

多跳无线传感器网络自适应链路层 FEC/ARQ 控制策略

靳 勇¹ 乐德广¹ 白光伟² 常晋义¹

(常熟理工学院计算机科学与工程学院 常熟 215500)¹ (南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)²

摘 要 提出一种用于多跳无线传感器网络数据传输的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略,以提高无线传感器网络通信的可靠性。该策略基于 Kalman 滤波器预测当前的网络状态,根据混合 FEC/ARQ 能耗规律和特点,自适应地调整 FEC 参数 n 。此外,发现 ARQ 能耗与重传策略无关,而与网络状态有关。数学分析和仿真验证均表明,该策略能有效降低多跳无线传感器网络的能量消耗,显著地提高数据传输的可靠性。

关键词 无线传感器网络, Kalman 滤波, 自适应混合 FEC/ARQ

Adaptive Link-layer Hybrid FEC/ARQ Mechanism for Multi-hop Wireless Sensor Networks

JIN Yong¹ LE De-guang¹ BAI Guang-wei² CHANG Jin-yi¹

(School of Computer Science & Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)²

Abstract This paper proposed an adaptive hybrid forward error correction (FEC)/automatic repeat request (ARQ) algorithm at the data link layer for wireless sensor networks, in the hope that the reliability of data transmission could be greatly improved. The algorithm, using the Kalman filter to predict packet loss rate, adjusts the FEC parameter n . In addition, we determined that the energy consumption of ARQ depends on the wireless network condition. However, it is independent on the retransmission strategy. Both the mathematical analyses and simulation result demonstrate that the proposed mechanism can significantly improve quality of communication, and the energy consumption is reduced as well.

Keywords Wireless sensor networks, Kalman filter, Adaptive hybrid FEC/ARQ

1 引言

无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks)节点能量、处理能力、存储能力和通信能力都很有限,节点生存周期取决于节点能量消耗,这使得传感器节点不仅要有低功率的能耗、高能效的通信协议,而且要有低能耗的差错控制策略。这些特点使本已深受无线信道影响的传输可靠性更加脆弱。因此,研究无线传感器网络中的差错控制技术非常必要,研究和探讨一种具有较强鲁棒性的差错控制机制具有重要的意义。尽管在无线 Ad Hoc 网络中,对差错控制技术已经有了深入的研究^[1,2],但相关的研究结论是否适用于无线传感器网络,需要进一步分析和研究。

本文首先深入分析和研究多跳无线传感器网络通信的特性、无线传感器网络协议机制以及分层次的网络体系结构的特点,在此基础上提出一种用于多跳无线传感器网络数据传输的基于预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略,以提高无线传感器网络数据传输的可靠性。此策略通过 Kalman 滤波器预测当前的网络状态,自适应地调整前向纠错

(FEC)参数 n 。从仿真实验和数学分析两个方面证明,此策略能显著地降低多跳无线传感器网络总能耗,并有效地提高数据传输的可靠性。

本文第 2 节介绍研究背景以及无线传感器网络差错控制研究的现状;第 3 节建立多跳无线传感器网络模型和能量模型;第 4 节首先深入分析、研究混合 FEC/ARQ 算法和 ARQ 算法能耗规律与特点,从而得到自适应混合 FEC/ARQ 算法;第 5 节通过数学方法和仿真实验对此算法进行性能分析和评价;最后总结全文。

2 相关工作

近年来,无线传感器网络数据传输性能和服务质量保证问题在学术界获得了广泛的关注。FEC 通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性,并且不会增加往返时延。但是传输冗余数据占用了额外的带宽。与之相反,ARQ 不占用额外带宽,但是重传数据会增加往返时延,而且,通过重传数据包来纠正该数据包内几个字节甚至几个比特的错误,效率太低。文献[3-5]采用了混合 FEC/ARQ 方法,在使用 FEC 编码提

到稿日期:2009-12-02 返修日期:2010-02-26 本文受国家自然科学基金(60673185),江苏省“六大人才高峰”项目(09-D),常熟理工学院教师科研启动基金(KY2009024),常熟理工学院青年教师科研启动基金(QZ0911)资助。

靳 勇(1981—),男,硕士,助教,主要研究方向为无线传感器网络、无线多媒体网络性能分析、QoS、差错控制等;乐德广(1975—),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络安全与下一代互联网等, E-mail: leduguang@googlemail.com;白光伟(1961—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络、无线自组织网络、多媒体网络、网络系统性能分析、评价等;常晋义(1955—),男,教授,主要研究方向为空间决策支持系统、数据库安全技术、软件工程等。

供差错保护的同时,通过限制数据的重传次数达到对时延约束的目的,从而获得较好的传输质量。C. Barakat 等人分析了长 TCP 连接的无线网络传输特性,在此基础上提出了一种数据链路层混合 FEC/ARQ 控制机制。从无线链路不同的物理特性(包括时延、差错率)和 TCP 连接数等几方面对该混合机制进行性能分析与评价,表明该混合机制可以最大化 TCP 传输性能^[6]。文献[7]在 Markov 信道模型上分析了信道时延对 FEC 和 ARQ 的影响,并给出了在时延约束下选择纠错模式的判别式;同时根据该判别式在 TMN8 基础上提出自适应模式选择的码率控制算法,该算法根据判决算法选择合适的纠错编码模式,通过预测纠错报文数目修正编码分配比特数;实验结果表明这种码率控制算法能够根据不同的工作环境(报文丢失率,信道延迟)选择更优的纠错编码模式,使得图像质量比单独使用 FEC 或 ARQ 时要高。文献[8]对自动请求重传(ARQ)技术和前向纠错(FEC)技术的能效进行了分析,提出在无线传感器网络中使用 Chase 合并混合自动请求重传(HARQ)方案实现自适应差错控制,以满足无线传感器网络的不同链路对差错控制方案的差异性要求。文献[9]建立单跳和多跳传感器网络模型和能耗模型。对于单跳簇状网络模型,讨论了 FEC 编码同最佳簇头和最佳数据包长度相结合的技术。对于线性多跳网络,引入了最优节点间距的概念,并在此基础上讨论了端到端 FEC 和逐跳 FEC。在洪泛的多路径模型中,讨论了网络编码技术,并讨论了将 FEC 编码和网络编码 NC 进行联合编码的技术(NC-FEC)。

