

文章编号: 1002-0411(2002)05-416-04

一种能保证传输实时性和可靠性的工业无线 通信网络编解码技术

沈 钢 蔡云泽 何 星 张卫东 许晓鸣

(上海交通大学 自动化系智能室 上海 200030)

摘 要: 针对工业控制网的实时性和可靠性要求, 提出一种新的面向工业控制环境的无线通信编解码技术, 该技术混合了前向纠错和自动重复两种方法, 信道编码采用纠错能力强的 RS 码. 当信道特性不理想时, 采用表决策略降低差错率, 而基于截止时间松弛度的变冗余度编码策略有效地提高了系统在干扰严重环境下的可靠性.*

关键词: 无线通信; 工业控制网; 信道编码; 冗余度

中图分类号: TP273, TP273

文献标识码: B

A CODING AND DECODING METHOD FOR INDUSTRIAL WIRELESS NETWORKS IN SERVICES WITH DEADLINE AND RELIABILITY GUARANTEES

SHEN Gang CAI Yun-ze HE Xing ZHANG Wei-dong XU Xiao-ming

(Automation Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China)

Abstract: To satisfy the requirements for stringent timing constraints and reliability guarantees in industrial wireless networks, this paper proposes a new coding and decoding method. This method hybridizes automatic repeat request theme and forward error correction theme. RS codes are used in this system due to their very good error correction. A voting theme is introduced in order to increase the probability of successful decoding. Deadlines dependent redundant coding can efficiently improve the probability of delivering information before a given deadline in industrial bad conditions.

Keywords: wireless communications, industrial networks, channel coding, redundancy

1 引言 (Introduction)

无线通信不受电缆束缚, 可移动, 能解决因布线困难、电缆接插件松动、短路等带来的问题, 并且有组网灵活, 扩容方便, 应用范围广等诸多优点, 在商业网络中取得了广泛的应用^[1]. 随着无线通信技术的成熟和工业控制大型化、分散化和复杂化发展趋势的要求, 无线通信网络作为传统现场总线的补充手段, 在工业控制领域开始得到越来越多的应用. 特别是对于控制节点分布广、敷设通信线路困难、或者有移动对象的工业现场, 如移动机器人、露天煤矿生产调度系统和大城市交通管理系统等^[2], 必须采用无线的方式建立通信连接.

无线通信网络相对有线网络抗干扰性较差, 特

别是工业现场的环境十分恶劣, 较差的信道传输特性以及噪声的影响, 大大降低了无线通信网络的性能. 而另一方面, 由于工业控制的特殊性, 对实时性和可靠性的要求都很高, 这两个性能指标反映在通信网络上就是数据报文传输的实时性和报文在约束时间范围内能被正确接收的概率. 这两个性能指标是紧密相关的, 当可靠性得不到保证, 势必造成出错报文的多次重传, 而影响到报文传输的实时性. 同样, 实时性不能满足的话, 可靠性也无法实现. 正是工业控制对于通信网络的高要求和无线通信低可靠性的矛盾存在, 大大阻碍了无线通信在工业控制中的广泛应用.

国内外在无线实时通信方面做了一些研究和工

* 收稿日期: 2001-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 69984003)、国家 863/CIMS 主题项目(No. 511-845-008)、上海科技启明星计划(No. 99QD14012)

作, W. Zhao^[3]提出窗口协议, 而 G. Agrawal^[4]将令牌环机制用在无线网络中, 这些协议在一定条件下能保证实时通信. 但是, 这些协议都是基于理想的无线信道, 协议的提出和分析没有考虑到干扰的影响, 在有干扰的环境下协议性能指标受到影响甚至不能正常工作. 本文针对工业控制网的实时性和可靠性要求, 提出一种新的面向工业控制环境的无线通信系统, 该系统混合了 FEC 和 ARQ, 并采用表决策略和基于截止时间松弛度的变冗余度编码方法, 有效地提高了系统在干扰严重环境下的可靠性.

2 工业实时通信网络 QoS 参数 (QoS parameters in industrial real-time networks)

QoS (Quality of Service) 参数用来描述通信网络的性能指标, 例如网络带宽、传输误码率等, 反映了网络的平均行为特性. 针对工业控制通信网络在实时性和可靠性方面的要求, 需要定义描述实时性和可靠性的 QoS 参数. 实时性由报文传输约束时间 QoS 来描述, 定义为报文送到目的节点的最迟时刻 tDL (Deadline for delivery). 而可靠性要用一个概率来定义, 工业控制网络工作在恶劣的工业现场环境中, 在电磁干扰等影响下, 要求报文传输绝对正确是不可能的, 只能用在传输有效期内接收到的报文信息正确率 P_d (Probability for correct delivery before the deadline) 来描述系统可靠性. 在系统设计阶段, 通常把有效期内报文信息正确接收概率作为影响整个系统的一个因素来计算系统性能指标, 系统运行时, 只要该 QoS 参数在规定范围内, 即使是少量的传输失败, 系统所期望的控制品质是可以保证的.

