

无线传感器网络中协作 ARQ 协议 能量效率分析及优化

王绍青 聂景楠

(解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007)

摘要: 文章研究了无线传感器网络中协作自动请求重传 (Cooperative Automatic Repeat Request, CARQ) 协议的能量效率及其优化问题。定义协议的能量效率为单位能耗所支持的分组成功传输的个数, 导出了 CARQ 协议和传统 ARQ 协议的能量效率表达式以及 CARQ 协议相对 ARQ 协议的能效增益表达式, 依此对两协议的能量效率进行了仿真研究, 发现协作节点的位置对协议的能量效率有重要影响, 当通信距离大于“门限距离”时, CARQ 协议的能量效率才高于传统 ARQ 协议能效; 进而提出了一种离散优化算法, 通过优化调制水平, 大大提高了 CARQ 协议的能效及能效增益。

关键词: 无线传感器网络; 协作分集; 自动请求重传; 能量效率

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)04-0637-04

The Optimum of Energy Efficiency of Cooperative ARQ Protocol in Wireless Sensor Networks

WANG Shao-qing NIE Jing-nan

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The issue of optimizing energy efficiency of cooperative Automatic Repeat Request protocol (CARQ) in wireless sensor networks is studied in this paper. Energy efficiency of CARQ protocol is defined as the number of data packets received successfully at the destination node per the unit of energy cost. The expressions of energy efficiency of CARQ and traditional ARQ protocol are deduced respectively and the energy efficiency gain of CARQ protocol compared with ARQ protocol is also derived in which the energy efficiency of them are compared with each other. Simulation results show that the position of the relay node has an important effect on the energy efficiency of the CARQ protocol and the CARQ protocol provides better energy efficiency than ARQ protocol when the communication distance is bigger than the threshold of the distance. At last, a discrete optimization algorithm optimizing the modulation level is proposed, by which energy efficiency and its gain of CARQ protocol can be enhanced greatly.

Key words: wireless sensor networks; cooperative diversity; ARQ; energy efficiency

1 引言

无线传感器网络 (WSN) 中, 节点靠电池供电, 提高其能量使用效率是 WSN 协议设计的重要指标。在多径衰落信道下, 为了改善 WSN 的数据传输可靠性, 通常需要提高信号的接收信噪比, 进而增加了能量消耗。文献[1-4]将协作分集技术^[5]与链路层自动请求重传 (ARQ) 协议相结合, 提出了协作 ARQ (CARQ) 协议。其要点在于, 当目的节点未能正确接收源节点的数据包而协作节点能够正确接收时, 将由协作节点重传数据包。文献[6-10]研究了 WSN 中 CARQ 协议的吞吐

量和时延性能以及协议性能优化问题, 改善了协议的吞吐量。已有的研究表明, CARQ 协议利用了协作分集技术, 实现了独立路径上的重传, 其克服衰落的能力和吞吐量均高于传统 ARQ 协议。

本文在前人工作的基础上, 研究了 CARQ 协议的能量效率及其优化问题。定义协议能效为单位能耗所支持的分组成功传输的个数, 导出了 CARQ 和传统 ARQ 协议能效的表达式, 依此对两协议的能效进行了仿真研究, 揭示了协作节点位置、通信距离、调制方式对系统能效的影响, 解决了何时采用 CARQ 协议才能提高系统能效这一关键问题; 在此基础上, 以提高

