

无线传感器网络中基于 NDMA 的跨层协作多包接收

季 薇^{1,2}, 郑宝玉²

(1. 上海交通大学电子工程系, 上海 200240; 2. 南京邮电大学信号处理与传输研究院, 江苏南京 210003)

摘 要: 本文研究了协作分集下的 NDMA(网络辅助分集多址接入)机制, 针对无线传感器网络特点和信道矩阵满秩性要求设计中继选择准则, 提出了一个新的跨层协作多包接收机制. 该机制在抗信道衰落的同时可有效限制数据包重传次数, 从而大大提高多包接收的效率. 对新机制的性能仿真以及该机制与 NDMA、联合 NDMA、时隙 ALOHA 之间的性能对比证实了新机制的有效性.

关键词: 无线传感器网络; 跨层; 协作分集; 多包接收; 网络辅助分集多址接入

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 05-1001-04

Cross-Layer Cooperative Multi-Packet Reception in WSN Based on NDMA

Ji Wei^{1,2}, ZHENG Bao-yu²

(1. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: A novel multi-packet reception scheme in wireless sensor networks (WSN) based on network-assisted diversity multiple access (NDMA) is proposed, which exploits cooperative diversity to overcome multi-path fading and selects relay nodes according to the characteristics of WSN and full-rank requirements of channel matrix using cross-layer methods. During the slots following the collision, a set of nodes designated as relays will cooperate with source nodes and destination node to form virtual antenna array and retransmit the signals that they received during the collision slot. The proposed scheme can effectively limit retransmission times and achieve higher throughput than slotted ALOHA and other NDMA methods. Simulation results validate the proposed scheme.

Key words: wireless sensor networks; cross-layer; cooperative diversity; multi-packet reception; network-assisted diversity multiple access

1 引言

基于信号处理的多包接收技术打破了传统随机接入模型的束缚, 使网络节点具有同时接收多个用户数据包并对它们进行有效分离的功能, 而不是简单地将多个同时到来的数据包当作冲突全部丢弃, 从而大大提高网络吞吐量、减少数据包传送时延, 对实现新一代无线宽带通信系统具有重要意义^[1]. 网络辅助分集多址接入(NDMA)机制是一种利用网络资源进行冲突数据包的重传以获得分集特性的多包接收方法, K 个冲突用户在冲突后的 $(K-1)$ 个时隙里重传它们的数据包 $(K-1)$ 次^[2]. 然而, 衰落是无线信道固有特性, 若无线信道在某时隙处于深衰落状态, 这种衰落状态很可能会延续到后续的几个时隙内, 使得冲突后的多次重传失败, 大量时隙白白浪费, 造成吞吐量的极大损失. 为抵抗无线信道衰落特性的影响, 避免因重传造成的高阶冲突下的网络节点电池能量很快耗尽, Lin Rui 等提出引入协作分集^[3~5]思想的联合 NDMA 机制^[6,7], 为解决无线局域网衰落状态下的多包接收提供了新途径. 冲突发生后, 部分节点作为非再生中继代替冲突信源进行重传, 此时中继与源节点、目的节点之间形成虚拟多天线阵列, 实现了空间分集. 然而, 该

机制应用于能量受限的无线传感器网络^[8,9]依然存在不足. 首先, 与无线局域网中不同的是, 并非所有空闲节点(非源/目的节点)都能侦听到所有冲突信息(K 阶冲突), 空闲节点资源的充分利用和中继节点的选择成为关键; 其次, 数据包重传次数并未得到有效控制, 对能量有限的 WSN 来说, 过度的重传显然是不可取的.

针对 WSN 的特点和信道矩阵满秩性要求, 本文对协作 WSN 的中继选择准则进行了设计, 提出了一个新的跨层协作多包接收方法. 该机制在抗信道衰落的同时可有效限制数据包重传次数, 从而大大提高了多包接收的效率. 文中对新机制的性能仿真, 以及该机制与 NDMA、联合 NDMA 和时隙 ALOHA 之间的性能对比证实了新机制的有效性.

