

基于时空多样性编码的低轮值无线传感器网络可靠传输算法

闫宇博¹, 杨盘隆¹, 张磊¹, 邱正伦¹, 洪善林²

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 南京新宇房产开发有限公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 提出了适用于低轮值无线传感器网络的可靠传输算法, 主要特点是发掘并利用低轮值无线传感器网络特有的时空相关性, 结合编码机制以获得较高的能量效率和较低的传输时延。针对编码块在多条路径上的最优分配问题进行了建模。由于求解最优策略是 NP 难题, 给出了近似算法, 并通过仿真分析了不同参数对近似算法的影响。仿真结果表明, 基于时空多样性编码的分配算法能够在较低的能量开销条件下, 实现低时延的可靠传输。

关键词: 低轮值无线传感器网络; 多径传输; 编码块分配

中图分类号: TP393.0

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)06-0103-09

On coding over the spatial-temporal diversity for reliable transmission scheme in low-duty-cycle WSN

YAN Yu-bo¹, YANG Pan-long¹, ZHANG Lei¹, QIU Zheng-lun¹, HONG Shan-lin²

(1. Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Nanjing Xinyu Real Estate Development Co Ltd, Nanjing 210018, China)

Abstract: A reliable data delivery scheme for low-duty-cycle wireless sensor networks (WSN) was proposed. Using this scheme, the unique spatial-temporal diversity in low-duty-cycle WSN was explored and exploited. Combining with coding schemes, the proposed scheme could achieve higher energy efficiency and lower delivery delay. The coding block allocation problem over multiple paths was formulated. As it was NP-hard, an approximate algorithm to tackle this difficulty was proposed. The impact of network parameters was further analyzed with experimental methods. Extensive simulations also show that, the coding over the spatial-temporal diversity scheme could achieve relatively reliable and low delay delivery with relatively less energy.

Key words: low-duty-cycle WSN; multipath delivery; allocation of coded blocks

1 引言

近年来,无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)在军事及民用的各个方面都得到了广泛而深入的应用。但是,在诸如军事侦察^[1]、环境监测^[2]、建筑物保护^[3]等应用领域,无线传感器网络通常需要连续工作几个月甚至几年的时间,同时还要保证能够将监测的数据及时可靠地传回数据收集节点。

然而,由于传感器节点的体积、成本、功耗等因素的限制,使得节点之间的通信非常不可靠。此外,无线传感器节点通常仅仅依靠电池供电。相对于网络的工作时间来说,节点的电池容量显得非常有限。而且,在上述的应用领域中,通常很难甚至不可能经常为节点更换电池。因此,综合考虑网络生存时间以及数据传输的时延和可靠性,设计一种数据传输机制来实现网络生存时间、数据递交时延和

收稿日期: 2010-12-17; 修回日期: 2011-08-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB3020402); 国家自然科学基金资助项目(61003277); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010102)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB3020402); The National Natural Science Foundation of China (61003277); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2010102)

递交可靠性之间的有效平衡是一项非常基础而且很有必要的工作。

在低轮值 (low-duty-cycle) 无线传感器网络中, 处于睡眠状态的节点可以关闭其无线电模块。由于节点的无线电模块消耗了绝大部分能量, 低轮值工作模式可以极大地延长网络生存时间。以 Telosb^[4] 节点为例, 其通信模块 CC2420^[5] 在接收状态、发送状态和睡眠状态的电流消耗分别为 18.8mA、17.4mA 和 0.02 μ A。得益于节点有限的工作时间, 低轮值工作模式可以极大地减少节点的能量消耗。

低轮值无线传感器网络的性能受到 2 个因素的影响。一是数据递交时延。发送节点必须等到接收节点醒来时才能发送数据, 从而引入了睡眠延时, 睡眠延时导致数据递交时延显著增加。二是不可靠链路。不可靠链路造成数据重传并且浪费能量, 此外, 不可靠链路也是造成数据递交时延增加的另一个重要原因。通常, 确认和重传机制可以提高数据递交的可靠性。但是在低轮值无线传感器网络中, 受到较长睡眠延时和不可靠链路的影响, 很难做到及时反馈。为了降低时延并且提高可靠性, 简单的方法是将多个消息副本在多条路径上同时传输。但是, 简单的冗余机制导致了过多的通信开销。更高效的方法是对原始消息进行编码^[6], 并将编码块通过多条路径同时传输。当目的节点收到的编码块个数满足一定要求时, 即可将原始消息解出。从而以一种高效的方式提高递交可靠性并降低了时延。但是这种方法缺少对低轮值无线传感器网络特性的考虑, 导致在低轮值无线传感器网络中消息递交时延较大。

低轮值无线传感器网络可以显著减少能量消耗, 但是网络的性能尤其是数据的传输时延却不是理想。之前的研究工作通过高效的调度算法来解决这一问题^[7-9]。S-MAC^[10] 提出了周期性地睡眠和工作的介质访问控制协议。为了提高网络效率, 文献^[11] 提出了流水线工作调度模式。在这种模式下, 节点通过相互合作来降低递交时延。但是, 这种机制不支持分簇和层次的网络。因此, 作者给出了一种更加复杂的“奇偶”转换的机制。但是这种机制的可靠性并不高。和这些工作相比, 本文的机制不需要复杂的调度和精确的时钟同步。更重要的是, 本文给出的编码机制对链路具有较好的顽健性, 在节约能量的同时实现数据的快速传输。