3 面向工业环境的无线通信编解码方法 (Wireless communication coding and decoding method for industrial applications)

3.1 ARQ 和 FEC 的混合系统

为了降低信号误比特率以满足工业控制网络对于实时性和可靠性的要求, 通常有两种途径: 一是降低信道本身所引起的传输差错. 二是采用抗干扰较强的信道编码, 配合适合的差错控制协议. 前者常常受到条件的限制, 在某些情况下信道的改善可能较困难或者不经济, 我们的研究重点放在差错控制系统上. 数字通信系统中差错控制方法分为两类: 即自动重复请求 (ARQ: Automatic Repeat Request) 和前向纠错 (FEC: Forward Error Correction) 系统. 在

FEC 系统中采用纠错编码来抑制传输差错, 优点是系统的传输效率高, 而缺点是可能会错误译码, 所以 FEC 通信系统的可靠性并不很高. ARQ 中接收方用应答信号来通知发送方是否传送成功, 如果失败就请求重发码字, 这样连续进行下去直到正确接收为止. ARQ 通信系统设备简单, 可靠性高, 但信道较差时, 系统可能经常处于重发状态而使传输效率非常低. 在工业控制通信网络中为了保证传输的可靠性, 须采用 ARQ 的应答机制, 但是工业现场环境中无线通信信道特性较差, 单独采用 ARQ 可能会造成报文不断出错重传, 影响传输的实时性, 而 FEC 恰好能够较好地抑制差错. 鉴于 FEC 和 ARQ 系统各自的优点, 适当地把它们结合起来构成混合差错控制系统, 在 ARQ 系统中引入一个 FEC 子系统, 这个 FEC 子系统能纠正少数错误图样以减少重传的次數, 无法纠正时就采用 ARQ 的重传机制, 这样增强了系统可靠性又保证了效率.

FEC 系统采用 RS 信道编码方式, RS 编码是一种纠错能力强, 构造方便的循环码, 特别适合信道特征不理想的无线通信中用于多个突发错误的纠正. 相对于其它包含相同信息码元和相等码长的其它编码方式, RS 有较小的译码错误率和较好的纠错能力, RS 码纠错能力的大小依赖于码长, 基于该特点能调整编码长度以适应不同特征的信道. 而 ARQ 系统用高效、可靠的 CRC 校验传输差错.

3.2 表决策略

通常情况下, 当接收到的码字检验出错时, 码字做抛弃处理, 然后等待下一次重传. 实际上, 先前收到的出错码字信息还可以加以利用, 在多数情况下, 误码字中只有少数几位码元出错, 如果信道是无记忆的, 而且几次重传中码元出错是独立事件, 那么几次重传中, 在码字的同一位置连续出错的概率是很低的. 在文章[5]中提到了表决方法, 当一个码字重传了三次或者三次以上仍然存在差错, 可以用表决方法生成一个新的码字, 将不同次接收到的码字在相同位置上的码元进行比较, 取出现次数最多的值作为新码字在该位置上的码元. 这个新的码字相对前几次接收的码字有较低的差错概率.

3.3 基于截止时间松弛度的变冗余度编码策略

截止时间松弛度描述具有时间约束的码字在当前时刻距离最后活动期限的时间长短, 也可以称为截止时间疏密度. 一般情况下, 发生传输错误后, 发送方总是重传同样的码字, 不去考虑码字的有效传输截止时间是否逼近, 或者信道的性能是否变坏. 而

工业环境受各种干扰影响严重,信道特性波动厉害,如果用固定冗余度的编码方案,如果冗余度高的话,在信道特性较好的情况下造成不必要的带宽浪费,如果选择低冗余度的编码方案,在信道特性变坏情况下,传输可靠性降低,纠错能力不够,很可能导致多次重传导致效率低下.我们提出基于截止时间松弛度的变冗余度编码是一种自适应调整方法,当码字多次重传均出现错误,说明当前编码纠错能力太低,不能适合当前信道特性,改用高冗余的编码方案.至于在几次重传失败时开始使用高冗余的编码,以及冗余度的大小,是由传输截止时间、当前信道特征和所要求的可靠性高低来决定.

3.4 面向工业控制环境无线实时通信系统协议描述

发送节点对要传输的信息码字进行CRC编码,然后以该码字为基础再生成包含纠错信息的低冗余的RS码.在RS编码前面加上码字长度字段,用于区分不同冗余度的编码.生成的码字经调制后发送到目的节点,在发送过程中信号受到各种干扰的影响,可能会产生畸变,目的节点通过解调得到接收码字,接收码字与发送的原始码字比较可能有一个偏差.接收节点首先取得码字长度字段,选择相应的RS译码方案.如果接收码字的出错码元的个数不超过RS码的纠错能力,则通过译码可以找到原始码字,译码正确.如果译码器在接收码字的纠错距离之内没有找到有效码字,译码失败,接收节点发送NAK的应答信号,通知发送节点接收出错,请求重传.还有一种情况是,如果传输错误较多,有可能译码后取得的码字不是发送的原始码字,译码错误.在译码成功和译码错误两种情况下,取RS码的信息码元部分做CRC校验,设计的CRC编码能校验出绝大多数传输差错,然后根据校验结果决定是否请求发送节点重传码字.经过几次重传反复后,接收节点仍没有得到正确信息,此时接收节点已收到几组有差错的码字,当重传次数是奇数且大于1时,接收节点使用表决方法试图从中取得正确信息.计算所有码字某一指定位置的1和0的个数,选择出现次数多的值作为新产生的码字相应位置的码元.对新码字译码,进行CRC校验,以决定是否请求重传,流程同上文一样.经过多次重传和表决仍然不能得到正确的码字,发送节点对信息重新编码加入更多冗余,生成高冗余的RS码发送,同样,前面加上长度字段.接收节点重复RS译码、检验过程.