然而,上述成果仍然具有一定的局限性。文献[3-5]的研究成果适用于无线 Ad Hoc 网络,都没有涉及差错控制技术的能耗问题。文献[6]则主要研究了应用于 TCP 通信的无线网络的数据链路层混合 FEC/ARQ 控制机制,但没有考虑到数据传输的可靠性和能耗问题。文献[7]在 TMN8 的基础上提出一种简单的混合 FEC/ARQ 自适应模式选择码率控制方法,但是没有进一步分析 FEC 和 ARQ 自身能耗的特性来设计自适应控制策略。文献[8]没有考虑链路层信息对数据传输性能的影响,也没有分析根据混合 FEC/ARQ 机制能耗的特点来建立自适应编码方案。文献[9]没有考虑 FEC 编码中的 RS 编码冗余码数量对传感器网络能耗的影响。

由于无线信道具有高误码率的特性,无线传感器网络的数据链路层多采用基于收方反馈的重传机制,以保证数据传输的正确性。显然,数据链路层重传带来了传输时延的变化,导致了传输层端到端的时延、丢包率和 TCP 吞吐量的变化,使可用带宽产生波动,从而影响了无线传感器网络数据传输的质量。本文基于 Kalman 滤波器预测方法,提出一种适用于多跳无线传感器网络数据传输的自适应链路层混合 FEC/ARQ 控制策略。

3 多跳无线传感器网络模型和能量模型

3.1 网络模型

在多跳无线传感器网络中,假设源节点(S)发送 k' 比特数据到距离为 N 跳的目的节点(G),可以考虑单路径传输方案。如图 1 所示,单路径即线性路由,是无线传感器网络路由的最基本形态,出现在节点密度较低的情况下,常应用于道路安全监控以及目标跟踪中。

本文针对线性路由网络的差错控制策略进行分析。为了

便于计算,做如下假设:

- (1)假设一个采集周期内源节点和所有中继节点都采集相同的 k' 比特信息,并将数据传送到目的节点;
- (2)各传感器节点同构,即具有相同的无线通信距离;
- (3)各传感器节点都通过 CSMA 机制竞争信道进行数据传输。

网络模型如图 1 所示。源节点在网络最左侧,其余 $N-1$ 个节点均匀分布在源节点右侧。每个节点在一跳通信范围内最多只有两个邻居节点,即路由父节点和子节点,从而网络形成线性路由。

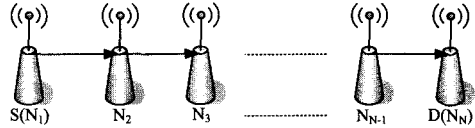


图 1 网络模型

从图 1 可以看出,除了 $S(N_1)$ 节点以外,其它中间节点不仅要传送自己采集的数据,还要充当路由器的角色,转发来自上游节点的数据。最靠近 $D(N_N)$ 的中继节点 N_{N-1} 需要传输的数据最多,其次是节点 N_{N-2} ,S 传送的数据最少,它只需传送本身所采集的数据。因此,会造成各个节点的能量消耗的巨大差异,最终最靠近目的节点 D 的节点 N_{N-1} 能量最先耗尽,然后节点 N_{N-2} 会很快耗尽能量;依此类推,最终全网的节点很快会耗尽能量。本文是在最优间距的基础上进行讨论,充分考虑全网的能耗配置问题^[9]。

3.2 能量模型

针对线性路由网络,我们考虑端到端差错控制方案。对于端到端 FEC,在源节点进行 FEC 编码,但是只在目的节点解码,每个中间节点只转发数据,从而显著地节省解码能量。

无线传感器网络的节点通信能量模型有许多种,本文选用的是 Heinzel-man 的改进 first order 射频模型^[10]。

当发射器发送 k' 比特数据到接收机时,发射端能耗为 $E_{TX}(k',d)$,接收端能耗为 $E_{RX}(k',d)$ 。 $E_{TX}(k',d)$ 表示为^[11]

$$E_{TX}(k',d) = k' * E_{txElec} + k' * \epsilon_{amp} * d^\gamma \quad (1)$$

式中, E_{txElec} 是发射器电路发射 1 比特的能耗,主要用于电子元件进行必要的频率合成、频率转换和滤波等,能耗基本固定; ϵ_{amp} 是信号放大器的放大倍数,取决于接收器的敏感度和噪声; d 是信号传输距离; γ 是路径损耗因子,与传输距离有关。该模型并没有考虑启动能量,但是对于某些传感器节点而言,启动能量有时也是非常可观的,因此本文加入了启动能量,用 E_{start} 表示。以上的能耗模型变为

$$E_{TX}(k',d) = k' * E_{txElec} + E_{start} + k' * \epsilon_{amp} * d^\gamma \quad (2)$$

由于端到端 FEC 只需在目的节点解码,也就是说解码能量只花费在目的节点,因此除目的节点,其他节点只做前向数据传输。本文中 FEC 编码使用线性分组码编码 $RS(n,k)$,则冗余码字数 $\tau = n - k$ 。从 N_x 节点(G 除外)传输 n 个码字到目的节点 G (编号 N_N)的能耗是

$$E_{end-x} = \sum_{i=x}^{N-1} E_{TX}(k',di) + (N-x)E_{RX}(k') + kE_{dec} (2(N-x)(k'E_{dec} + E_{start}) + k'\epsilon_{amp} \sum_{i=x}^{N-1} [D/(i \sum_{j=1}^{N-1} (1/j))]^2 + kE_{dec} \quad (3)$$