数据递交作为无线传感器网络中的一项基本功能, 已经得到了广泛深入的研究。文献^[12] 提出

了收集树协议 (CTP, collection tree protocol)。CTP 通过自适应信标 (adaptive beaconing) 和路径验证 (data path validation) 机制, 在高度动态变化的网络中取得较好的效率、顽健性和可靠性。但是, 由于 CTP 选择递交率较高的链路来递交数据, 而在低轮值网络中, 节点在一个周期内可传输的数据有限, 从而导致数据的递交时延急剧增加。针对低轮值无线传感器网络所具有的特点, 文献^[13] 研究了端到端的数据转发问题, 并提出了动态转发机制 (DSF, dynamic switch-based forwarding)。DSF 可以分别针对平均数据递交率、平均数据递交时延或者平均能量耗费进行优化。但是 DSF 并不能对这 3 个指标同时进行优化。而且 DSF 没有利用无线传感器网络中普遍存在的多径传输来提高数据递交率并降低时延。文献^[14] 提出了一种有效控制时延的算法, 从而减少了低轮值无线传感器网络中数据递交时延, 但是缺少对能量耗费的考虑。本文的算法综合考虑了时延、能量和递交率。

本文针对低轮值不可靠无线传感器网络中的高效数据递交问题, 提出了基于时空多样性的数据递交机制。首先分析了存在于低轮值无线传感器网络中的时空多样性。由于节点的轮值周期各不相同, 因此可以选择多个转发节点以加速数据传输。其次, 利用编码机制以提高可靠性。编码机制不需要对每个编码块都进行确认, 而且冗余的引入可以达到类似于预先重传的效果。实验表明, 基于时空多样性的编码机制可以在低轮值无线传感器网络中实现及时高效的数据传输。总之, 基于时空多样性的编码机制可以有效地发掘低轮值无线传感器网络的特性, 从而在编码、复杂度、空间和时间效率上取得较好的平衡。

2 编码、分配和时空多样性分析

2.1 编码和分配效果分析

由于节点在工作时隙内发送的数据有限, 需要将较大的消息分成多个数据块来分别传输。为了提高可靠性, 常用的机制有 2 种: 一是直接将原始消息分为多个数据块进行传输, 并对每个数据块进行确认, 称为无编码机制; 二是将原始消息进行编码, 然后传输编码块, 并且不需要对编码块进行确认, 称为编码机制。通过仿真来考察这 2 种机制的递交率和能量耗费。令消息和数据块的大小分别为 5byte 和 1byte。采用了确认和重传以提高无编码机制

的可靠性，并将最大重传次数设置为 3。对于编码机制，采用了纠删编码，并将复制因子设置为 3，所以共有 15 个编码块需要发送。由纠删编码的特性可知，在理想情况下目的节点只需收到 5 个以上的编码块即可将原始消息解出。

仿真结果如图 1 所示。图 2 给出了发送节点成功递交一条消息所需要发送数据块的平均个数，反映了不同机制的能量效率。为了分析确认帧丢失所造成的影响，首先令确认帧是可靠的，然后令确认帧和数据帧具有相同的可靠性。仿真结果也在图 1 和图 2 中给出。由图 1 可知编码机制的递交率要明显高于无编码机制的递交率，而且确认帧的丢失对于递交率没有影响。由图 2 可知，当链路质量较差时，编码机制具有更好的能量效率。但是当链路质量较好时，无编码机制具有较高的能量效率。另外，图 1 和图 2 表明确认帧的丢失虽然不会对递交率产生影响，但影响着能量效率。由于无线传感器网络不可靠链路的影响，基于编码的数据递交机制具有更高的效率。

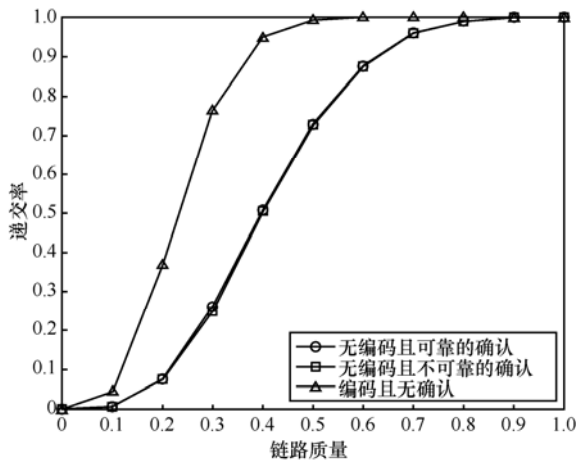


图 1 链路质量对递交率的影响

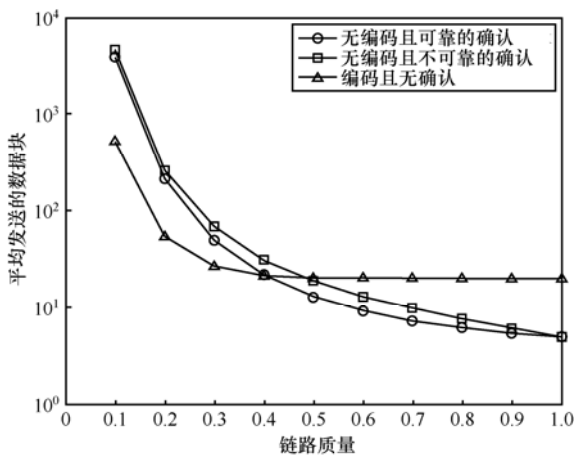


图 2 链路质量对平均发送数据块的影响

为了分析编码块分配的重要性，对如图 3 所示的拓扑进行了仿真。令源节点 S 向目的节点 D 发送大小为 2byte 的消息。除节点 D 外，所有节点在 100 个时隙内只有一个时隙处于工作状态。假设一个时隙内只能传输一个大小为 1byte 的数据块。对原始消息进行纠删编码，复制因子为 2，编码块的大小为 1byte。所以共有 4 个编码块需要传输。假设路径 $S \rightarrow R1$ 和 $S \rightarrow R2$ 的睡眠延时分别为 10 和 160。路径 $S \rightarrow R1 \rightarrow D$ 和 $S \rightarrow R2 \rightarrow D$ 递交率为 0.7。