2 跨层协作多包接收机制(CL-CoopNDMA)

联合 NDMA 机制中, 冲突信息的重传由中继节点和源节点协作完成. $(K-1)$ 次重传之后, 接收端一共收到冲突包的 K 份信息, 传输形成的 $(K \times K)$ 信道矩阵 H_1 可估计, 此时接收端的多包分离是典型的信源分离问题, 可通过 Frobenius 范数最小化完成. 然而该方法复杂度随着冲突用户数的增加而指数增长, 为降低接收端多

包分离的复杂度,往往采用次最优的线性解法,此时信道矩阵的满秩性成为多包分离的关键.若信道矩阵满秩,则只需 K 个时隙就能分离出 K 个冲突用户,没有时隙被浪费,因而不会带来吞吐量损失;若信道矩阵非满秩,将导致冲突解决方法失效,在这种情况下可继续要求重传,直到获得满秩矩阵为止.对能量有限的 WSN 来说,过度的重传将造成能量上的极大浪费,因此必须尽可能限制重传次数,以提高吞吐量效率.由此可见,基于 NDMA 的协作多包接收是将信号处理与网络相结合来提高性能的方法^[10],本文将从跨层的角度将物理层的信号处理和 MAC 层的协作重传联合起来对 WSN 中的协作多包接收问题进行研究.

2.1 协作重传机制

假定 K 个包在时隙 n 发生冲突,一旦冲突被检测到,目的节点将发送控制比特给所有节点表示协作传输阶段(CTE)的开始,然后一直发送该比特直到 CTE 结束.每个空闲节点都保持一张冲突节点表,记录在该节点处发生冲突的源节点 ID 号,并通过控制信道把冲突节点表发送给目的节点. CTE 由 K 个时隙组成,在时隙 $(n+k)$, $1 \leq k \leq K$, 根据预定的中继选择准则,一个节点被选作中继,重传其在时隙 n 接收到的冲突信号.时隙 $(n+K)$ 一结束,广播信道就重置控制比特,中止当前的 CTE 以及所有相关的传输.

2.2 跨层协作中继选择策略

协作重传过程中,由于节点通信能力不同和系统资源限制(如电池能量),一些空闲节点不能或者不愿为某些源节点中继信息,因此并非所有空闲节点(非源/目的节点)都能侦听到所有 K 阶冲突信息.联合 NDMA 机制中,对侦听到 K 阶冲突($K < K$)的节点并未加以利用,而是将中继任务集中在侦听到 K 阶冲突的节点上,这将导致节点选择上的不公平性,使得部分节点承担过多中继任务而能量过早耗尽.另外,根据文献[6]中对空间分集阶数的分析可知,分集阶数随着非信源中继数量的增加而增加.因此,空闲节点的充分利用不仅有利于实现中继选择的公平性,也将有利于提高协作分集的效果.基于跨层的思想,将中继节点的选择与物理层的信号处理相结合.若传输形成的信道矩阵如 H_2, H_3 形式,则信道矩阵一定满秩.一方面,只需要进行 $(K-1)$ 次重传就能实现多包分离,没有时隙被浪费;另一方面,冲突阶数小于 K 的空闲节点也能得到充分利用,不必要求每个中继节点都侦听到阶冲突,这将消除中继节点选择上的严格限制.

$$H_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix},$$

$$H_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix}$$

具体策略如下,在冲突后的 K 个时隙里,试图找到 $(K-k+1)$ 阶冲突的空闲节点,其中 $1 \leq k \leq K$.

(1) $k=1$, 从 I_K 个 K 阶冲突的空闲节点中随机选择一个中继节点,令其重传它在时隙 n 收到的冲突包.若此类节点不存在,则使用目的节点在时隙 n 的接收信息作为重传信息.活动源节点集合表示为 $A(k) = \{i_1, \dots, i_K\}$, $AS(k) = A(k)$;

(2) $k=k+1$, 从 I_{K-1} 个 $(K-1)$ 阶冲突的空闲节点中随机选择一个中继节点,令其重传它在时隙 n 收到的冲突包.活动源节点集合必须满足 $A(k) \subset_{1 \leq m \leq k-1} AS(k-m)$, 且 $AS(k) = A(k)$; 否则,随机选择一个源节点重传它的包,活动源节点集合表示为 $A(k) = \{i_{s(k)}\}$ 和 $AS(k) = A(k) = S(n) - A(k)$, 其中 $s(k)$ 表示时隙 $(n+k)$ 选择的源节点,其中 $k \geq 2$, $A(k)$ 仍然必须满足 $A(k) \subset_{1 \leq m \leq k-1} AS(k-m)$. 以下步骤依此类推,直到 $k=K$.