CARQ 协议能效为目标,提出了调制水平离散优化算法,导出并比较了采用优化的 CARQ 与 ARQ 协议能效的最大值。

2 协议模型

2.1 协作 ARQ 协议

如图 1 所示,考虑一个由源节点 s 、目的节点 d 和中继节点 r 组成的三节点系统;每节点只配备一个天线。CARQ 协议的工作过程如下:来自上层协议栈的分组在节点的发送缓存中排队,节点 s 按照先入先出的规则和时隙方式发送数据分组至目的节点 d 。由于无线信道的广播本质,节点 d 和中继节点 r 均可接收 s 发送的分组。假设接收节点可以通过完美的 CRC 校验判断分组接收的正确性,若节点 d 收分组正确,则广播 ACK 报文(设 ACK 报文的传输无错无时延);节点 r 收到 ACK 报文后,认为 s - d 间分组传输成功,不进行分组转发,节点 s 收到 ACK 报文后,发送新的分组。若节点 d 接收分组错误,则广播 NACK 报文(设 NACK 报文的传输无错无时延),一方面,若节点 r 在时隙 1 正确接收节点 s 发送的分组,则在收到 NACK 报文后,在时隙 2 重传数据分组至节点 d ,直到节点 d 成功接收分组或达到最大重传次数为止,如果经过 N_{max} 次重传,节点 d 仍未正确接收,做丢包处理;另一方面,若节点 r 在时隙 1 未能正确接收节点 s 发送的分组,则告知源节点 s 做丢包处理。对于传统 ARQ 协议,重传仅由源节点 s 进行,若经过 N_{max} 次重传,节点 d 仍未正确接收,做丢包处理。为了确保数据包传输时延,本文取最大重传次数为 $N_{max} = 1$ 。

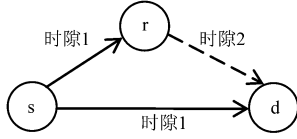


图1 协作 ARQ 协议示意图

2.2 信道模型与误分组率

假设源节点 s 和中继节点 r 采用相同的发送功率 P_t , s - r 、 s - d 、 r - d 信道服从平坦瑞利慢衰落且互相独立,在两个时隙内信道衰落保持不变,即数据包两次传输的时间小于信道的相干时间;那么,各链路的接收信噪比服从负指数分布,其概率密度函数可表示为:

$$f_{\gamma_{ij}}(\gamma) = \frac{1}{\sigma_{ij}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\sigma_{ij}}\right) \quad (1)$$

其中, i 表示发送节点 s 或 r , j 表示接收节点 r 或 d , σ_{ij} 为链路的平均信噪比。

令 r_{sd}, r_{sr}, r_{rd} 表示链路距离,则有: $\sigma_{sd} = P_t (r_{sd})^{-\alpha} / N_0$, $\sigma_{sr} = P_t (r_{sr})^{-\alpha} / N_0$, $\sigma_{rd} = P_t (r_{rd})^{-\alpha} / N_0$ 。这里, α 为路径损耗指数, N_0 为高斯白噪声的平均功率。

若节点采用理想奈奎斯特脉冲和 M-QAM 调制方

式,则调制水平 $b = \log_2 M$, 那么,各链路在瑞利衰落信道下的误符号率可表示为[11]:

$$PSR_{ij} \approx 2(1 - 2^{-b/2}) \left(1 - \sqrt{\frac{3\sigma_{ij}}{2(2^b - 1) + 3\sigma_{ij}}} \right) \quad (b \geq 2) \quad (2)$$

因此, s - d 链路的误分组率可表示为:

$$PER_{sd} = 1 - (1 - PSR_{sd})^{L/b} \quad (3)$$

其中, L 为分组长度。

在传统 ARQ 协议中,两次传输均失败则会导致丢包,那么传统 ARQ 协议的平均误分组率为:

$$PER_{ARQ} = PER_{sd} PER_{sr} \quad (4)$$

同理, s - r 、 r - d 链路的平均误分组率可分别表示为:

$$PER_{sr} = 1 - (1 - PSR_{sr})^{L/b} \quad (5)$$

$$PER_{rd} = 1 - (1 - PSR_{rd})^{L/b} \quad (6)$$

那么, CARQ 协议的平均误分组率可表示为:

$$PER_{CARQ} = PER_{sd} PER_{sr} + PER_{sd} (1 - PER_{sr}) PER_{rd} \quad (7)$$

其中,等式右边第 1 项表示数据包在 s - d 、 s - r 链路上均传输失败的概率,第 2 项表示数据包在 s - d 链路上传输失败,在 s - r 链路上传输成功但由中继节点重传失败的概率。