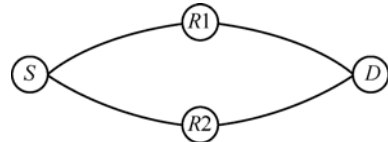


图 3 具有 2 个节点的简单拓扑

表 1 列出了在不同分配策略下的平均递交时延 (EDD, expected delivery delay)、平均递交率 (EDR, expected delivery ratio) 和平均能量耗费 (EEC, expected energy consumption)。其中， x_1 和 x_2 分别表示分配给路径 $S \rightarrow R1 \rightarrow D$ 和 $S \rightarrow R2 \rightarrow D$ 的编码块个数。由表 1 可知，不同的分配策略所导致的 EDR 和 EEC 相同，但 EDD 有着显著的差别。当路径的递交率不同时，综合考虑路径递交率和递交时延的策略能够在达到较高递交率和能量耗费的同时取得较小的递交时延。

表 1 不同分配策略下的时延、递交率和能耗

策略	x_1	x_2	EDD	EDR	EEC
1	4	0	156.6	0.9163	4
2	3	1	128.7	0.9163	4
3	2	2	135.3	0.9163	4
4	1	3	202.5	0.9163	4
5	0	4	294.1	0.9163	4

2.2 时空多样性分析

在低轮值无线传感器网络中，不同的路径具有不同的递交时延。而数据的递交时延不仅取决于路径的递交时延，还取决于数据产生的时间。因此，应当根据数据产生的时间和节点的工作调度为每一个数据分组分别选择传输路径。节点的最短时延递交路径也应该随着节点工作调度的改变而改变。

时空相关性存在于网络中不同的数据分组和

节点之间。低轮值无线传感器网络具有这样的时空相关性。首先，由于节点的工作调度是异步的，所以每条路径的递交时延是不相同的。其次，数据分组到达的时间也影响着数据的递交时延。由于每一个数据分组都要经历一段睡眠延时，因此选择一个较早醒来的转发节点就显得至关重要。对于多跳的无线传感器网络来说，随着节点数的增多和轮值周期的降低，时空相关性必然广泛存在于不同的节点之间。

下面通过仿真来说明时空相关性。一般情况下，为了获得较小的数据递交时延，节点倾向于选择平均递交时延最小的路径来传输数据。但事实上，由于数据到达时间和节点工作调度的不同，节点并不总是选择平均递交时延最小的路径。在如图 4 所示的拓扑中分析了平均递交时延最小的路径在不同的轮值周期、工作调度和数据产生时间下的利用率。源节点 1 通过路径 1→2→5、1→3→5 和 1→4→5 向目的节点 5 发送数据。假设路径的递交率为 1。节点随机地选择工作时段。对于每一个数据分组，源节点都使用能达到最小数据递交时延的路径来传输数据。其中，数据的递交时延为节点的睡眠延时加上路径的递交时延。仿真中，记录节点针对每一个数据分组所选择的路径，并且计算最小睡眠延时路径的利用率。仿真结果如图 5 所示。

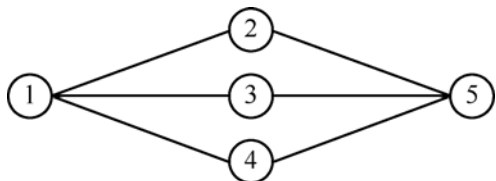


图 4 说明时空多样性的简单拓扑

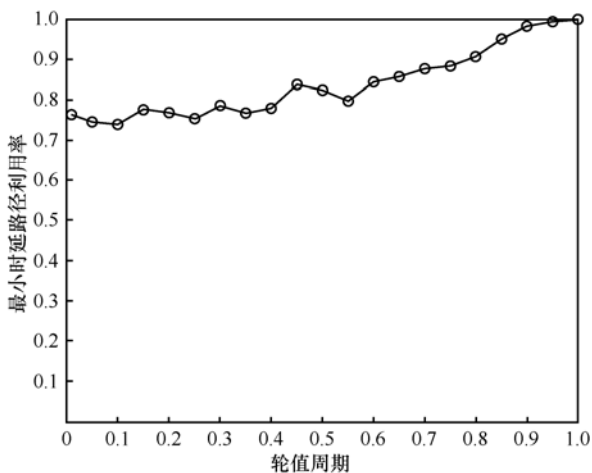


图 5 时空多样性仿真结果

由图 5 可知，当节点的轮值周期低于 40% 时，最小睡眠延时路径的利用率不超过 80%。也就是说，即使在随机部署的网络中，也有近 30% 的机会可以对其他的路径加以利用。仿真结果表明了在低轮值无线传感器网络中时空相关性可以用来降低数据的递交时延。

