1 所示。SENMA 具有传感器节点数量大、缺乏集中控制、信道衰落、节点的占空比等特征, 给媒体接入控制(MAC)的设计提出了特别的挑战。一般来说, SENMA 的 MAC 协议应能实现以下目标:

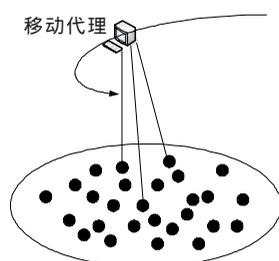


图 1 具有移动代理的传感器网络(SENMA)

(1) MAC 协议应该是分布式的, 并且易于实现。每个节点具有最小的计算量, 且对反馈的依赖程度尽可能小。

(2) MAC 协议应该具有较高的吞吐量, 对信道的利用率较

高。当每个传感器节点的数据传输率较低时, 移动代理所获得的采集时间可能相当有限, 特别是在某些军事应用中。这意味着移动代理在每个时隙应该采集尽可能多的数据包。

(3) MAC 协议一定是高能效的。对于大规模的传感器网络, 依靠电池供电的传感器的电量有限, 在信道衰落的情况下, 传感器的能量可能仅仅够把数据传送到移动代理。因此, 当且仅当出现合适的机会时, 传感器才能进行数据传输。

参考文献[2-3]研究了基于更复杂接收模型和存在众多用户的 O-ALOHA 协议, 并证明了 O-ALOHA 协议的效果等同于改变信道状态的基本概率分布。实际上, 目标概率分布的选择和传输控制依赖于传感器网络的物理层。参考文献[4]提出了分布使用信道状态信

息的策略,参考文献[5]提出了一种信息理论度量理论,得出结论是:采用分布使用信道状态的方法比使用集中调度的方法所带来的损失要小。参考文献[6]根据集中信道的状态信息研究了多路访问的可行性,主要取得了两方面的结论。首先,根据用户信道状态来调度传输是一种可取的访问方式;其次,当用户数量较大时,多用户分集(Multiuser Diversity)技术大大提高了吞吐量。参考文献[7]介绍和分析了一个相似的基于信道冲突模型的协议,提出了“信道感知”的ALOHA协议,在ALOHA协议中考虑了信道状态;在冲突模型中采用一种简单的门限策略,证明了多用户分集技术的效应。实际上,这种门限策略从总体上讲并不是最优的。

本文设计了一种基于直接序列扩频网络的O-ALOHA协议,提出的传输控制在吞吐量方面具有良好的性能。还通过仿真研究了O-ALOHA协议的其他重要特征,如运行中的传感器节点的工作模式。就如何运用O-ALOHA协议向采集代理进行可靠的数据传输,本文列举了两个例子进行说明。与已有方案相比,本方案的最主要特点在于,它是一种常规类别传输控制的较优方案,接收模型考虑了多数据包的接收。

1 O-ALOHA 协议

1.1 协议规范

考虑这样一种网络:在这个网络内存在 n 个传感器节点,它们通过一条普通信道和一个采集代理通信。假定在移动代理处于网络附近的时间段内,每个传感器节点有数据传输。时间段被分成若干个等长的区间,其长度等于传输一个数据包所需的时间。一个时隙为一个时间单位,时隙的结构如图2所示,假定时隙 t 的时间区间为 $[t, t+1)$ 。假设网络的运行模式为时分双工(TDD)模式,在每个时隙的开始,采集代理传输一个信标,每个传感器用它来估算采集代理和传感器之间的传播信道增益,这也是传感器到采集代理之间的信道增益。在时隙 t 内,传感器节点 i 到采集代理之间的信道表示为 $\gamma_i^{(t)}$,为了简化信道,假定信道估计是理想的。在数据传送周期,每个传感器节点以概率 $s(\gamma_i^{(t)})$ 传输信息,这里 $s(\cdot)$ 表示概率和信道状态之间的函数关系。协议把传输概率看作是信道状态的函数,因此这种传输方式被称为机会型ALOHA方式。