3 能效分析

系统能耗由节点的功放能耗和电路能耗两部分组成。考虑功放损耗因子为 β ,发射节点电路功率开销为 P_{ct} ,接收节点电路功率开销为 P_{cr} ,那么,传统 ARQ 协议中传输一个分组的平均能耗为:

$$E_{ARQ} = (1 - PER_{sd}) \times (P_t(1 + \beta) + P_{ct} + P_{cr}) L/R_b + PER_{sd} \times 2(P_t(1 + \beta) + P_{ct} + P_{cr}) L/R_b \quad (8)$$

其中,等号右边第 1 项表示数据包第一次传输成功条件下的能耗,第 2 项表示数据包第一次传输失败条件下的能耗, $R_b = R_s \times b$ 为比特发送速率, R_s 为符号速率。

定义单位能耗所支持的成功传输的分组个数为系统能量效率,那么,传统 ARQ 协议的能效为:

$$\eta_{ARQ} = \frac{1 - PER_{ARQ}}{E_{ARQ}} \quad (9)$$

将式(4)和式(8)代入式(9),有:

$$\eta_{ARQ} = \frac{(1 - PER_{sd} PER_{sr}) R_b}{(1 + PER_{sd}) (P_t(1 + \beta) + P_{ct} + P_{cr}) L} \quad (10)$$

同理, CARQ 协议的平均能耗为:

$$E_{CARQ} = (1 - PER_{sd}) (P_t(1 + \beta) + P_{ct} + 2P_{cr}) L/R_b + PER_{sd} PER_{sr} (P_t(1 + \beta) + P_{ct} + 2P_{cr}) L/R_b + PER_{sd} (1 - PER_{sr}) (2P_t(1 + \beta) + 2P_{ct} + 3P_{cr}) L/R_b \quad (11)$$

其中,等号右边第一项表示在 s - d 链路上数据包传输成功条件下的能耗,第二项表示在 s - d 和 s - r 链路上数据

包均传输失败条件下的能耗,第三项表示在s-d链路上数据包传输失败,但在s-r链路上传输成功条件下的能耗。结合式(7)和式(11),可得CARQ协议的能效为:

$$\eta_{CARQ} = \frac{1 - PER_{CARQ}}{E_{CARQ}} \quad (12)$$

综合式(10)和(12),CARQ协议相对于ARQ协议的能效增益可表示为:

$$G = \frac{\eta_{CARQ}}{\eta_{ARQ}} \quad (13)$$

若上式中 $G > 1$,则表明CARQ协议的能效优于ARQ协议的能效。

4 仿真结果与讨论

依据第3节的理论推导,本节通过仿真,研究CARQ协议的能效在何种情况下优于ARQ协议的能效,并讨论主要参数对能效增益的影响。不妨设节点s、r、d位于一条直线上,定义中继节点r至d的距离 $r_{rd} = q \times r_{sd}$ ($0 < q < 1$)。除特别说明外,主要参数取值如下: $\alpha = 4, \beta = 0.3, L = 2048 [\text{bit}], R_s = 10 \text{k}, P_t = 0.001 [\text{w}], P_{ct} = 10^{-4} [\text{w}], P_{cr} = 5 \times 10^{-5} [\text{w}], N_0 = 10^{-13.5}, b = 2$ 。

4.1 通信距离和中继节点位置对能效的影响

图2比较了通信距离(即源节点至目的节点距离 r_{sd})和中继节点位置对能效的影响。当 r_{sd} 大于43米时,CARQ协议的能效高于ARQ协议能效;反之,CARQ协议能效低于ARQ协议能效。我们称此距离为“门限距离 r_{th} ”。这是由于当 r_{sd} 较小时,平均接收信噪比较大,ARQ协议的 PER_{ARQ} 较小,此时,CARQ协议降低系统误分组率的能力有限,而其能耗却高于ARQ协议能耗,因而,ARQ协议的能效高于CARQ协议的能效;当 r_{sd} 增大时, PER_{ARQ} 随之增大,ARQ协议能效迅速变小,而CARQ协议的误分组率可以保持较低水平,其能效自然高于ARQ协议的能效。此外,当中继节点位于s-d中央时($q = 0.5$),CARQ协议能效最高。此结论对中继节点的选择具有一定的指导意义。