3 系统模型

令节点 i 在冲突时隙 n 发送的数据包表示为 $x_i(n) = [x_{i,0}(n), \dots, x_{i,N-1}(n)]$, 目的节点接收信号和所有空闲节点侦听信号表示为

$$y_r(n) = \sum_{i \in S(n)} a_{ir}(n) x_i(n) + w_r(n) \quad r \in \{d\} \cup L(n), r \notin S(n) \quad (1)$$

其中 $S(n) = \{i_1, \dots, i_K\}$ 为冲突源节点集合; $L(n)$ 为空闲节点集合; $a_{ir}(n)$ 表示第 i 个源节点和第 r 个空闲节点间信道系数; $w_r(n)$ 表示相应的噪声.

时隙 $(n+k)$, 若某中继本身是源节点,则重传自己的信号;否则,重传时隙 n 的侦听信号.目的节点处接收信号表示为

$$Z_d(n+k) = \begin{cases} a_{rd}(n+k) c(n+k) y_r(n) + w_d(n+k), & r \in R(n) \cap S(n) \\ a_{rd}(n+k) x_r(n) + w_r(n+k), & r \in R(n), r \notin S(n) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $R(n) = \{r_1, \dots, r_K\}$ 为中继节点集合, $R(n) \subseteq L(n)$; $a_{rd}(n)$ 为第 r 个中继节点和目的节点间信道系数; $c(n+k)$ 为归一化系数; $w_d(n+k)$ 为噪声矢量.

令 $X = [x_{i_1}^T(n), x_{i_2}^T(n), \dots, x_{i_K}^T(n)]^T$ 表示源节点发送信号, $Z = [Z_d^T(n+1), \dots, Z_d^T(n+K)]^T$ 表示目的节点接收信号, H 表示源节点和目的节点间信道系数,则 $Z = HX + W$. 由于信道矩阵的满秩性,利用次优的线性解法进行冲突数据包的恢复,得 $X = H^{-1}Z$, 其中 H^{-1}

表示 H 的逆. 信道矩阵 H 通过活动用户检测获得, 表示为

$$H = \begin{bmatrix} a_{1,r(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{2,r(1)} & a_{r(2),d} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{3,r(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{4,r(1)} & 0 & \dots & a_{r(K),d} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{5,r(1)} & 0 & \dots & 0 & a_{5,r(K+1)} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{K-2,r(1)} & 0 & \dots & 0 & a_{K-2,r(K+1)} & \dots & a_{K-2,r(K-2)} & a_{K-2,r(K-1)} & a_{K,r(K)} \\ a_{K-1,r(1)} & 0 & \dots & 0 & a_{K-1,r(K+1)} & \dots & a_{K-1,r(K-2)} & a_{K-1,r(K-1)} & 0 \\ a_{K,r(1)} & 0 & \dots & 0 & a_{K,r(K+1)} & \dots & a_{K,r(K-2)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $r(k)$ 表示时隙 $(n+k)$ 选择的中继节点; $a_{i,r(k)}$ 表示时隙 $(n+k)$ 第 i 个源节点和第 $r(k)$ 个中继节点间的信道系数.

4 仿真结果和性能分析

本文使用 Matlab 仿真工具对 CL-CoopNDMA 机制进行了仿真, 并与 NDMA、联合 NDMA 以及单包接收模型下的时隙 ALOHA 机制进行了性能比较. 考虑一个有 $J=32$ 个网络节点的传感器网络, 数据包长为 $N=424$ 个比特, 空闲节点的多包接收能力各不相同. 定义业务负载为每时隙内到达网络的平均包数, 各源节点以概率 $1/J$ 发送数据包^[6].

