

无线传感器网络中混合 ARQ 性能分析

王海林¹ 张宝贤^{1,2} 黄河清¹ 道远¹

(1 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对无线传感器网络中无线链路质量差异性和动态变化的问题和资源受限的特点,在无线传感器网络中使用交替重传的混合自动请求重传(hybrid ARQ, HARQ)方案实现自适应差错控制.该方案发送端使用1/2码率的纠错码来对数据编码,将码字的信息位和校验位分成2个数据包并交替传输,接收端由单个正确接收的数据包或者合并2个出错的数据包译码恢复原始数据.结合IEEE 802.15.4标准规范和主流传感器节点平台参数,对ARQ协议和交替重传HARQ方案的能量效率、平均传输次数和传输成功率进行理论分析和仿真比较.结果表明,交替重传HARQ方案的性能明显优于ARQ技术.

关键词: 无线传感器网络; 差错控制; 自动请求重传; 混合自动请求重传; 自适应; 能量效率

中图分类号: TN92; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-4512(2010)08-0013-04

Analyzing the performance of hybrid ARQ in wireless sensor networks

Wang Hailin¹ Zhang Baoxian^{1,2} Huang Heqing¹ Dao Yuan¹

(1 Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences,

Shanghai 200050, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An alternate retransmission based hybrid automatic repeat request (HARQ) scheme was proposed to enable adaptive error control in wireless sensor networks (WSNs). In this scheme, a transmitter can encode each data with a half rate error correction code and separate the data and the parities into two packets and then transmit them alternately. The original data from any correctly received packet alone or by decoding a combination of two corrupt versions of a packet were recovered by the receiver. Based on IEEE 802.15.4 standards and popular sensor node platforms, the performance of ARQ and the HARQ scheme was analyzed in terms of energy efficiency, average transmission times, and packet delivery ratio. Simulation results show that the HARQ scheme outperforms ARQ significantly.

Key words: wireless sensor networks; error correction control; ARQ (automatic repeat request); HARQ; adaptive; energy efficiency

文献[1]针对无线传感器网络(WSNs)能量受限的特点,给出了WSNs中能量效率的定义,并分析了ARQ和若干前向纠错码的能量效率,指出当误码率较高时,由于ARQ技术不能纠错,能量效率迅速下降到零.文献[2]分析和比较了硬件编解码情况下BCH码、RS码和卷积码的能量效率,指出译码复杂度较低的二进制BCH码能

量效率最高.混合ARQ技术综合了ARQ和FEC的优点,对于不能纠正的误码通过重传保证传输可靠性.混合ARQ分成I型、II型和III型3类^[3],II型^[4]和III型^[5]中,传输出错的数据包被缓存起来,并与之后重传的多个数据包合并得到码率较低的码字,纠正误码并减少重传,因此比I型的效率更高.本文针对WSN资源受限的特点提

收稿日期: 2010-01-08.

作者简介: 王海林(1982-),男,博士研究生, E-mail: hlwang2001@163.com.

基金项目: 国家重大科技专项基金资助项目(2009ZX03006-001-02, 2009ZX03006-006); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-14-4-1); 国家自然科学基金资助项目(60970137).

出在 WSN 中使用交替重传的 II 型混合 ARQ 自适应差错控制方案(HARQ).

1 系统模型和性能指标

考虑到无线传感器网络的特点,本文以能量效率、平均传输次数、传输成功率 3 个指标衡量系统的性能.

a. 能量效率 η : 能量效率定义为^[1]

$$\eta = \eta_e p_r = (E_{\text{eff}}/E_{\text{tot}})(1 - p_e), \quad (1)$$

式中: η_e 表示数据包中传输有效负载的能耗 E_{eff} 与传输整个数据包的能耗 E_{tot} 的比值; p_r 是数据包正确接收的概率; p_e 是误帧率. 能量效率综合反映了传输过程中能量消耗和数据可靠性.

b. 平均传输次数 $\bar{\epsilon}$: 它是指在一定的误码率下每个数据包被正确接收平均需要传输的次数. 它与 p_e 的关系为 $\bar{\epsilon} = 1/(1 - p_e)$, 用以反映系统的吞吐量和数据传输的平均时延. 设传输一次的时间为 T , 则平均传输时延为 $\bar{\epsilon}T$.

c. 传输成功率 p_d : 实际应用中数据允许重传的次数有限, 数据包重传次数超过允许的最大重传次数时将被丢弃. 传输成功率表示数据包在允许的最大重传次数内被成功接收的概率, 反映了数据传输的可靠性.