图3比较了中继节点位置对能效增益的影响。显然, $q = 0.5$ 时,CARQ协议的能效增益最大;因为此时, PER_{sr} 和 PER_{rd} 均可保持较低水平。而当中继节点距离源节点($q = 0.8$)或目的节点($q = 0.3$)较近时,会导致 PER_{rd} 或 PER_{sr} 较高,此时,CARQ协议的误分组率 PER_{CARQ} 高于 $q = 0.5$ 时的 PER_{CARQ} ,因而能效增益低于 $q = 0.5$ 时的能效增益。

4.2 调制水平离散优化算法

给定通信距离和中继节点位置,图4比较了调制水平对两协议能效的影响。显然,对于CARQ和ARQ

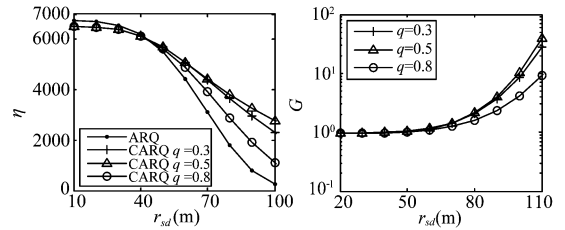


图2 通信距离和中继节点位置对能效的影响

图3 中继节点位置对能效增益的影响

协议,存在不同的优化的调制水平可以使能效最大化。从两协议能效的表达式并无法判断能效的凹凸性,但是根据图4,在 b 的实际取值范围内,能效曲线呈现凸性,且只有一个最大值。考虑到 b 的取值是正整数,本文提出一种离散优化算法,对于不同的通信距离,通过优化调制水平,获取两协议能效的最大值。取调制水平 b 的最小值为2,对应调制方式为4QAM。CARQ协议的能效优化算法如下:

```

for( $r_{sd} = 10:1:120$ ) % 通信距离
     $b = 2$ ; % 调制水平初始化
     $\eta_{CARQ} = f(b)$ ; % 按照式(12)计算  $b = 2$  时的 CARQ 协议能效
    for( $b = 3:1:10$ )
         $\eta_{temp} = f(b)$ ; % 按照式(12)计算 CARQ 协议能效暂时值
        if( $\eta_{temp} > \eta_{CARQ}$ )
             $\eta_{CARQ} = \eta_{temp}$ ;
        else
             $\eta_{opt} = \eta_{CARQ}$ ; % 能效优化值
             $b_{opt} = b - 1$ ; % 调制水平优化值
        end;
    end;
end;

```

ARQ协议的能效优化算法与上述算法相同。

图5比较了采用优化算法的两协议能效与 $b = 2$ 时的未优化协议能效。图6是相应的调制水平优化值曲线(纵坐标表示调制水平的优化值 b_{opt})。可以看出优化的CARQ协议能效最高。当 $r_{sd} > 100$ 米时,优化的CARQ协议能效等于 $b = 2$ 时的未优化CARQ协议能效,因为此时优化的 b 值等于2(如图6所示)。当 $r_{sd} < 60$ 米时,优化的ARQ协议能效高于未优化的CARQ协议能效。但当 $r_{sd} \geq 60$ 米时,优化的ARQ协议能效小于未优化的CARQ协议能效;因为此时优化的ARQ协议的 b 值为2(如图6所示),优化的ARQ协议能效等于未优化ARQ协议能效。