3 数据传输机制模型

3.1 网络模型

为不失一般性，假设网络中所有节点的工作周期为 T 个时隙。每个节点随机地从这 T 个时隙中任选一个作为其工作时段。第 i 个节点的工作时段记为 $activeslot_i$ ，其中， $activeslot_i$ 是介于 1 和 T 之间的整数。假设时隙长度为 τ 个单位时间，且一个时隙内所能发送数据分组的最大长度为 l 。

图 6 给出了节点 A 通过 B 向 C 发送数据的例子。其中，工作周期 $T=3$ ，轮值周期为 1/3。节点的工作时段如图中阴影所示。由节点 B 和 C 的工作调度可知节点 A 向 C 发送数据的递交时延为 4 个时隙。

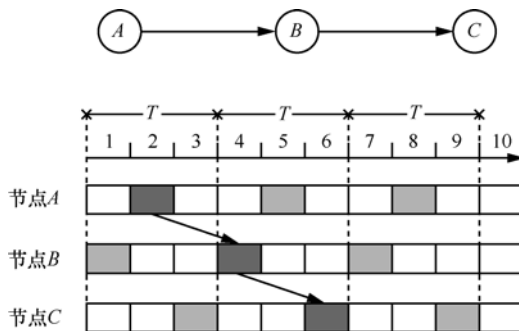


图 6 低轮值无线传感器网络模型

基于以上的网络模型，假设网络相邻节点之间是同步的，每一个节点自主地选择其工作调度，并将调度信息向邻居节点通告。时钟同步可以用文献 [15] 所给的 FTSP (flooding time synchronization protocol) 来实现，可以达到微秒级的同步精度。文献 [16] 给出的方法即使在节点不同步的情况下也能实现低轮值无线传感器网络的邻居发现，从而可以用来在节点间实现工作调度的通告。CTP 得到链路的质量信息，并将链路质量和邻居节点信息发送给收集节点，从而得到网络的拓扑和链路质量。

由于以下 2 方面的原因，采用了纠错码在源节点对数据进行编码，而没有用网络编码。首先，由

于无线传感器网络中节点的计算能力和电池容量都极其有限，因此很难在所有网络节点，特别是中继节点上执行编解码等计算开销较大的工作。而且当网络规模变大后数据传输所需要的跳数也显著增加，计算复杂度会进一步提高。其次，还有一个重要原因是，现有的 ZigBee 体系下的无线传感器节点无法按照需要进行 MAC 层及以下的编码工作，只能在应用层进行编码操作，尤其是在不可靠链路的网络中。因此，采用了应用层编码，端到端恢复的机制。

3.2 数据传输机制问题定义

考虑源节点 S 向目的节点 D 发送大小为 m 的消息，并假设 S 和 D 之间共有 n 条可用路径。令 P_i 为节点 S 通过路径 i 向节点 D 成功递交编码块的概率，则 $P_i = \prod_{j \in \text{path } i} q_j$ ，其中， j 是路径 i 上的链路， q_j 是链路 j 的递交率；令 D_i 是路径 i 的睡眠延时。假设发送节点向接收节点发送一个编码块需要 1 个时隙的时间。如果需要在一条路径上传输多个编码块，则发送方在发送完一个编码块后需要再等待 T 个时隙直到接收节点醒来后才能发送下一个编码块。例如，源节点 S 在时隙 1 通过路径 i 向目的节点 D 发送 b 个编码块，路径 i 的递交率和睡眠延时分别为 P_i 和 D_i 。则第 u 个编码块预计到达目的节点的时间为 $a_u = D_i + (u-1)T$ 。假设使用复制因子为 r 的纠删编码，则共产生 $b = \lceil mr/l \rceil$ 个大小为 l 的编码块，在理想情况下，任意 $k = \lceil m/l \rceil$ 个编码块都可以解出原始消息。

数据传输机制算法就是求得编码块在多条路径上的分配方案，使得在满足平均递交率（EDR, expected delivery ratio）不小于 $1-\varepsilon$ 的条件下，达到最小的平均递交时延。给定编码块在 n 条路径上的分配方案 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，令 a_u 表示目的节点收到第 u 个编码块的时间， p_u 是相应的概率。令 $P^{u_{\text{decode}}}$ 表示目的节点在收到第 u 个编码块后可以解出原始消息的概率。在源节点，通过纠删编码将原始消息分为了 b 个编码块。由纠删编码的性质可知，目的节点只需要收到 k 个以上的编码块就可将原始消息解出。由于编码块的递交是不可靠的，因此，目的节点是以一定的概率接收编码块的。因此，接收节点在收到第 u 个编码块后，能解出原始消息的概率为 $P^{u_{\text{decode}}}$ 。

给定 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，消息的平均递交时延（EDD, expected delivery delay）可以表示为

$$EDD = \sum_{u=1}^b a_u P^{u_{\text{decode}}} \quad (1)$$

也就是说，本文的数据传输机制问题就是在满足 $\sum_{u=1}^b x_u = b$ 和 $EDR > 1-\varepsilon$ 的条件下求得 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，以最小化平均递交时延。

4 基于时空多样性的编码块分配算法

4.1 最优分配模型

由于无线链路的不可靠性，通过路径传输的编码块要么成功接收，要么丢失，因此可以用伯努利模型来描述。本文给出的算法正是基于这个模型。在容迟网中，通常一条路径所能传输的数据量是有限的，文献[17]中的作者针对这一特征给出了最优分配算法以最大化数据递交率。但是文献[17]给出的算法没有对递交时延进行优化。而且，在轮值无线传感器网络中，选择高可靠性的路径虽然能够获得较高的数据递交率，但是也很可能会导致较长的递交时延。从而使用文献[17]给出的算法不能适用于低轮值无线传感器网络，尤其是对时延要求比较高的应用领域。因此，本文给出的算法是在满足递交率不小于 $1-\varepsilon$ 的条件下来最小化递交时延。