本文基于 IEEE802.15.4^[6] 标准和符合该标准的 MICAz 节点进行分析和仿真. IEEE802.15.4 标准定义了如图 1 所示的 MAC 层帧结构, 其中 FCS 用于数据包 CRC 差错校验, 对数据包检错. 负载为用户数据, 其余均为开销.

帧头 (MHR)	负载 (payload)	校验位 (FCS)
----------	--------------	-----------

图 1 IEEE802.15.4 帧结构

设帧头的长度为 μ , 校验位的长度为 δ , 数据的长度为 l_{payload} , 整个 MAC 帧的长度为 l_{DATA} , 则有 $l_{\text{DATA}} = \mu + \epsilon + l_{\text{payload}}$.

2 ARQ 性能分析

无线传感器网络中数据通过多跳汇聚到 sink 节点, 端到端往返时延大, 适合逐跳传输控制. 此外无线链路误码率较高, 数据传输需要逐跳反馈确认, 适合应用 DATA-ACK 模式的停等待 ARQ 协议. 其过程为: 发送端发送数据后等待 ACK, 若接收到 ACK 则发送下一个数据, 若等待超时则进行重传^[7].

ARQ 中 ACK 数据包很短, 忽略其带来的开

销, 则传输一个数据包收发节点所消耗的能量为 $E^{\text{ARQ}} = E^{\text{TX}} + E^{\text{RX}} = (I_{\text{TX}} + I_{\text{RX}})V_{\text{radio}}l_{\text{DATA}}/R$, 式中: E^{TX} 和 E^{RX} 分别为发送节点和接收节点的能量; V_{radio} , I_{TX} 和 I_{RX} 分别为 CC2420 芯片的电压、发送电流和接收电流; R 为传输速率. 设 BSC 中信道误码率为 p_b , 且各个比特误码独立同分布. 因 ACK 数据包很短, 故可假定反馈信道无误码, 则每个数据包传输出错的概率为 $p_{\text{ARQ}} = 1 - (1 - p_b)^{l_{\text{DATA}}}$. 数据帧出错后进行重传, 设经过 k 次传输后被正确接收, 其概率为 $p_k = p_{\text{ARQ}}^{(k-1)}(1 - p_{\text{ARQ}})$, 则正确传输一个数据包平均传输次数为

$$\bar{\epsilon}^{\text{ARQ}} = \sum_{k=1}^{\infty} k/(1 - p_{\text{ARQ}}),$$

于是 ARQ 协议的误码率为 $p_e = 1 - 1/\bar{\epsilon} = p_{\text{ARQ}}$.

按照式(1)计算 ARQ 的能量效率为

$$\eta^{\text{ARQ}} = E_{\text{eff}}^{\text{ARQ}}(1 - p_e)/E^{\text{ARQ}} = (l_{\text{payload}}/l_{\text{DATA}})(1 - p_b)^{l_{\text{DATA}}}.$$

实际应用中, 设最大重传次数为 N , 数据包重传 N 次后若不成功则被丢弃. 则数据包经过 k 次传输 ARQ 的传输成功率为

$$p_d^{\text{ARQ}} = \sum_{k=1}^{N-1} p_{\text{ARQ}}^{(k-1)}(1 - p_{\text{ARQ}}) = 1 - p_{\text{ARQ}}^{(N+1)}.$$