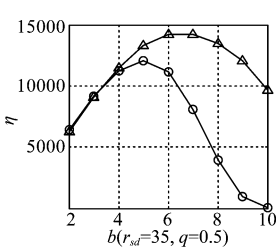


图4 调制水平对能效的影响

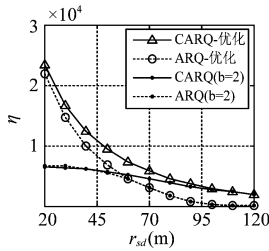


图5 通信距离对能效优化值的影响

图7是采用优化算法后协议能效增益性能曲线。为了比较,我们画出了相应的 $b=2$ 时的未优化协议能效增益性能曲线。与未优化协议不同,优化的协议能效增益始终大于1,当 $r_{sd} < 100$ 米时,高于未优化的协议能效增益;当 $r_{sd} \geq 100$ 米时,优化的 b 值等于2(如图6所示),因此优化的协议能效增益等于未优化的协议能效增益。

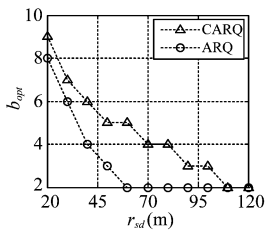


图6 通信距离对调制水平优化值的影响

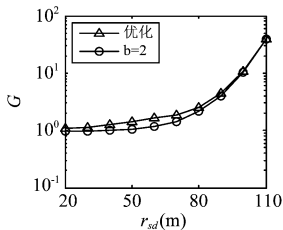


图7 通信距离对能效增益优化值的影响

5 结束语

本文提出了一种协作ARQ协议能效分析方法,导出了CARQ协议和传统ARQ协议能效的表达式,依此对两协议的能效进行了仿真研究,发现协作节点位置对协议能效有重要影响。当通信距离大于“门限距离”时,CARQ协议的能效才高于传统ARQ协议;进而提出了一种离散优化算法,通过优化调制水平,大大提高了CARQ协议的能效,优化的CARQ协议的能效增益高于未优化协议的能效增益。

参考文献

- [1] Zhao B and Valenti M C. Practical relay networks; a generalization of hybrid-ARQ [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 7-18.
- [2] Dianati M, Ling X, Naik K, and Shen X. A node-cooperative ARQ scheme for wireless ad hoc networks[J]. IEEE Trans. on Veh. Technol., 2006, 55(3): 1032-1044.
- [3] Yu G, Zhang Z, and Qiu P. Efficient ARQ protocols for exploiting cooperative relaying in wireless sensor networks [J]. Elsevier Computer Communications, 2007, 30(8): 2765-2773.
- [4] Cerutti I, Fumagalli A, and Gupta P. Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ protocols in

slotted radio networks with poisson frame arrivals [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 2008, 2(2): 371-382.

- [5] Laneman J N, Wornell G W, and Tse D N C. Cooperative diversity in wireless networks; efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans. on Inform. Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [6] 张广池,唐冬等. 基于截短ARQ协议的协作分集系统吞吐量研究 [J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1603-1607.
- Zhang Guangchi and Tang Dong, et al. Throughput study of cooperative diversity system based on truncated ARQ protocol [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1603-1607.
- [7] 孟庆民,马宝萍,高西奇,尤肖虎. 协同分集和截断ARQ在单中继无线网的使用:一种交互层研究 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2593-2598.
- Meng Qingmin, Ma Baoping, Gao xiqi and You Xiaohua. On the effectiveness of cooperative diversity and truncated ARQ in single relay wireless networks: A cross-layer study [J], Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(11): 2593-2598.
- [8] Dai L and Letaief K B. Throughput maximization of ad-hoc wireless networks using adaptive cooperative diversity and truncated ARQ [J]. IEEE Trans. on Commun., 2008, 56(11): 1907-1918.
- [9] Le L and Hossain E. IEEE Trans. on Wireless Commun., An analytical model for ARQ cooperative diversity in multi-hop wireless networks [J]. 2008, 7(5): 1786-1791.
- [10] Mahinthan V, Rutagemwa H, Mark J W, and Shen X. Cross-Layer performance study of cooperative diversity system with ARQ [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 705-719.
- [11] Goldsmith A. Wireless Communications [M]. Cambridge, U. K. Cambridge University Press, 2005.

作者简介



王绍青(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。
E-mail:wangwangsq666@sohu.com.



聂景楠(1962-),男,教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、移动通信中的信号处理。