系统的吞吐量性能指标定义为

$$\text{吞吐量} = \frac{\text{成功接收的数据包数}}{\text{重传次数}} \quad (4)$$

对于线性解法恢复的每个数据包, 都需进行校验, 统计误比特率(BER), 并要求数据包的 BER 不能高于 $Pe=0.02$, 否则认为包没有正确恢复, 丢包. 此外, 活动用户检测失败, 也视为丢包.

4.1 不同多包接收机制的性能比较

如图 1 所示, CL-CoopNDMA 的吞吐量性能远远优于 NDMA 和联合 NDMA 机制. 这是因为 WSN 中空闲节点的多包接收能力各异, 联合 NDMA 机制中中继节点选

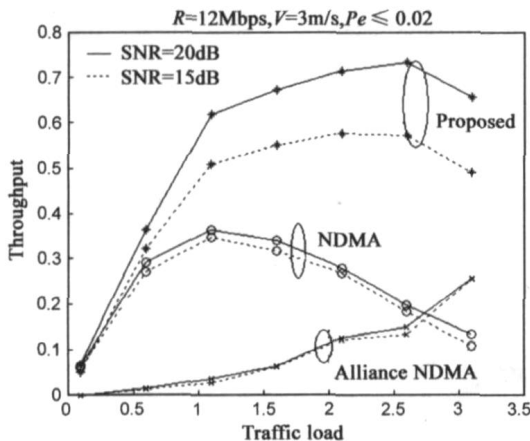


图 1 吞吐量 vs. 业务负载

择的随机性在 WSN 中成为劣势, 往往导致其选择不中继节点, 信源和空闲节点的协作受阻, 重传时间增加; NDMA 中, 尽管信源与空闲节点之间没有协作, 但是 K 个冲突源节点自己承担中继的角色, 所以重传成功的机率大于联合 NDMA; CL-CoopNDMA 则充分利用了所有潜在的非信源中继以实现有效的合作, 更多非信源中继的引入获得了更大的分集阶数, 因而性能最优.

4.2 CL-CoopNDMA 与时隙 ALOHA(单包接收)的比较

基于单包接收的时隙 ALOHA 一个时隙次只允许一个数据包接入, 对于多个同时到来的数据包当作冲突全部丢弃, 冲突发生后, 所有数据包必须重传. 然而重传过程中, 冲突依然是不可避免的. 这种完全随机的接入方式, 将有大量数据包因冲突而丢弃, 造成吞吐量的极大损失. 因而, 其性能劣于 CL-CoopNDMA 方式. 信噪比的变化对时隙 ALOHA 机制中冲突引起的丢包影响不大, 因而其吞吐量增益不明显. 在 CL-CoopNDMA 中, 信道质量的改善, 大大提高活动用户检测的正确率, 进而提高信道矩阵估计的精度, 因而吞吐量增益明显.

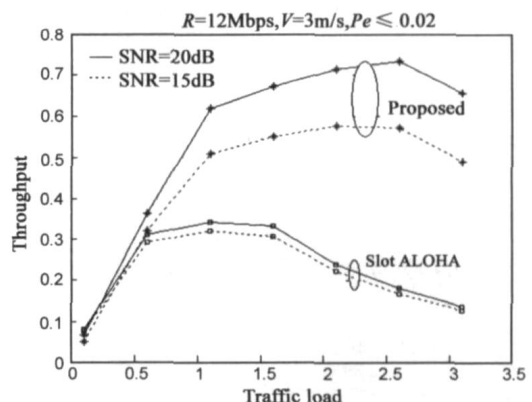


图 2 吞吐量 vs. 业务负载

4.3 吞吐量 vs. 业务负载和信噪比

$R=12\text{Mbps}$, $V=3\text{m/s}$ 时的吞吐量、业务负载、信噪比之间的关系如图 3 所示. 随着信噪比的增加, 吞吐量相应的呈增长趋势.