3 交替重传混合 ARQ 方案

3.1 交替重传混合 ARQ 原理

交替重传混合 ARQ 是 II 型 HARQ 的一种^[8], II 型混合 ARQ 协议将多个出错重传的数据包缓存起来, 并合并成低码率的纠错码字, 从而纠正误码, 减少重传次数, 提高能量效率. 它采用 2 个分组码实现纠错和检错功能: 一个是高码率的码 C0, 只具有检错功能; 另一个是 1/2 码率的纠错码 C1, 具有检错和纠错功能. 分组码表示为 (n, k, d) , n, k, d 分别为码字长度、信息位长度和码字的汉明距离. 交替重传 HARQ 中 C0 为 (n, k) , C1 为 $(2k, k)$, 且 C1 属于一类特殊的系统可逆码, 即 C1 的生成矩阵 $G = (I|P)$ 中, I 是 $k \times k$ 单位矩阵, P 是 $k \times k$ 可逆矩阵. 原始数据 m 经过编码后的码字为 C , $C = mG = (m|mP)$. 令 $D = m$ 表示信息位, $Q = mP$ 表示校验位. 接收端有 3 种方法恢复原始数据: a. 接收到正确的信息位 D ; b. $m = QP^{-1}$, 可以由正确接收的校验位 Q 计算出 m ; c. 由 D 和 Q 合并成码字 C 译码得到 m .

基于以上特点, 交替重传 HARQ 中发送端使用 1/2 码率的纠错码对数据编码, 并将信息位和校验位分成 2 个数据包交替传输, 接收端可以

根据任意单个正确接收的数据包或者两个出错的数据包纠错译码恢复原始数据. 在链路质量较好的情况下可正确传输信息位, 无需传输校验位, 具有与 ARQ 相同的效率, 而当传输出错时重传校验位, 接收端将它与出错的信息位合并进行纠错, 从而减少重传次数, 性能优于 ARQ. 而且具有高效率.

3.2 交替重传 ARQ 性能分析

本文使用射频芯片提供的 CRC 校验功能检测数据包是否出错, 作为 C0 码. 对于纠错码 C1, Krishna 和 Morgera 提出了一种满足交替重传特性的线性分组码 KM 码^[9], 为了节省存储空间, 本文使用二阶码(8, 4, 4)码^[10]作为 C1 码, 码长为 8 bit, 信息位和校验位均为 4 bit, 汉明距离为 4, 可以纠正单个误码. 编码表和译码表的大小分别为 16 byte 和 256 byte. 查表的方式编码和译码速度快, 处理简单, 可以忽略其能耗. 由于忽略编码和译码的能耗, 传输一个数据包所消耗的能量与 ARQ 相同, 表示为

$$E^{\text{HARQ}} = E^{\text{TX}} + E^{\text{RX}} = (I_{\text{TX}} + I_{\text{RX}})V_{\text{radio}}l_{\text{DATA}}/R.$$

设信道误码率为 p_b , 误码服从独立同分布, 则单个数据包传输出错的概率为 $p = 1 - (1 - P_b)^{l_{\text{DATA}}}$. 由于 C1 码可以纠正 1 bit 的误码, 信息位和校验位合并后只要每个码字中误码数不超过 1 bit 即可正确译码. 若两个长度均为 l_{DATA} 的数据包合并得到 $l_{\text{DATA}}/4$ 个码字, 则译码后所有码字均正确的概率为 $p_1 = [(1 - p_b)^8 + 8p_b(1 - p_b)^7]^{l_{\text{DATA}}/4}$. 而若 2 个均出错的数据包合并进行译码, 则正确译码的概率 p_2 为 p_1 减去输入的两个数据包均正确的概率, 以及一个数据包正确另一个在纠错能力内的概率 p_3 , 即 $p_2 = p_1 - (1 - p_b)^{2l_{\text{DATA}}} - 2(1 - p_b)^{l_{\text{DATA}}}p_b^{l_{\text{DATA}}/4}$; $p_3 = (1 - p_b)^4 + 4p_b(1 - p_b)^3$.