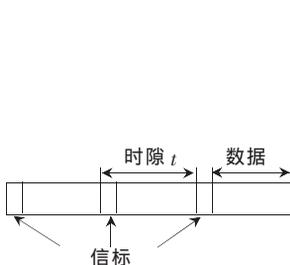


图2 时隙的结构

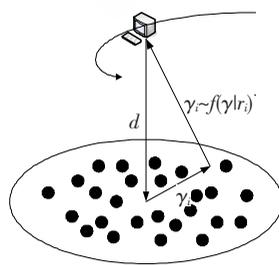


图3 传感器的部署

1.2 信道模型

下面介绍一种用于分析O-ALOHA协议的信道模型。假设所有的传感器位于以半径为1的圆内,如图3所示。假定采集代理位于圆的上方,与圆中心的距离为 d ,传感器节点的径向距离为 r_i 。把 r_i 定义为均匀分布在 $0 \sim 1$ 之间的随机变量,传感器节点 i 和基站之间的传播信道增益由下列模型得到:

$$\gamma_i^{(t)} = \frac{R_t R_u^2}{r_i^2 + d^2} \quad (1)$$

R_u 呈瑞利分布,并假定 R_u 是关于时隙和传感器节点的独立同分布随机变量。为了简化符号,每个传感器节点的传输功率 P_T 包含在 $\gamma_i^{(t)}$ 内。根据以上假设,概率密度函数并不依赖于 i (传感器节点) 或 t (时隙)。当径向距离为 r 时,节点信道状态的条件概率密度函数表示为 $f(\gamma|r)$ 。

1.3 数据的传输和接收

假定传感器网络的物理层基于直接序列扩频码,网络的扩频增益为 N ,假定存在 N 个正交码(两两之间的相关性为0),每个传感器节点从 N 个正交码中随机选择一个,并用此扩频码来传送数据。采集代理的接收机为了解调接收到的数据,对每一个扩频码进行匹配滤波。假定在匹配滤波之后,如果信号干扰比 SIR (Signal-To-Interference Ratio) 大于阈值 β ,那么就表明数据包被成功接收。在时隙 t 内,如果 K_j 个传感器都采用第 j 个扩频码进行传输,它们的信道状态分别为 $(\gamma_{j1}^{(t)}, \dots, \gamma_{jk}^{(t)})$,则采集代理成功接收传感器的数据的判断标准就近似为:

$$\frac{\gamma_{ji}^{(t)}}{\sigma^2 + \sum_{k=1, k \neq i}^{K_j} \gamma_{jk}^{(t)}} > \beta \quad (2)$$

其中 σ^2 表示背景噪声的方差。

2 传输控制

传输控制的效应是两方面的:一方面,通过控制发送节点的平均数量来调节干扰;另一方面,当传输控制依赖于信道状态时,可以用它来改变后验信道状态的分布(信道状态的分布以传感器的传输为条件)^[2-3]。

如果 $f(\gamma)$ 表示信道状态的先验概率密度函数, $g(\gamma)$ 表示信道状态的目标概率密度函数,那么把信道状态的分布逐渐改变到 $g(\gamma)$ 的传输控制可以表示为:

$$s_n(\gamma) = \min\left(\frac{g(\gamma)}{f(\gamma)}, \frac{x}{n}\right) \quad (3)$$

其中, n 表示网络内的节点总数,反映了网络的规模; x (一种设计参数) 表示在一个时隙内传输节点的平均数量。对于物理层(PHY)来说,可以证明良好的目标概率密度函数呈“下降”分布,任何形似于式(4)的目标概率密度函数,都是呈“下降”分布的概率密度函数。

$$g(\gamma) = \frac{\delta}{\gamma_0^{-\delta} - \gamma_1^{-\delta}} \frac{1}{\gamma^{1+\delta}} \quad [\gamma_0 \leq \gamma \leq \gamma_1] \quad (4)$$

网络与通信

Network and Communication

δ ($0 < \delta < 1$)、 γ_0 和 γ_1 是目标概率密度函数的参数, 正确选取这些参数的值能获得良好的性能。以下提出两种不同的传输控制方式, 它们在物理层具有良好的性能。

2.1 与位置无关的传输控制

与位置无关的传输控制(LIT)指的是数据包的发送仅由信道状态 γ 决定。根据前面的讨论, LIT 由先验分布和目标分布得到, 表示为:

$$s_n(\gamma) = \min\left(\frac{g(\gamma)}{f(\gamma)} \frac{x}{n}, 1\right) \quad (5)$$