式中, E_{dec} 为发射/接收电路能量, E_{dec} 为单个码字解码能耗。

文献[12]给出了 RS 编码的 Berlekamp-Massey (BM)、

Chien's Search (CS) 算法和 Fomey's 算法的解码技术的能量消耗模型^[12]。长度为 n , t 的纠错能力 RS 编码的 E_{dec} 表示如下。

$$E_{dec} = (4nt + 10t^2)E_{mult} + (4nt + 6t^2)E_{add} + 3tE_{inv} \quad (4)$$

式中, E_{add} , E_{mult} 和 E_{inv} 表示 $GF(2^m)$ 域内元素的加法、乘法和求倒数运算的能量消耗, 在此 m 可以表示为 $m = \lfloor \log_2 n + 1 \rfloor$ 。对于 $0.18\mu m$, $2.5V$ 的 CMOS 而言, 它们分别记为

$$E_{add} = 3.3 \times 10^{-5} m \text{ (mW/MHz)} \quad (5)$$

$$E_{mult} = 3.7 \times 10^{-5} m^3 \text{ (mW/MHz)} \quad (6)$$

$$E_{inv} = 3.3 \times 10^{-5} (2m - 3)m^3 \text{ (mW/MHz)} \quad (7)$$

编码纠错能力 t 和具体编码的冗余码字和解码算法相关。对于 RS 编码而言, $t = (n - k)/2$ 。

假设码字丢失概率为 P_u , 那么从 N_x 节点传输 n 个码字到目的节点 G 的成功概率为

$$P_{end_x} = \left[\sum_{j=0}^n \binom{n}{j} [(1 - P_u)^{N_x}]^j [1 - (1 - P_u)^{N_x}]^{n-j} \right]^k \quad (8)$$

则从 N_x 节点传输 1 个码字到目的节点 G 的能耗为

$$E_{end_u_x} = E_{end_x} / P_{end_x} \quad (9)$$

因此, 在线性路由上所有节点 (N 个节点) 成功采集并传输一个码字的数据到目的节点 G 的平均能耗为

$$E_{end} = \frac{\sum_{x=1}^{N-1} E_{end_u_x}}{N} \quad (10)$$

4 自适应链路层混合 FEC/ARQ 控制策略

本节首先分析、研究混合 FEC/ARQ 自身的能耗规律和特点以及 ARQ 能耗特点, 然后提出自适应混合 FEC/ARQ 控制策略。

4.1 链路层混合 FEC/ARQ 机制

本小节首先介绍 Reed-Solomon 编码原理, 并在此基础上分析 FEC 参数 n 即编码后的全部符号数量的规律。

4.1.1 Reed-Solomon 编码

Reed-Solomon 编码是前向纠错编码 FEC 中的一种, 可用于有损信道的数据传输, 它通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性。Reed-Solomon 编码^[13,14] 通过定义在有限域上的生成多项式进行纠错, 定义为 $RS(n, k)$, 其中 n 为编码后的全部符号数量, k 表示原始信息符号的数量, 而 $n - k$ 表示编码后产生的冗余信息符号数量^[15]。RS 编码最大可以纠正 $n - k$ 个错误。当经过网络传输后, 如果有任意 k 个或更多的数据包被正确接收, 那么就可以从中恢复出原始的 k 个数据包。 k/n 称为编码率, 表明了冗余数据的多少。很显然, k/n 越小, 纠错能力越强。RS 编码具有延迟短、纠错能力强的优点, 已经被广泛用于网络通信。

当 n, k 确定时, 可由式(9)计算出全部数据的正确接收概率 $P(n, k)$ 。

$$P(n, k) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1-p)^i p^{n-i} \quad (11)$$

式中, p 为当前的平均丢包率。

4.1.2 混合 FEC/ARQ 分层模型

如图 2 所示, 根据 RFC3580, 数据包的最大长度设为 1500 字节。因此一个 IP 数据包可以被封装为一个数据链路层数据帧。在这种情况下, 丢包率 P_w 就等于丢帧率 (数据链路层数据帧的丢失概率) P_f 。在数据链路层, 每个链路层数

据帧被分割为 k 个链路层传输单元。对于这 k 个传输单元, 添加 $n - k$ 个由 Reed-Solomon 编码产生的冗余码。这些由 Reed-Solomon 编码产生的冗余码非常适合于对链路层数据帧进行差错保护^[16]。在网络传输过程中受传输错误的影响, 接收方只能正确接收 K 个链路层传输单元, 但只要 $K \geq k$, 就可以恢复出 k 个链路层传输单元; 若 $K < k$, 则启用 ARQ 机制重传缺失的链路层传输单元, 以确保 $K \geq k$, 进而重组该链路层数据帧。

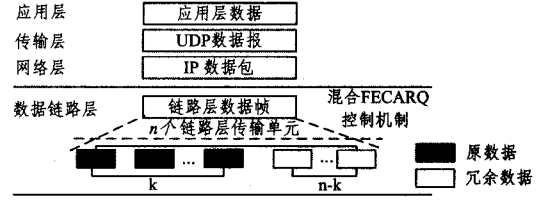


图 2 混合 FEC/ARQ 控制策略分层模型

4.1.3 混合 FEC/ARQ 机制能耗分析

无线信道的时变特性使无线传感器网络的状态发生变化, 每个传输单元需要重传的次数也不尽相同, 但最大重传次数为 N_{max} 。如果经过 N_{max} 次重传后, 传输单元仍未被正确传输, 则该传输单元以概率 P_u 丢弃, 结果导致其所在的数据帧也被丢弃。因此, 无线链路的丢帧率 P_f 为

$$P_f = 1 - P_t^k \quad (12)$$

式中, P_t 为数据帧中每个传输单元被正确接收的概率; k 为一个数据帧中传输单元的个数。数据帧中每个传输单元被正确接收的概率 P_t 可按下式计算。

$$P_t = (1 - P_f) + P_f(1 - P_f) + P_f^2(1 - P_f) + \dots + P_f^{N_{max}}(1 - P_f) = 1 - P_f^{N_{max}+1} \quad (13)$$