交替重传 HARQ 中, 数据包首次传输只能检错, 若出错则重传, 从第二个数据包开始可以将 2 个数据包合并进行纠错. 首次传输出错的概率为 p , 出错重传后有 2 种可能实现正确接收, 即正确重传或者重传出错后合并译码正确, 因此重传仍然出错的条件概率为 $q = 1 - [(1 - p) + p \times p_2]$. 设每次传输相互独立, 则重传继续出错的条件概率与第二次相同, 均为 q . 因此数据包一次传输成功的概率为 $(1 - p)$, $k(k \geq 2)$ 次传输成功的概率为 $pq^{(k-2)}(1 - q)$. 于是每个数据包成功传输平均需要的传输次数为 $\bar{\epsilon}^{\text{HARQ}} = 1 + p/(1 - q)$, 而由误码率与平均重传次数的关系可得 $p_e = 1 - 1/\bar{\epsilon} = p/(1 - q + p)$. 交替重传 HARQ 的能量效率

为 $\eta^{\text{HARQ}} = l_{\text{payload}}(1 - q)/[l_{\text{DATA}}(1 - q + p)]$. 设允许的最大重传次数为 N , 则传输成功率为 $p_a^{\text{HARQ}} = 1 - pq^N$.

4 仿真结果

仿真参数为^[6, 11]: V_{radio} 为 3 V, CC2420 发射状态电流 I_{TX} 和接收状态电流 I_{RX} 分别为 17.4 mA 和 18.8 mA, 传输速率 R 为 250 Kbit/s, 帧头长度 μ 为 88 bit, 校验位长度为 16 bit.

图 2 给出了 ARQ 和 HARQ 在各种误码率条件下能量效率与负载长度的关系. 由图 2 可知,

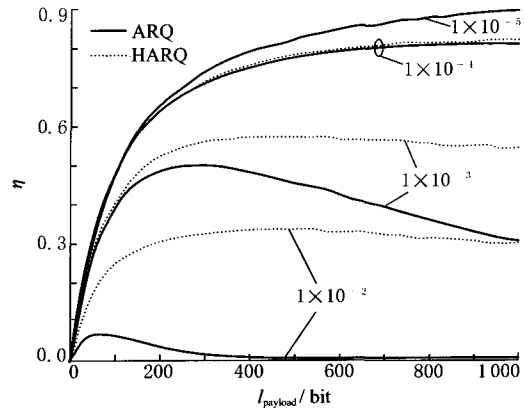


图 2 能量效率与误码率和负载长度的关系

能量效率随着负载长度的增加先增大后减小, 在误码率给定的情况下存在最优的负载长度. 这是因为数据包中帧头的长度为固定值, 当负载长度增大时负载在数据包中的比重迅速增大, 从而提高了能量效率, 但是数据包出错的概率也随着增大, 出错重传使得能量效率开始下降. 此外, 在各种误码率下 HARQ 的能量效率优于 ARQ 协议, 而且误码率越高 HARQ 优势越明显. 这是因为误码率增加时, 交替重传能够纠正误码减少重传, 而 ARQ 无效重传, 能量效率迅速下降.

图 3 是负载长度为 800 bit 时 ARQ 和 HARQ 能量效率随误码率的变化. 由图 3 可知误码率增加时能量效率单调下降, 当误码率低于 10^{-4} 时, 数据包传输基本不出错, ARQ 与 HARQ 的能量效率相差极小; 当误码率继续增加时, ARQ 的能量效率迅速下降为零, 而 HARQ 可纠正部分误码, 其能量效率明显高于 ARQ.

图 4 比较了 ARQ 和 HARQ 成功传输一个数据包的平均传输次数随误码率的变化. 由图 4 可知, 平均传输次数随着误码率的增加而单调递增, 而 HARQ 的平均传输次数远小于 ARQ 的.

图 5 比较了 ARQ 与 HARQ 的传输成功率.