其中, $g(\gamma)$ 表示信道状态的目标概率密度函数, $f(\gamma)$ 表示信道状态的先验概率密度函数。由于 $f(\gamma)$ 可以在节点部署之前计算得到, 因此, 传感器的传输控制完全可以在节点部署之前进行设计, 因而它的实现比较简单。

2.2 位置感知的传输控制

在位置感知的传输控制(LAT)中, 每个传感器节点对自己的径向距离进行估计, 数据包的“发送决定”是信道状态 γ 和传感器节点位置 r 的函数, 传输控制 $s_n(\gamma, r)$ 由式(6)得到:

$$s_n(\gamma, r) = \min\left(\frac{g(\gamma)}{f(\gamma|r)} \frac{x}{n}, 1\right) \quad (6)$$

其中 $f(\gamma|r)$ 是信道状态的条件概率密度函数, 它以节点的径向距离为条件。由于每个传感器节点需要对自己的位置做出估计, 因此, LAT 比 LIT 更难以实现。在下一节会看到, LAT 的特征要更加复杂。注意: 如果假定 $(\gamma_i^{(t)}, r_i)$ 表示传感器节点 i 的信道状态, 那么 LAT 就是由此推导而来的传输控制。于是, 先验信道状态信息(CSI)分布函数就等于 $t(r)f(\gamma|r)$, 这里 $t(r)$ 表示径向距离的分布函数, CSI 的目标分布函数为 $t(r)g(r)$ 。

3 传输控制的特征

通过仿真来研究传输控制的特征, 仿真参数的选择如表 1 所示。

表 1 仿真参数

| 参数 | 值 |
|---|-----|
| 采集代理节点 d | 4 |
| 扩频增益 N | 16 |
| 传感器节点的传输信噪比(SNR) $\frac{P_T}{\sigma^2}$ /dB | 6 |
| 解调阈值 β /dB | 4 |
| 目标概率密度函数的下降率 δ | 0.5 |
| γ_0 | 1.5 |
| γ_1 | 14 |

3.1 吞吐量

具有 n 个节点的传感器网络吞吐量的表达式 $T(n, s_n(\cdot))$ 由式(7)给出^[2-3]:

$$T(n, s_n(\cdot)) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \binom{n}{k} (1 - q_j p_{s_n})^{n-k} (q_j p_{s_n})^k C_k(G_{s_n}(\cdot)) \quad (7)$$

式中 p_{s_n} 表示传输的概率, q_j 表示选择第 j 个扩频码的概率, $G_{s_n}(\cdot)$ 表示后验 CSI 分布; 当有 k 个节点传输, 且

根据 $G_{s_n}(\cdot)$ 的信道状态为独立同分布时, $C_k(\cdot)$ 表示成功接收的数据包的平均数量。

对于 LIT, 有:

$$p_{s_n} = \int s_n(\gamma) f(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

对于 LAT, 有:

$$p_{s_n} = \int \int s_n(\gamma, r) f(\gamma|r) t(r) dy dr \quad (9)$$

式中, $t(r)$ 是传感器径向距离的概率密度函数。所以, LIT 的后验 CSI 分布为:

$$G_{s_n}(\gamma) = \frac{1}{p_{s_n}} \int_0^\gamma s_n(y) f(y) dy \quad (10)$$

LAT 的后验 CSI 分布为:

$$G_{s_n}(\gamma) = \frac{1}{p_{s_n}} \int_0^\gamma \int_0^1 s_n(y, r) f(y|r) t(r) dr dy \quad (11)$$

参考文献[1]已经证明: 如果 $nq_j p_{s_n} \rightarrow x$, 且 $G_{s_n}(\gamma)$ 收敛于点 $G(\gamma)$, 则:

$$T(n, s_n(\cdot), j) \rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-x} x^k}{k!} C_k(G(\cdot)) \triangleq \eta(x, j) \quad (12)$$