把式(13)代入式(12), 即可计算出无线链路的丢帧率 P_f 。

由于无线网络状态的变化, 使得每个传输单元需要重传的次数不同, 因此每个帧的平均重传次数 N_{avg} 可以用如下公式计算。

$$N_{avg} = P_f(1 - P_f) + 2P_f^2(1 - P_f) + \dots + (N_{max} - 1)P_f^{N_{max}-1}(1 - P_f) + N_{max}P_f^{N_{max}} = P_f + P_f^2 + \dots + P_f^{N_{max}}$$

由我们的前期研究结果^[1]可知:

$$P_u = e^{\frac{\ln(1-P_f)}{N_{avg}+1}} = e^{\frac{\ln P_f}{N_{avg}+1}} \quad (14)$$

根据式(12)和式(14)可以求得链路层数据帧丢失概率 P_f^* 为

$$P_f^* = 1 - P_t \quad (15)$$

此处, P_f^* 表示采用链路层混合 FEC/ARQ 机制后的链路层数据帧丢失概率, 用于下文的数学分析。

在数据链路层使用 FEC 来提高数据传输的可靠性, 会消耗一定的网络带宽, 从而降低传输数据可获得的有效吞吐量, 同时消耗过多的能量。如果在传输过程中总是给冗余数据分配固定的带宽, 当网络状态较好时, 可能会因为 FEC 使用了过多的带宽和消耗了过多的能量而造成资源的浪费; 而当网络状态较差时, 又会因为提供的纠错能力不足, 降低了数据的可靠性。因此, 在传输数据时, 要能够根据网络状态的变化自适应地动态调整 FEC 添加的冗余数据。

假设丢帧率 P_f 分别为 0.1, 0.15, 0.2 和 0.25, 且 ARQ

最大重传次数 $N_{\max}$ 为 2 时,由式(12)一式(15)求出丢包率 P_w ,由式(10)可以求出多跳无线传感器网络总能耗。图 3 给出了 P_w 随 FEC 参数 n 的变化情况,以及多跳无线传感器网络总能耗随 FEC 参数 n 的变化情况。从图 3(a)可以看出,在链路层加入混合 FEC/ARQ 机制,可以有效地改善传感器网络传输质量,使得丢包率明显降低。当然,添加的冗余码越多,即 n 值越大;网络传输可靠性越高,即丢包率越低。从图 3(b)可以看出,丢帧率越高,网络总能耗越高。随着 n 值的增大,网络总能耗也逐渐增大。综合对比图 3(a)和(b),可以寻找一个最佳的 n 值,不仅可以改善当前网络状态,即有效降低丢包率,从而有效提高数据传输可靠性,而且网络总能耗相对最小。例如, $P_f=0.1$ 添加 3 个冗余码即 $n=9$ 时,改善后的丢包率 P_w 为 0.000052 且网络总能耗为 42.75(J/bit);而当 $n=10$ 时, P_f 为 0.000003 且网络总能耗为 79.96(J/bit);因为多添加了一个冗余码,而使得能耗增加了 1.8704 倍,而丢包率并没有明显降低;同时, $P_f=0.1$ 未采用混合 FEC/ARQ 机制时网络总能耗为 87.85(J/bit),采用该机制后能耗减少了 50%。当 $n=9$ 时,丢包率 P_w 为 0.000052,足以满足数据传输的可靠性,不必继续降低,可以保证数据可靠传输。因此,对于 $P_f=0.1$ 时, n 取 9 是最合适的。依据以上原则,可以为不同的丢包率 P_w 选择唯一的最合适的 n 值,在 P_f 与 n 之间建立一一对应关系。

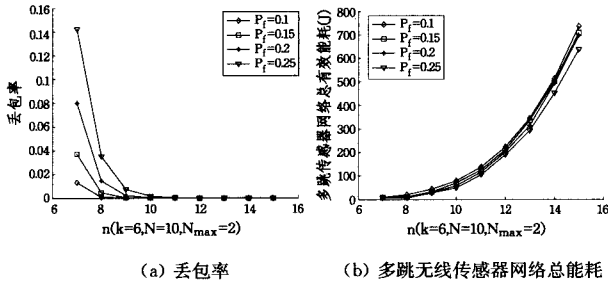


图 3 FEC 参数 n ($k=6, N_{\max}=2$)

自适应混合 FEC/ARQ 可以表述如下:对于不同的丢帧率(链路层数据帧丢失概率) P_f ,求解一个 FEC 参数 n ,使得该状态传感器网络通信性能最佳且能耗最低,在 P_f 与 n 之间建立一一对应关系。综上,本节得到 FEC/ARQ_adap() 函数。该函数把 Kalman 滤波器预测得到的丢包率 P_{f_pre} 作为输入值,求出与之对应的 FEC 参数 n 值并作为返回值返回。

4.1.4 ARQ 能耗分析

对 ARQ 技术来说,可靠性是通过重传机制来保障的。如果接收端发现收到的数据包有误,则会要求发送端重传,直到数据包被正确接收或者达到最大重传次数为止^[17]。4.1.3 节中最大重传次数 $N_{\max}$ 取 2,我们对混合 FEC/ARQ 机制进行了能耗分析。本节分析最大重传次数 $N_{\max}$ 的变化对该机制能耗的影响。