由于目的节点 D 预计通过 n 条可用路径接收从源节点 S 发送的 b 个编码块，因此给定分配方案 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，可以根据这 b 个编码块的预计到达时间进行排序，令 a_u 是第 u 个期望收到的编码块的到达时间， p_u 是相应的概率。如果第 u 个编码块是通过第 i 条路径收到的，那么 $p_u = P_i$ 。

给定 b 个编码块，共有 2^b 种接收编码块的组合。将所有可能的组合记为 $0, 1, \dots, (2^b-1)$ 。可以根据以下的方式用一个 b bit 的整数 z 来表示第 z 种组合。如果整数 z 的二进制表示的第 u bit 为 1，那么令 c_{zu} 为 1，否则为 0。 c_{zu} 表示了在第 z 种组合中是否成功收到了第 u 个预计到达的编码块：

$$c_{zu} = z / 2^{u-1} \bmod 2 \quad u=1, \dots, b \quad (2)$$

令 w_z 表示第 z 种组合出现的概率。由于每个编码成功接收的概率是相互独立的，因此有

$$w_z = \prod_{u=1}^b [p_u c_{zu} + (1-p_u)(1-c_{zu})] \quad (3)$$

为了表示第 z 种组合能否解出原始消息，定义了二进制变量 y_z ，并且 y_z 为 1 当且仅当第 z 种组合中成功接收编码块的个数大于等于 k 。

所以，最优分配问题可以描述为

$$\text{Min} : EDD = \sum_{u=k}^b a_u P_{\text{decode}}^u \quad (4)$$

$$P_{\text{decode}}^u = \sum_z w_z \text{ when } c_{zu} = 1 \text{ and } \sum_{t=1}^{u-1} c_{zt} = k - 1$$

$$EDR = \sum_{z=0}^{2^b-1} y_z w_z > 1 - \varepsilon$$

$$y_z = \{0, 1\}, \sum_{t=1}^b c_{zt} \geq y_z k \quad z = 0, \dots, (2^b - 1) \quad (5)$$

$$0 \leq x_i \leq b \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = b$$

以上规划问题具有指数级的约束并且使用了整型变量。给定分配策略 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，即使计算 EDR 也是 NP 难题。尽管如此，当 b 和 n 较小时，以上规划问题仍然可以求解。

4.2 近似求解算法

由于求解最优分配策略是 NP 难题，本文使用了一些直观的方法来降低了复杂度并给出了次最优的解法。

求次优解的主要思想如下。首先，将 b 个编码块分配到每一条路径上。所以接收节点将会得到 $n \times b$ 个编码块的到达时间以及相应的概率和所通过的路径。按照到达时间将这 $n \times b$ 个编码块排序，并将所得到的集合记为 $\{SEA\}$ 。然后，从集合 $\{SEA\}$ 中选择前 b 个编码块，并计算相应的 EDR。如果 $EDR > 1 - \varepsilon$ ，分配方案即可以通过 b 个编码块的递交路径求得。否则，在集合 $\{SEA\}$ 中从第 b 个编码块开始，由后至前选择递交率最小的编码块（将最小的递交率记为 p_{\min} ），并将这个编码块以及其后通过同一条路径传输的所有编码块从集合 $\{SEA\}$ 中删除。然后再次计算前 b 个编码块的 EDR。重复这个过程直到 $|SEA| = b$ 。

为了降低删除的编码块对数据递交时延的影响，定义了变量 δ 。如果一个编码块的递交率 p 满足 $p < p_{\min} + \delta$ ，才将此编码块和之后通过同一条路径传输的所有编码块都删除。

ε 和 δ 的取值在将在 5.2 节进行分析。求次优解算法的伪代码如图 7 所示。

```

Algorithm FindStrategy
1: allocate blocks to all paths
2: while |SEA| > b do
3:   calculate EDR
4:   if EDR < 1 - ε then
5:     find the minPath with minimum delivery ratio from
       allocated paths
6:     if any blocks was delivered through minPath after
       the b th block then
7:       remove the blocks
8:       if |SEA| > b then
9:         remove the last block delivered through
           minPath before the b th block
10:      end if
11:    end if
12:  else if
13:    then
14:      remove the blocks with delivery ratio less
       than minP + δ after the b th block
15:    if |SEA| > b then
16:      remove the last block which delivery ratio less
       than minP + δ before the b th block
17:      if no block delivered through minPath then
18:        remove minPath from allocated paths
19:      end if
20:    end if
21:  end while
22: set allocation strategy according to the first b blocks
    
```

图 7 分配策略的近似最优算法

5 仿真分析

5.1 仿真环境设置

在仿真中，在一个 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的范围内随机部署了 30 个节点。编号最小的节点为源节点，编号最大的节点为目的节点。源节点位于左下角，目的节点位于右上角。除目的节点外，所有的节点都工作在低轮值模式下。无线传播模型为自由空间模型。无线模块的相关参数根据 CC2420 的硬件手册^[5]来配置。另外，由于在低轮值无线传感器网络中，不同节点在同一时隙醒来的概率非常小^[13]，因此在仿真中，使用 CSMA 机制来实现信道接入控制。若节点检测到信道忙，则下一周期再次尝试发送。