式中, $T(n, s_n(\cdot), j)$ 指的是采用第 j 个扩频码得到的网络吞吐量。采用传输控制 LIT 和 LAT 协议的吞吐量, 随 x (设计参数, 表示传输节点的平均数量) 和 n (表示网络的大小, 即节点的总数量) 的变化情况, 分别如图 4 和图 5 所示。图 4、图 5 也将 O-ALOHA 的增益与简单 TDMA 的增益进行了对比。在每个时隙内, 有 N 个传感器节点在没有考虑信道状态的情况下, 采用 N 个正交扩频码传输数据。从图中可以看出, TDMA 的吞吐量随着传输功率的减小而减小, 并最终趋近于 0。实际上, 在 O-ALOHA 传输机制中, 如果不考虑传输功率, 那么吞吐量会随着网络规模的扩大收敛于一条理论曲线。因此, 与 TDMA 的传输机制相比, O-ALOHA 的传输机制有一个明显的优势。另外, 采用 LIT 和 LAT 所获得的增益几乎是相同的。

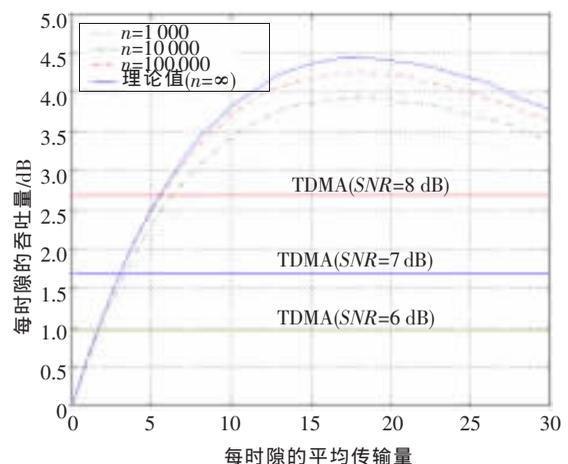


图 4 LIT 的性能

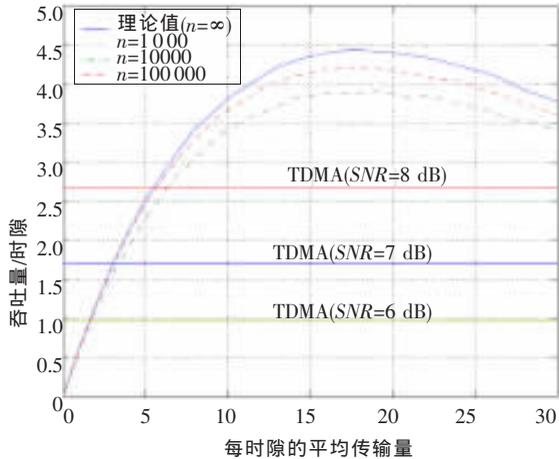


图5 LAT的性能

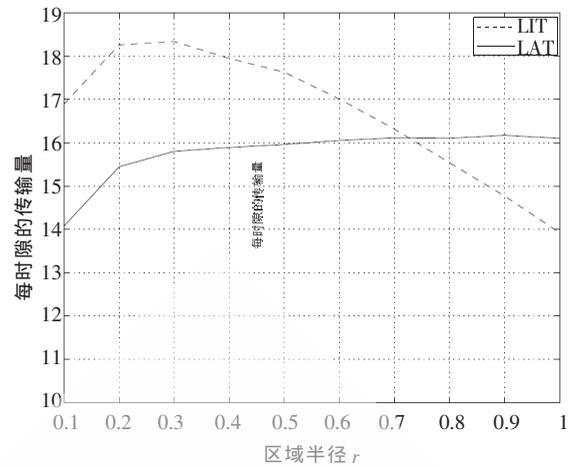


图6 传输概率与r的关系

3.2 传输方式

LIT是一种MAC协议,实现起来比LAT简单,但是根据总体的吞吐量,这两种协议具有相同的性能。两者之间的差别主要表现在,当与采集代理的距离不同时,传输节点和成功传输的节点两者数量的变化会有所不同。如果网络采用LAT协议,假设 $r_i=r$,则节点的传输概率由下式给出:

$$P_r\{T_x|r_i=r\} = \int s_n(\gamma, r)f(\gamma|r)dy \quad (13)$$

对于LAT,容易证明:

$$nP_r\{T_x|r_i=r\} \rightarrow x \quad (14)$$

因此,传输概率和节点与采集代理之间的距离是无关的。实际上,对于LIT,式(15)、(16)是成立的:

$$P_r\{T_x|r_i=r\} = \int s_n(\gamma)f(\gamma|r)dy \quad (15)$$

$$nP_r\{T_x|r_i=r\} \rightarrow x \int \frac{g(\gamma)f(\gamma|r)}{f(\gamma)}dy \quad (16)$$