图 4(a)一(d)给出了在不同丢包率情况下,ARQ 最大重传次数 $N_{\max}$ 分别是 0,1,2,3 时的多跳无线传感器网络总能耗。图中代表不同最大重传次数的曲线在任意的 FEC 参数 n 的情况下都重合在一起。因此可以得到结论,ARQ 技术的能耗不随着最大重传次数 $N_{\max}$ 的增减而变化,它的能耗与重传策略无关,而是随着网络状态即丢包率的变化而改变。

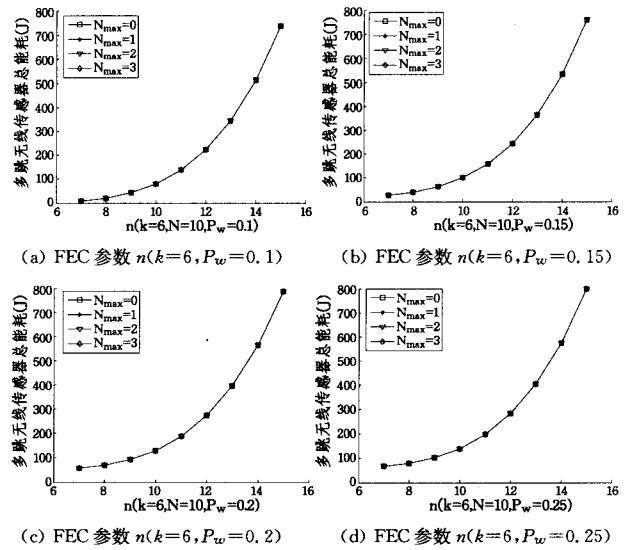


图 4 多跳无线传感器网络总能耗

4.2 自适应链路层混合 FEC/ARQ 控制策略

上面的分析表明,FEC 通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性,并且不会增加往返时延。但是传输冗余数据占用了额外的带宽。ARQ 不占用额外带宽,但是重传数据会增加往返时延,降低实时流媒体传输性能。而且,通过重传数据包来纠正该数据包内几个字节甚至几个比特的错误,效率太低。基于 FEC 和 ARQ 各自的优缺点以及 FEC 和 ARQ 对多跳无线传感器网络能耗的影响以及规律,本节提出一种基于预测的数据链路层自适应混合 FEC/ARQ 控制策略,并应用于多跳无线传感器网络数据传输。

相比 ARQ 和 FEC 方案,在无线传感器网络中应用自适应链路层混合 FEC/ARQ 技术具有以下几点优势:

- (1) 混合 FEC/ARQ 技术同时利用了数据包重传机制和信道编码技术,结合了 ARQ 和 FEC 的技术优势,实现了无线传感器网络的高可靠性通信,提供了一种满足无线传感器网络自适应编码速率要求的差错控制机制。
- (2) 混合 FEC/ARQ 技术的重传合并策略利用了历次接收到的重传数据包信息,信息使用效率高。当 $k < K$ 时启用 ARQ 机制重传缺失的链路层传输单元,以确保 $k \geq K$,进而重组该数据链路层数据帧。
- (3) 混合 FEC/ARQ 技术重传使用同一 FEC 编码数据包,发射端和接收端设计复杂度较低,系统运算量少,避免了不必要的编码能耗,适合传感器节点低复杂度、低能耗的要求。
- (4) 混合 FEC/ARQ 技术可以根据当前网络状态自适应调整编码方案即添加冗余码数量,减少不必要的能量消耗以及网络资源的额外占用。

我们前期的研究结果^[2]表明,Kalman 滤波器可以很好地预测无线网络状态即无线网络的丢包率,因此本文采用 Kalman 滤波器预测丢帧率 P_f 。定义 KalmanPredict() 函数,利用当前丢帧率 P_{f_cur} 预测下一时刻丢帧率的值 P_{f_pre} ,并作为返回值返回。其中,可以预先对当前网络进行观测,得到一系列 P_{f_cur} 值。

基于多跳无线传感器网络的通信过程,自适应链路层混合 FEC/ARQ 控制策略在发送方和接收方的具体流程如图 5 所示。其工作过程步骤如下。

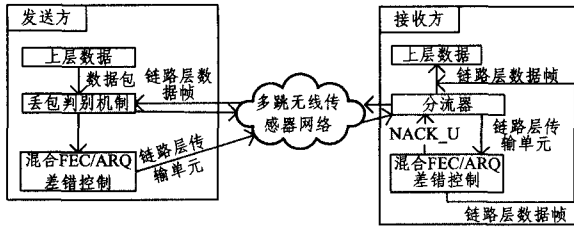


图5 适应链路层混合 FEC/ARQ 结构图

(1) 在发送方,上层数据在数据链路层被封装为链路层数据帧,丢包判别机制判断当前的链路层数据帧是否丢失;

(2) 如果未丢失过,则将该链路层数据帧发送出去;如果丢失过,即收到一个 NACK,则启动混合 FEC/ARQ 差错控制;

(3) 由 Kalman 滤波器预测下一时刻无线网络的丢帧率,然后启用自适应链路层混合 FEC/ARQ 机制将该链路层数据帧分割为 k 个链路层传输单元并添加 n_1 个冗余码,编码成 n 个链路层传输单元,最后将发送这 n 个链路层传输单元;发送方收到 NACK_U 后判断其是否为 0,若不为 0 则启用 ARQ 机制,重传 NACK_U 个缺失的链路层传输单元,使接收方能正确解码并重组丢失的链路层数据帧,其中 $n_1 = n - k$, NACK_U 是用于统计待重传链路层传输单元的个数, $k, n_1, n, \text{NACK_U}$ 均为自然数;