仿真中，时隙长度 τ 为 10ms。工作周期 $T = \tau / \text{duty cycle}$ 。每次仿真，根据最短路径算法选择 3 条边不相交的路径。其中边的耗费是指平均传输次数。消息和编码块的大小分别为 5byte 和 1byte。复制因子为 2。并且在一个时隙的时间内只能传输一个编码块。

5.2 参数设置分析

由于使用了 ε 和 δ 来控制递交率和递交时延之间的折衷，分别定义为递交率因子和时延因

子，在这里通过仿真来对这 2 个参数的取值进行分析。

仿真中，令 $dutycycle = 1\%$ 。收集的数据是 500 次仿真结果的平均值。在每次仿真中，比较了 2 种策略的平均递交时延 (EDD, expected delivery delay) 和平均递交率 (EDR, expected delivery ratio)。一种策略是最大化递交率 (MDR, maximize delivery ratio) 另一种策略是最小化递交时延 (MDD, minimize delivery delay)。MDR 策略使用递交率最高的路径，MDD 策略使用给出的策略以在满足 $EDR > 1 - \epsilon$ 的条件下最小化递交时延。

图 8 和图 9 分别给出了不同递交率因子 ϵ 所对应的 EDD 和 EDR。当 ϵ 增加时，更多的编码块分配给了具有较小递交时延的路径，但是这些路径的递交率很可能也比较小，所以导致 EDD 和 EDR 的降低。但是当 $\epsilon > 0.1$ 时，EDR 明显下降，所以取 $\epsilon = 0.1$ 来降低 EDD 同时获得相当的 EDR。

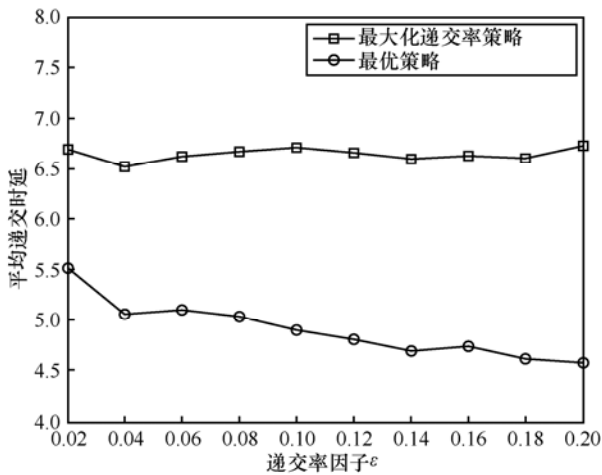


图 8 不同递交率因子 ϵ 取值对应的平均递交时延

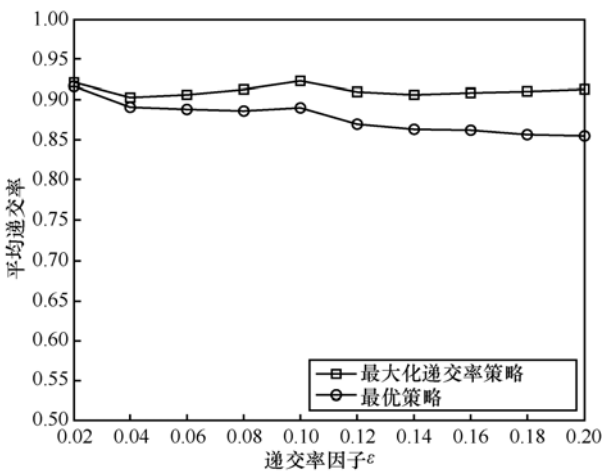


图 9 不同递交率因子 ϵ 取值对应的平均递交率

图 10 给出了不同 δ 取值下 2 种策略之间的关系。当 δ 增加时，分配给不可靠路径的编码块数减少，导致平均递交时延差别的增加。当 $\delta \geq 0.05$ 时，两者之间的差异变得更加明显，所以在以下的仿真中取 $\delta = 0.05$ 。

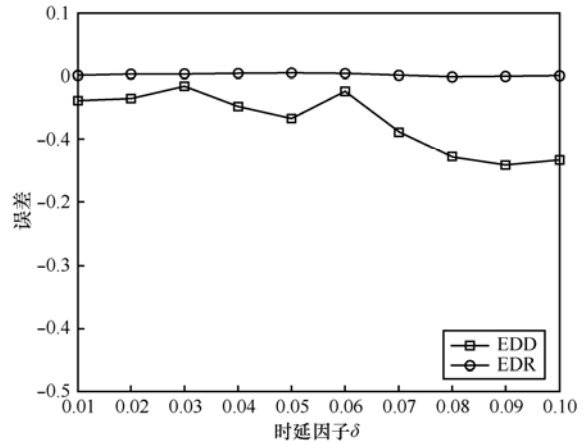


图 10 不同时延因子 δ 取值对应的 2 种策略间的误差

5.3 数据递交率、时延和能耗分析

在本节，对给出的基于时空多样性编码的数据传输算法进行性能分析，次优解算法标记为“MDD”。除了“MDD”，还实现了另外 2 种策略以进行比较。一个策略仅通过递交率最高的路径来传输编码块以最大化数据递交率（标记为“MDR”）。另一个策略将编码块在多条路径上进行平均分配（标记为“EVEN”）。在仿真中，对数据递交率、递交时延和能耗进行了比较。每次仿真对不同的随机数据种子、节点部署和工作调度重复 50 次。仿真结果取的是这 50 次仿真的平均值。每次仿真收集到数据是对 100 次源节点至目的节点通信的平均值。