式(16)表明传输概率取决于径向距离。图6表明,对LIT协议,大部分传输节点都集中在原点附近,也就是说,它们都距离采集代理比较近。但是,对于LAT协议,传感器节点的传输概率和节点与采集代理之间的距离是无关的。

4 随机接入的实现方式

如果传感器网络根据节点协议,向采集代理进行数据的可靠传输,那么O-ALOHA协议是如何实现这种应用的?本节提出两种基于扩频码的编码方案,其中R表示传感器网络每时隙可靠传输的比特数量。

4.1 独立于扩频码的传输

为了简要概括O-ALOHA协议,每个传感器节点根据采集代理传输的信标估计各自的信道状态信息,然后决定以某种概率传输数据,这由传输控制 $s_n(\gamma)$ 决定。一旦做出传输的决定,传感器节点从N个正交扩频码中随机选择一个,并且采用这个正交扩频码传输自己的数据。假定传感器节点传送的数据包具有以下结构,传感

器网络的二进制码本大小为 $|2^{MR}| \times M$ (M为码字长度)。假设传感器网络决定向采集代理传输码本中的信息k,则基于时间的编码过程如下:在第i个时隙,采集代理通过自己的信标,请求传感器节点发送第i个比特,于是所有的发送节点都将发送码字k的第i个比特。因此,发送一个码字需要M个时隙。假定成功接收(取决于SINR阈值)的数据包被无差错解码,因此删除码字中一个比特的概率就是一个时隙中没有成功接收数据包的概率。假设每时隙的平均吞吐量为 $T(x)$,则传感器网络和采集代理之间的信道就是一个删除信道,其删除概率为:

$$p(x) = (1 - \frac{T(x)}{N})^N \quad (17)$$

前面已经假定SINR的阈值 $\beta > 1$,那么 $\frac{T(x)}{N}$ 就表示基于某个特定扩频码的捕获概率^[8]。因此,式(17)表示的是采用任何一个扩频码(共有N个)均没有成功接收到数据包的概率。为了阐述系统的可达率,规定每个比特的传输必须是独立同分布的。由于每个传感器节点的信道状态基于时隙是独立同分布的,传输控制仅仅取决于信道状态,所以每个时隙传输的概率也是独立同分布的。在这种方案中,假设在每个时隙传输一个比特,那么每个比特的传输显然是独立同分布的。因此,这种信道的可达率可表示为:

$$R = 1 - (1 - \frac{T(x)}{N})^N \text{(比特/时隙)} \quad (18)$$

4.2 依赖于扩频码的传输

很明显,在独立于扩频码的传输方案中,由于每时隙仅仅传输一个比特,因此编码并没有用到扩频码的正交性。在本节提出一种修改的方案,该方案基于的事实是:采用不同正交码的传输是相互独立的。假定码本的结构如前所述,在这种情况下,每个码字被分成若干块,每块包含N个比特(N表示扩频增益)。因此,每个码字可以认为是一个 $M \times N$ 的二维数组,M表示块的数量,N表示每块包含的比特数量。因此,码本的大小为 $|2^{MR}| \times MN$ 。用于传输的扩频码从1~N进行排序,如果码本中的第k

条信息需要发送到采集代理,则编码过程如下:在第 i 个时隙,采集代理通过它的信标请求传感器节点发送第 i 块。参与发送的每个传感器节点采用扩频码 j 传输第 k 个码字的 (i,j) 比特,每个时隙传输一块。因此,传输一个码字所需要的时隙数量为 M ,也就是一个码字所包含的块的数量。从依赖传输控制的参数这个意义来说,相比前一种方案,依赖于扩频码的传输方案有一个明显的优点,即每时隙接收到的比特数可能多于一个。