(4) 接收方收到的数据首先送至分流器,分流器判断收到的数据是链路层数据帧还是链路层传输单元;

(5) 如果是链路层数据帧,则将该链路层数据帧直接送至上层;如果是链路层传输单元,则启动混合 FEC/ARQ 差错控制,混合 FEC/ARQ 差错控制判断收到的链路层传输单元个数 N_{LLU} 是否大于等于 k ;如果大于等于 k ,则对收到的 N_{LLU} 个链路层传输单元进行解码并重组链路层数据帧,然后将还原得到的链路层数据帧发送至上层;如果小于 k ,则求 $\text{NACK_U} = k - N_{LLU}$,并将 NACK_U 发送至分流器,分流器把 NACK_U 反馈给发送方,其中 N_{LLU} 表示接收方收到的属于同一个链路层数据帧的链路层传输单元的个数, N_{LLU} 为自然数, k 同步步骤(3)中的 k 。

以上各功能模块的算法描述为:

(1) 发送方丢包判别机制(位于链路层)

Listen(NACK); // 监听

If (NACK)

hybrid_s=1; // 启动混合 FEC/ARQ 差错控制

Else

hybrid_s=0;

Send(链路层数据帧); // 发送该链路层数据帧

Endif

(2) 发送方混合 FEC/ARQ 差错控制(位于链路层)算法描述为:

Listen(hybrid_s); // 监听

If (hybrid_s)

KalmanPredict(P_{f_cur});

// 预测得到下一时刻丢帧率 P_{f_pre}

If (NACK_U)

// 判断链路层传输单元是否丢失

While($\text{Ret_time} \leq N_{\max}$)

Retransfer(链路层传输单元);

// 重传 NACK_u 个链路层传输单元

Ret_time++;

// 记录重传次数

Else // 丢失链路层数据帧

FEC/ARQ_adap(P_{w_pre}); // 求得 n

LL_U=1;

// 开始发送链路层传输单元

ReedSolomnCode(链路层数据帧);

// 进行 RS 编码

Send(发送链路层传输单元); // 发送发送链路层传输单元

Endif

Else

No operation;

Endif

(3) 接收方分流器(位于链路层)

Listen(LL_U); // 监听

If (LL_U)

hybrid_r=1; // 收到的数据是链路层传输单元

Else // 收到的数据是链路层数据帧

hybrid_r=0;

Send(链路层数据帧); // 把收到的链路层数据帧送至上层

If (NACK_U)

// 丢失链路层传输单元

Send(NACK_U);

// 把 NACK_u 反馈给发送方

Endif

Endif

(4) 接收方混合 FEC/ARQ 差错控制(位于链路层)算法描述为:

Listen(hybrid_r); // 监听

If (hybrid_r)

If ($N_{LLU} < k$)

NACK_U = $k - N_{LLU}$;

// 丢失的链路层传输单元个数

Send(NACK_U);

// 把 NACK_U 发送给接收方的分流器

Else

NACK_U=0;

LL_U=0;

ReedSolomnDecode(链路层传输单元);

// RS 解码并重组链路层数据帧

Send(链路层数据帧); // 将重组的链路层数据帧送至上层

Endif

Else

No operation

Endif

5 性能分析和评价

本节通过仿真实验和数学分析方法对上面提出的自适应链路层混合 FEC/ARQ 控制策略进行性能分析。假设传感器节点 $N=10$, 信道速率为 1Mbps, MAC 帧头长度为 272bits, PHY 帧头长度为 128bits。 $k=6$ 即一个链路层数据帧被分割为 6 个链路层传输单元, P_f 取值范围是 0.1~0.25, 步长为 0.05。

假设信道条件为 AWGN 信道加上 BPSK 调制。频率 $f=$

1GHz,则波长 $\lambda=c/f=0.3\text{m}$,发射天线高度 $h_t=1\text{m}$,接收天线高度 $h_r=2.5\text{m}$,整个网络的分布区域 $D=100\text{m}$ 。假设传感器发射/接收电路能量 $E_{dec}=50\text{nJ/bit}$,启动能量 $E_{start}=2.5\text{nJ/packet}$,簇头汇聚 $E_{gather}=5\text{nJ/bit}$,比特率 $R_b=1\text{M/s}$,噪音比常量 $m=1$ 。玻尔兹曼常量 $K=(1.38066\pm0.000044)\times 10^{-23}$,温度 $T=300\text{K}$,信号宽度 $B_w=1\text{M}$,天线增益 $G_t=G_r=1$ 。

表1和图6分别给出了自适应链路层混合FEC/ARQ控制策略在丢包率和多跳无线传感器网络总能耗等几个方面的性能比较。该控制策略是基于Kalman滤波器预测丢帧率的,因而可以自适应调整FEC参数 n ,改善多跳无线传感器网络数据传输质量,使得丢包率明显降低(如表1所列)。滤波器预测功能的实现,能够很好地解决由于反馈报文丢失造成的发送速率波动问题。该控制策略能对丢包率较高的网络环境提供更为可靠的服务。

表1 自适应混合FEC/ARQ丢包率分析

丢帧率 P_f	丢包率 P_w	FEC 参数 n
0.1	0.000003	10
0.15	0.000003	11
0.2	0.000004	12
0.25	0.000001	14