首先分析了不同轮值周期下的性能。在仿真中，随机地在仿真区域内产生具有 30 个节点的网络。图 11 给出了当节点轮值周期从 1% 到 10% 时的平均递交率、平均递交时延和平均能耗。其中，平均能耗以平均每收到一条消息所需要发送的编码块个数来度量。如图 11(a) 所示，当轮值周期增加时，在同一时隙发送数据的节点数增加，从而由于隐终端问题导致递交率下降。图 11(b) 表明当轮值周期增加时，3 种策略的递交时延都随之减少。这是因为节点工作时间所占的比例增加了，从而促使了递交时延的降低。同样由于隐终端问题，由图 11(c) 可以看出，随着轮值周期的增加，节点的能量耗费也相应增加。

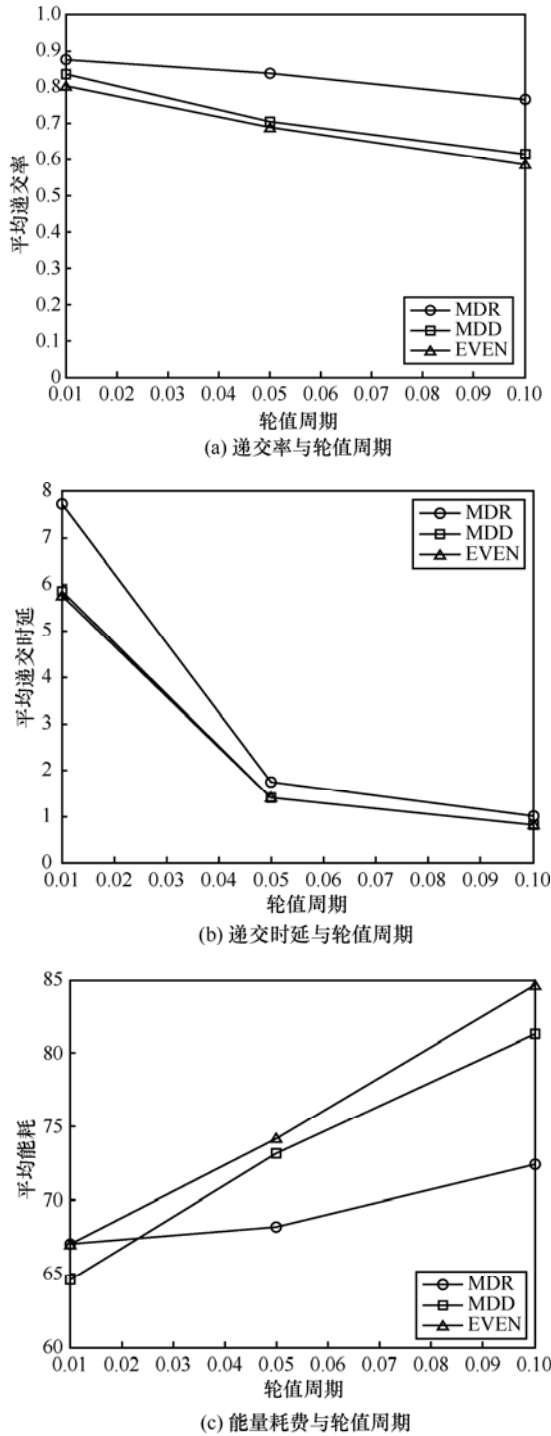


图 11 当轮值周期变化时的递交率、时延和能耗比较

接着，分析了 3 种策略在不同节点密度下的性能差异。在仿真中，固定仿真区域，并将节点的轮值周期固定为 1%，然后将节点数目从 30 增加到 50。图 12 分别给出了数据递交率、递交时延和能耗随着网络密度增加而变化的情况。尽管随着节点密度的增加，节点的邻居个数增加，但是由于网络的低轮值特性，数据冲突现象并没有加剧。因此数据递

交率会随着网络节点密度的增加而增加，正如图 12(a)所示。当递交率增加时，目的节点更容易收集到足够的编码块来解出原始消息，所以如图 12(b)所示，数据递交时延会随着节点密度的增加而降低。由于节点密度增加时，节点间的通信链路变得更为可靠，因此能量耗费也随之下降，正如图 12(c)所示。