假设成功接收到的数据包的解码是无差错的,则删除一个码字的一个比特的概率正好就是基于某个特定扩频码,数据包没有被成功接收的概率。如果假定选择一个扩频码 q_i 的概率,与选取所有 N 个扩频码的概率相同,那么码字中每个比特的删除概率都是一样的。由于一个时隙内每个比特的发送采用的是不同的正交码,那么这些比特的发送就不会相互干扰,因而是相互独立的。由于信道状态具有独立同分布的属性,所以一个时隙内一个比特的传输与另一个时隙内一个比特的传输是相互独立的,且具有相同的分布属性。因此,在这种方案下比特的传输是独立同分布的。所以,一个比特的删除概率为:

$$p(x) = 1 - \frac{T(x)}{N} \quad (19)$$

式中, $T(x)$ 是每时隙的吞吐量。每扩频码的吞吐量 $\frac{T(x)}{N}$ 表示基于某个特定扩频码,一个数据包被成功接收的概率。假定SINR的阈值 $\beta > 1$,因此,采用一个扩频码最多只有一个数据包被正确接收,其吞吐量就是正确接收数据包的概率^[8]。由于传输具有独立同分布属性,因此,这种方案的可达率为:

$$R = \frac{T(x)}{N} \text{ (比特/信道)} \quad (20)$$

根据这种方案,由于这些扩频码是正交的,因此每时隙有 N 个信道可供使用。所以信道容量为:

$$R' = NR = T(x) \text{ (比特/时隙)} \quad (21)$$

由此可见,可达率随参数 x (每时隙传输节点的平均数量)的变化而改变,如图7所示。图7表明,依赖于扩频码的传输所获得的增益较高。但是,对于传输速率较低的码本,独立于扩频码的传输方式比依赖于扩频码的传输方式的误差指数大。

本文介绍了一种适用于具有移动代理的传感器网络的O-ALOHA协议。根据这个协议,每个传感器以某种概率(它是信道状态的函数)发送数据包。假设传感器采用扩频信令,接收端采用匹配滤波,本文提出了与位置无关的传输控制(LIT)以及位置感知的传输控制(LAT)两种传输控制。仿真表明,采用LIT或者LAT都可以取得较好的增益。本文分析了LIT和LAT的传感器传输方式和成功发送的传感器节点数量,并得出以下结论:LIT成功发送的节点数量与传感器和采集代理之间的距离

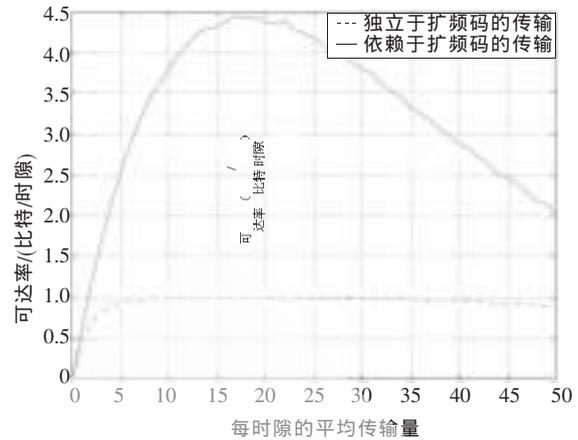


图7 两种传输可达率的比较

相关,而LAT则相反。此外,本文还介绍了向采集代理进行可靠数据传输的基于O-ALOHA协议的两种不同方式以及每种方式的最大传输率。

参考文献

- [1] 肖霄, 郑宝玉, 沈洋. 无线传感器网络中一种基于功率控制的MAC协议[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 62-67.
- [2] KWON H, KIM T H, CHOI S, et al. Lifetime maximization under reliability constraint via cross-layer strategy in wireless sensor networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005:1891-1896.
- [3] CUI S, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(8): 1089-1098.
- [4] HAJEK B, KRISHNA A, LAMAI R O. On the capture probability for a large number of stations [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 45(2): 254-260.
- [5] CONTI M, MASELLI G, TURI G, et al. Cross-layering in mobile ad hoc network design [J]. IEEE Computer Society, 2004, 37(2): 48-51.
- [6] 王罗, 李云, 刘占军, 等. 一种基于跨层优化的低延迟无线传感器网络MAC协议[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2007, 19(5): 622-626.
- [7] HOESEL L V, NIEBERG T, WU J, et al. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks by cross-layer interaction[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 78-86.
- [8] RADUNOVIC B. A cross-layer design of wireless ad-hoc networks [D]. PHD Thesis, June 12, 2005. <http://lcawww.epfl.ch/Publications/Radunovic/BRthesis.pdf>.

(收稿日期: 2010-12-01)

作者简介:

王骥,男,1970年生,博士,主要研究方向:单片机与嵌入式系统应用,无线传感器网络安全。