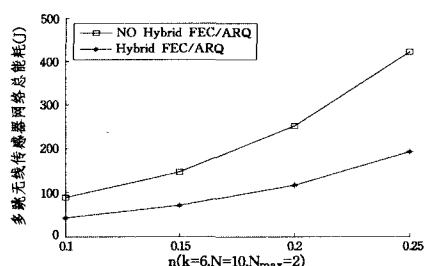


图6 仿真实验与自适应混合FEC/ARQ流媒体性能分析

图6给出了采用自适应链路层混合FEC/ARQ控制策略(图中用“Hybrid FEC/ARQ”表示)与未采用该策略(图中用“NO Hybrid FEC/ARQ”)时的多跳无线传感器网络总能耗。从图6可以清楚看到,自适应链路层混合FEC/ARQ控制策略在相同的网络条件下可以显著降低传感器网络总能耗,同时根据当前网络状态以及混合FEC/ARQ机制能耗的特点和规律不会盲目增加冗余码,浪费网络资源。采用混合FEC/ARQ机制后,多跳无线传感器网络总能耗降低了约50%。而且发现,在越差的网络状态下,总能耗降低比例越大。例如 P_f 为0.1时,采用该策略后网络总能耗为42.75(J/bit),而未采用该策略时,网络总能耗为87.85(J/bit),是采用该策略的约2.05倍;当 P_f 为0.25时,采用该策略后网络总能耗为191.81(J/bit),而未采用该策略时网络总能耗为421.9820(J/bit),是采用该策略的约2.25倍。这说明该控制策略是有效的,非常适用于网络状态较差的情况,能根据当前的网络状态确定最优的数据发送模式。

结束语 无线传输的固有特性使得在无线环境下为传感器网络应用提供数据通信可靠性保证面临更多的挑战。针对多跳无线传感器网络数据传输,本文提出了一种基于预测的数据链路层自适应混合FEC/ARQ控制策略。此策略基于Kalman滤波器预测当前的网络状态,自适应地调整FEC参数 n ,以获得最大的数据传输可靠性。同时,本文发现ARQ能耗与重传策略无关,而与网络状态有关。数学分析与仿真

实验证明,此策略能够适应多跳无线传感器网络状态的变化,有效提高数据传输的可靠性。

我们下一步的工作是进一步优化发送方和接收方的各功能模块及其算法,降低自适应混合控制策略总体计算复杂度,以提高其工作效率。另一方面,多媒体信息(尤其是音视频)对传输的时延、同步要求很高,多媒体传感器网络应具有更强的媒体传输能力和差错控制能力。目前,多媒体传感器网络的带宽资源以及处理能力还相当有限,我们可以考虑采用自适应差错控制策略来有效解决多媒体的实时传输问题,以及多媒体传感器网络的实用化问题。

参考文献

- [1] Jin Y, Bai G W, Zhang P, et al. Performance evaluation of a hybrid FEC/ARQ for wireless media streaming[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCS-C2008). Shanghai, May 2008:90-94
- [2] 靳勇,白光伟. Kalman滤波的自适应链路层FEC控制策略[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7):129-134
- [3] Zhang Q, Kassam S. Hybrid ARQ with Selective Combining for Fading Channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(5):867-880
- [4] Subramanian V, Kalyanaraman S, Ramakrishnan K K. Hybrid Packet FEC and Retransmission-based Erasure Recovery Mechanisms(HARQ) for Lossy Networks: Analysis and Design[C]//Proceedings of Wireless Systems: Advanced Research and Development (WISARD). Bangalore, India (Invited paper), January 2007
- [5] Azouzi R E I, Peyer T, Benslimane A. Optimal design of hybrid FEC/ARQ schemes for real-time applications in wireless networks[C]//Proceedings of 2nd Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling (WMuNeP). Terromolinos, Spain, 2006:11-18
- [6] Barakat C, Fawal A A. Analysis of link-level hybrid FEC/ARQ for wireless links and long-lived TCP traffic[J]. Performance Evaluation, 2004, 57(4):453-476
- [7] Chen Y P, Zhang P R, Gao X F. Rate control scheme for wireless video transmission[J]. Journal on Communications, 2006, 27(3):94-98
- [8] 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
- [9] 徐其飞. 无线传感器网络差错控制技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2008
- [10] Andrea G. 无线通信[M]. 杨鸿文,等译. 北京:人民邮电出版社, 2007
- [11] Bernard S. 数字通信:基础与应用(第二版)[M]. 徐平平,等译. 北京:电子工业出版社, 2002
- [12] Goel M, Shanbhag N R. Low-power Channel Coding via Dynamic Reconfiguration[C]//Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP). Phoenix, AZ, March 1999(4):1893-1896
- [13] Cai J F, Chen C W, Zhang Q. An FEC-ased Error Control Scheme for Wireless MPEG-4 Video Transmission[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2000). Chicago, USA, 2000:1243-1247

后的候选服务集作为新的候选服务集,进行下一步处理。

针对用户的 QoS 需求,对候选服务集进行 QoS 匹配处理。候选服务 A_6 的匹配结果为“交叉满足”,其房间类型和服务响应时间的值与用户 QoS 需求值有一定的交集。而其他服务匹配结果都应该是“完全满足”的。经过以上两个步骤的处理,候选服务集中还剩下 A_1, A_2, A_3, A_4 。原型系统对该候选服务集进行 QoS 优化选择处理,以获取最终服务。

对候选服务集进行预处理,将区间型的数值用一个代表值来表示,并统一 QoS 参数的度量单位;按照复合函数计算复合参数的值;然后以用户 QoS 需求为标准,构成矩阵 M_A 。在测试数据中,由于房间类型不具备取值趋势,不需分配权值,因此预处理时只需保留价格、响应时间以及可获取性。价格的度量单位根据用户需求统一化为美元。响应时间因取值趋势为“期望区间”,故其代表值取值区间的中间值。可获取性的参数值则根据公式 $Availability = MTTF / (MTTF + MTTR)$ 求取。经过预处理后形成的矩阵 M_A 为:

$$M_A = \begin{bmatrix} 2.0 & 3.5 & 0.92 \\ 3.3 & 2.5 & 0.93 \\ 2.5 & 1.5 & 0.95 \\ 5.0 & 3.0 & 0.99 \end{bmatrix}$$