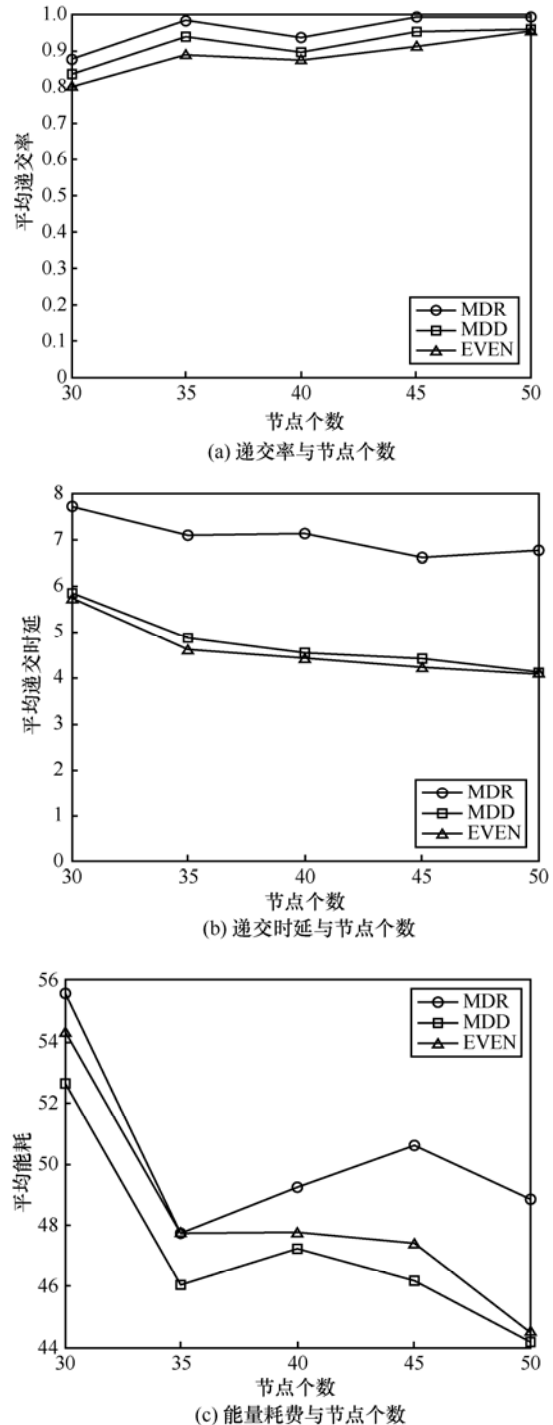


图 12 当节点个数变化时的递交率、时延和能耗比较

由图 11 和图 12 可知，“MDD”策略能够降低递交时延，同时取得相当的递交率并且消耗较少的能量。“EVEN”策略虽然也降低了递交时延，却降低了递交率并增加了能量耗费。

6 结束语

在本文中，给出了基于时空多样性的低轮值无线传感器网络数据传输算法，该算法有效地利用了低轮值无线传感器网络的潜在机会，一系列的仿真表明了低轮值无线传感器网络在编码和时空维度存在的机会。将无线传感器网络中纠删编码在多条路径上的分配问题进行了建模，并通过仿真实验表明通过多条路径来传输纠删编码块对于高能效数据传输策略的重要性，进一步的仿真结果也表明该算法能适用于非对称链路的情形。由于编码块的最优分配问题是 NP 难题，本文给出了最优分配的近似算法。仿真分析充分表明了所给算法的有效性。

在以后的工作中，将会把这种模型扩展到事先精心设计好的工作调度中去，从而进一步提高低轮值无线传感器网络的数据递交率。另外，由于涉及到随机模型和 NP 复杂性分析等，本文没有对近似算法的复杂性以及近似算法和最优算法的性能差异进行分析。这部分内容也将在以后的工作中进行完善。

参考文献：

- [1] HE T, KRISHNAMURTHY S, LUO L, *et al.* Vigilnet: an integrated sensor network system for energy efficient surveillance[J]. *ACM Trans Sen Netw*, 2006, 2(1):1-38.
- [2] MO L, HE Y, LIU Y, *et al.* Canopy closure estimates with greenorbs: sustainable sensing in the forest[A]. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, NY, USA, 2009. 99-112.
- [3] XU N, RANGWALA S, CHINTALAPUDI K, *et al.* A wireless sensor network for structural monitoring[A]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, NY, USA, 2004. 13-24.
- [4] POLASTRE J, SZEWCZYK R, CULLER D. Telos: enabling ultra-low power wireless research[A]. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks[C]*. Piscataway, NJ, USA, 2005. 364-369.
- [5] Texas Instruments. CC2420: 2.4 GHz IEEE 802.15.4 /ZigBee-ready RF transceiver[EB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>.
- [6] BYERS J W, LUBY M, MITZENMACHER M. A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20: 1528-1540.
- [7] KESHAVARZIAN A, LEE H, VENKATRAMAN L. Wakeup scheduling in wireless sensor networks[A]. *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]*. New York, NY, USA, 2006. 322-333.
- [8] MA J, LOU W, WU Y, *et al.* Energy efficient tdma sleep scheduling in wireless sensor networks[A]. *INFOCOM[C]*. 2009. 630-638.
- [9] WANG F, LIU J. Duty-cycle-aware broadcast in wireless sensor networks[A]. *INFOCOM[C]*. 2009. 468-476.
- [10] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2004, 12(3): 493-506.
- [11] CAO Q, ABDELZAHER T, HE T, *et al.* Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection[A]. *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]*. Piscataway, NJ, USA, 2005. 4.
- [12] GNAWALI O, FONSECA R, JAMIESON K, *et al.* Collection tree protocol[A]. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, NY, USA, 2009. 1-14.
- [13] GU Y, HE T. Data forwarding in extremely low duty-cycle sensor networks with unreliable communication links[A]. *Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, NY, USA, 2007. 321-334.
- [14] LI Y, YE W, HEIDEMANN J. Energy and latency control in low duty cycle MAC protocols[A]. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]*. New Orleans, LA, USA, 2005. 676-682.
- [15] MAR'OTI M, KUSY B, SIMON G, *et al.* The flooding time synchronization protocol[A]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, NY, USA, 2004. 39-49.
- [16] DUTTA P, CULLER D. Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications[A]. *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]*. New York, NY, USA, 2008. 71-84.
- [17] JAIN S, DEMMER M, PATRA R, *et al.* Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network[A]. *Proceedings of the 2005 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications[C]*. New York, NY, USA, 2005. 109-120.

(下转第 117 页)