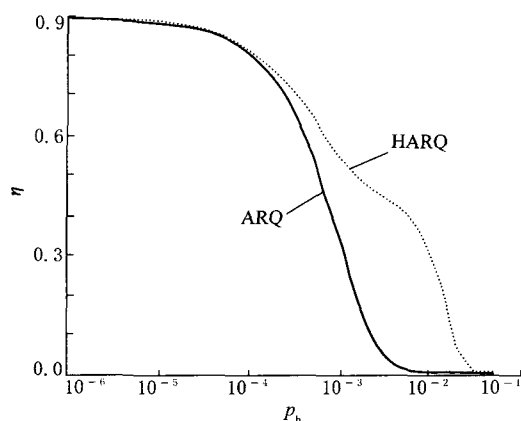


图 3 能量效率比较

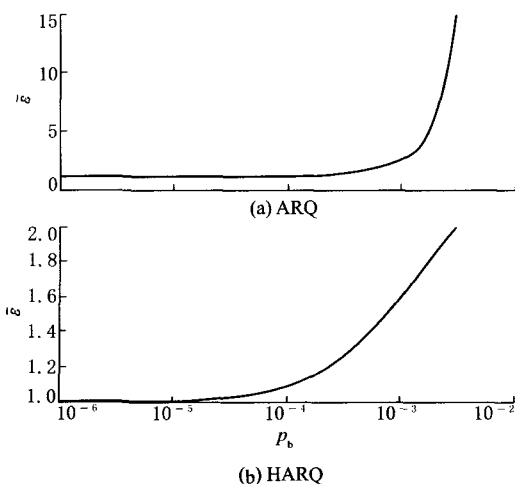


图 4 平均传输次数比较

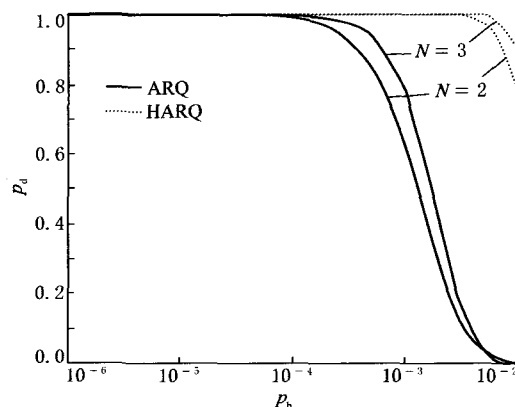


图 5 传输成功率比较

由图 5 可知 HARQ 比 ARQ 能够应用到更高的误码率,若要求 99% 的传输成功率,则 ARQ 要求误码低于 10^{-4} ,而 HARQ 允许的最高误码率接近 10^{-2} .无线传感器网络中发射功率低,若要求误码率低于 10^{-4} ,则节点的传输半径非常短,使得汇聚到 sink 的跳数增多.实际上,由于多径衰落和障碍物阻挡,误码率在 10^{-4} 和 10^{-3} 区间的链路比较多,该区间内 ARQ 的能量效率和传输成

功率难以满足应用要求,因此需要切换到更好的链路转发数据,导致路由和拓扑频繁改变.而 HARQ 协议在该区间能保持很好的性能,无需切换路由,能够保持路由和拓扑稳定,减少了网络维护的开销.

参 考 文 献

- [1] Sankarasubramaniam Y, Akyildiz I F, McLaughlin S W. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks[C]// Proc of the IEEE Sensor Network Protocols and Applications (SNPA). Alaska: IEEE, 2003: 1-8
- [2] Balakrishnan G, Yang M, Jiang Y, et al. Performance analysis of error control codes for wireless sensor networks[C]// Proc of the 4th International Conference on Information Technology (ITNG'07). Las Vegas: IEEE, 2007: 876-879.
- [3] 李 凡. 无线通信中的混合 ARQ 技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学电子信息系, 2006: 19-25.
- [4] Dubois-Ferriere D, Estrin D, Vetterli M. Packet combining in sensor networks[C]// Proc of the ACM Sensys 2005. San Diego: ACM, 2005: 102-115.
- [5] 田 真,袁东风,梁泉泉. 无线传感器网络差错控制技术的能效分析[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 77-83.
- [6] IEEE Standard 802. 15. 4-2003. Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs)[S]. Piscataway: IEEE, 2003.
- [7] Lin S, Costello D J, Miller M J. Automatic-repeat-request error-control schemes[J]. IEEE Communications Magazine, 1984, 22(12): 5-17.
- [8] Lin S, Yu P S. A hybrid ARQ scheme with parity retransmission for error control of satellite channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(7): 1 701-1 719.
- [9] Krishna H, Morgera S D. A new error control scheme for hybrid ARQ systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(10): 981-990.
- [10] Alfaro D L, Meo A R. Codes for second and third order GH-ARQ schemes[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(234): 899-910.
- [11] Lin S, Costello D J. 差错控制编码[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [12] Schmidt D, Kramer M, Kuhn T, et al. Energy modeling in sensor networks[J]. Advances in Radio Science, 2007, 5: 347-351.