对矩阵 M_A 进行规约化处理,利用式(1)处理矩阵的第一列(价格),其中 $q_{\max} = 5.0, q_{\min} = 2.0$;利用式(3)处理矩阵的第二列(反应时间),其中 $\alpha = 1.5, \beta = 0$;利用式(2)处理矩阵的第三列(可获取性),其中 $q_{\max} = 0.99, q_{\min} = 0.92$ 。规约化处理后所得矩阵为:

$$M_A' = \begin{bmatrix} 1 & 0.67 & 0 \\ 0.57 & 0.67 & 0.14 \\ 0.83 & 0 & 0.43 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

最后对矩阵进行加权处理。根据用户 QoS 需求可知,权值向量 $W_1 = \{0.7, 0.2, 0.1\}, W_2 = \{0.3, 0.6, 0.1\}, W_3 = \{0.4, 0.4, 0.2\}, W_4 = \{0.2, 0.4, 0.4\}$ 。根据式(4),得加权处理结果,如表 2 所列。

表 2 QoS 优化选择的理论计算结果

服务	权值为 W_1	权值为 W_2	权值为 W_3	权值为 W_4
A_1	0.834	0.702	0.668	0.468
A_2	0.547	0.587	0.524	0.438
A_3	0.624	0.292	0.418	0.338
A_4	0.3	0.7	0.6	0.8

从表 2 可以看出,权值为 W_1 时,主要考虑价格因素,服务的排序应该为 (A_1, A_3, A_2, A_4) ;权值为 W_2 时,主要考虑响应时间,服务的排序应该为 (A_1, A_4, A_2, A_3) ;权值为 W_3 时,主要同时考虑价格和响应时间,服务的排序应该为 (A_1, A_4, A_2, A_3) ;权值为 W_4 时,同时考虑响应时间和可获取性,服务的排序应该为 (A_4, A_1, A_2, A_3) 。

结束语 本文在研究总结当前 QoS 感知的语义 Web 服

务发现相关技术和方法的基础上,针对现有方法中存在的不足,利用 5 种不同度量方式来区分 QoS 参数;按领域专家指定的基本 QoS 需求对候选服务进行匹配处理,以确保服务发现的结果是基本可执行的;用约束规划方法进行 QoS 值匹配处理;通过 QoS 优化选择处理获取最终候选服务。

参考文献

- [1] Papazoglou M P. Web services and business transactions[J]. World Wide Web, 2003, 6(1): 49-91
- [2] Cardoso J, Shet A P. Introduction to semantic web services and web process composition [C] // Proc. of First International Workshop on Semantic Web Services and Web Process Composition (SWSWPC). 2004, 3387: 1-13
- [3] O'Sullivan J, Edmond D, Hofstede A T. Formal description of non-functional service properties [EB/OL]. <http://www.ws-mo.org/papers/OSullivanTR2005>, 2005
- [4] McIlraith S, Martin D. Bringing Semantics to Web Services[J]. IEEE Intelligent systems, 2003, 18(1): 90-93
- [5] Vu L, Porto F, Aberer K, et al. An Extensible and Personalized Approach to QoS-enabled Service Discovery[C] // The 11th International Database Engineering and Applications Symposium (IDEAS). 2007: 37-45
- [6] Wang X, Vitvar T, Kerrigan M, et al. A qos-aware selection model for semantic web services[C] // The 4th Intl Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC). 2006: 390-401
- [7] Comerio M, Paoli F D, Maurino A, et al. NFP-aware Semantic Web Services Selection[C] // 11th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference. 2007: 484-486
- [8] Benbernou S, Hacid M S. Resolution and Constraint Propagation for Semantic Web Services Discovery[J]. Distributed and Parallel Databases, 2005, 18(1): 65-81
- [9] Garc'la J M, Ruiz D, et al. A Hybrid, QoS-Aware Discovery of Semantic Web Services Using Constraint Programming [C] // Proc. of the 4th Intl Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC). 2007: 69-80
- [10] 李春梅, 蒋运承. 具有 QoS 约束的语义 Web 服务发现的研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(6): 116-121
- [11] 张佩云, 黄波, 孙亚民. 基于语义匹配和 QoS 的 Web 服务混合选择方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(5): 140-145
- [12] 刘斌. 基于 QoS 本体的语义 Web 服务选择研究[D]. 北京: 北京邮电大学计算机科学与技术学院, 2008
- [13] Ma Q, Wang H, et al. A Semantic QoS-Aware Discovery Framework for Web Services [C] // The IEEE International Conference on Web Services. 2008: 129-136
- [14] Schulte C, Smolka G. Finite Domain Constraint Programming in Oz: A Tutorial [EB/OL]. <http://www.mozart-oz.org/documentation/fdt/>, 2006
- [15] OWL-S Service Retrieval Test Collection [DB/OL]. <http://owlseditor.semwebcentral.org/projects/owls-tc>, 2008

(上接第 119 页)

- [14] Podolsky M, Yano K, McCanne S. A RTP-based retransmission protocol for unicast RTP streaming multimedia [S]. Internet draft, Internet Engineering Task Force, Oct. 1999
- [15] Johanson M. Adaptive Forward Error Correction for Real-time Internet Video [C] // Proceedings of the 13th Packet Video

Workshop. Nantes, France, 2003

- [16] Blahut R E. Theory and practice of error-control codes [D]. AReading, MA: Addison-Wesley, 1983
- [17] Liu H, Ma H, Elzarki M, et al. Error control schemes for networks; an overview [J]. Mobile Networks and Applications, 1997, 2(2): 167-182