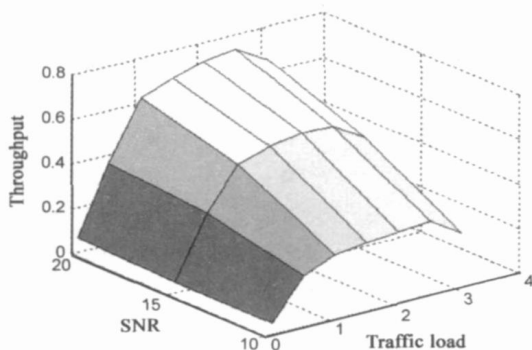


图3 吞吐量 vs. 业务负载和 SNR

4.4 吞吐量 vs. 业务负载和传输速率

当数据速率降到 256kbps,信道成为快变信道^[5].从图4看出,CL-CoopNDMA 机制与 NDMA 之间吞吐量性能差距大大减小.

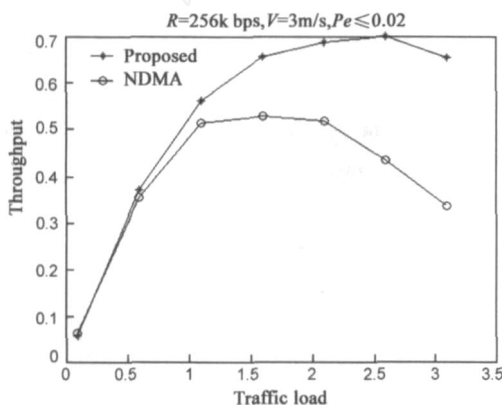


图4 吞吐量 vs. 业务负载

其他性能如下所示:

(1) 中继节点选择引入的控制/调度开销:由于中继节点的选择和利用,使得联合 NDMA 机制和 CL-CoopNDMA 机制都存在附加的控制/调度开销的问题. CL-CoopNDMA 机制由于针对物理层的信号处理需要进行中继节点选择策略的设计,相对联合 NDMA 机制略显复杂,但复杂度增加不大,却能有效控制重传次数,大大提高系统性能.这种复杂度与性能的折中是值得的.

(2) 中继节点处的保持冲突列表的开销:CL-CoopNDMA 机制为了获得冲突列表,每个中继节点需要获得接收信号的 ID 号,可通过活动用户检测^[5]实现,中继处并不执行其他信号处理任务,仍是非再生中继.

5 结论

本文提出的跨层协作多包接收方法适用于空闲节点多包接收能力各不相同的 WSN.该方法根据物理层信号处理要求进行中继节点的选择,这种基于跨层的考虑可有效控制重传次数,且充分利用了空闲节点资源,加强了节点间协作.协作分集是解决多径衰落的有效途径,如何解决协作通信中的能量有效性问题,增强

物理层、MAC 层、网络层之间的协作,是我们进一步的研究方向.

致谢 感谢文献[6]的作者 Rui Lin 提供的源程序上的帮助.

参考文献:

- [1] Tong Lang, Zhao Qing. Multipacket reception in random access wireless networks: From signal processing to optimal medium access control [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39 (11): 108 - 122.
- [2] Tsatsanis M. Network-assisted diversity for random access wireless networks [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2000, 48(3): 702 - 711.
- [3] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50 (12): 3062 - 3080.
- [4] Stankovic V, Host-Madsen A, Xiong Zixiang. Cooperative diversity for wireless ad hoc networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(5): 37 - 49.
- [5] Lin Z, Erkip E, Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems [J]. IEEE Transactions on communications, 2006, 54(7): 1323 - 1334.
- [6] Lin Rui, Petropulu A P. A new wireless network medium access protocol based on cooperation [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2005, 53(12): 4675 - 4684.
- [7] Lin Rui, Petropulu A P. Cooperative transmission for random access wireless networks [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '05) [C]. Philadelphia, USA, 2005. 3: 373 - 376.
- [8] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393 - 422.
- [9] Cui Shuguang, 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(6): 1089 - 1098.
- [10] Dimic G, Sidiropoulos N D, Zhang Ruifeng. Medium access control-physical cross-layer design [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(5): 40 - 50.

作者简介:



季 薇 女, 1979 年 12 月生于江苏省淮安市, 博士研究生, 主要从事无线网络中的协作分集与协作通信等方面的研究.

E-mail: jiwei_1979@sju.edu.cn