4 性能分析(Analysis)

设发送节点要传输的信息码字长度 m ,生成的CRC校验码长度为 k ,伽罗华域 $GF(q)$ 上的RS码 C 的长度 n ,有 k 个信息码元,冗余值 $(n-k)$.RS码的最小距离为 d_{min} ,设接收节点收到的接收码字 C' ,码字传输过程中单个码元出错的概率是 p ,不同码元出错都是相互独立的.

传输码字中出错码元个数不超过RS编码的纠错能力,接收节点能正确译码,正确译码的概率是

$$P_c = \sum_{j=0}^{\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor} C_n^j p^j (1-p)^{n-j}$$

文献[6]给出了译码错误的概率,

$$P_e = \sum_{j=d_{min}}^n A_j \sum_{k=0}^{\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor} P_k^j$$

其中 A_j 是RS码中码重为 j 的码字个数, $A_j = C_n^j (q-1) \sum_{i=0}^{j-d_{min}} (-1)^i C_{j-1}^i q^{j-i-d_{min}}$, P_k^j 代表接收到的码与一个码重为 j 的码的海明距离为 k 的概率.

$$P_k^j = \sum_{r=0}^k C_j^k C_{j-r}^r p^{j-k+2r} (1-p)^{n-j+k-2r}$$

译码失败的概率为 $P_f = 1 - P_e - P_c$.

设CRC的检错成功概率 P_{CRC} ,则请求对方重传码字的事件包括译码失败和译码错误后被CRC校验出两种情况,概率是

$$P_f + P_e \cdot P_{CRC}$$

系统中,设计的CRC编码能检验出绝大差错,为了简化分析,可以认为 $P_{CRC} = 1$,则请求发送方重传的概率是 $1 - P_c$.

发送方经过 d 次重传后,接收方不能正确接收的概率是 $\bar{P}_{dc} = (1 - P_c)^d$,能正确接收的概率是 $P_{dc} = 1 - (1 - P_c)^d$.

设取 d 组码字用于表决策略, d 为奇数且大于1,且每个码字的误码元大于 $\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor$,来计算使用表决方法能取得正确码字的概率,这是一个条件概率.

先求下面事件的概率:码字的某一指定的码元出错且码字的总的误码个数大于 $\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor$.

$$\begin{aligned} P_{be} &= P \sum_{j=\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor+1}^n C_{n-1}^{j-1} p^{j-1} (1-p)^{(n-1)-(j-1)} \\ &= \sum_{j=\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor+1}^n C_{n-1}^{j-1} p^j (1-p)^{(n-j)} \end{aligned}$$

在已知码字误码元个数大于 $\lfloor (d_{min}-1)/2 \rfloor$ 条件下,任一码元出错的概率

$$P_{bec} = \frac{P_{be}}{P_c} = \frac{\sum_{j=[(d_{min}-1)/2]+1}^n C_{n-1}^j p^j (1-p)^{(n-j)}}{\sum_{j=[(d_{min}-1)/2]+1}^n C_n^j p^j (1-p)^{(n-j)}}$$

对该指定位置,采用的是多数决定的表决原则,则表决后指定码元出错的概率是

$$p_{vbe} = \sum_{j=(d+1)/2}^d C_d^j p^j (1-p_{bec})^{(d-j)}$$

则整个码字表决后,错误码字大于 $[(d_{min}-1)/2]$,也就是不能正确译码的概率

$$\bar{P}_{vc} = \sum_{j=[(d_{min}-1)/2]+1}^n C_n^j p^j (1-p_{vbe})^{(n-j)}$$

通常情况下, $P_{bec} \ll 0.5$,这样有 $P_{vbe} < P_{bec}$,所以表决方案能够减少差错率。

经过多次重传和表决方案仍然不能得到正确的信息,发送节点发送高冗余的 RS 编码,设码长 n' ,编码的最小距离是 d_{min}' 。

$$P_{bc} = \sum_{j=0}^{[(d_{min}'-1)/2]} C_{n'}^j p^j (1-p)^{(n'-j)}$$

高冗余的 RS 编码在信道不好时能够更好的纠错性能,虽然发送码字变长了,但是出错重传可能性降低了,在干扰严重情况下实时性能较低冗余 RS 编码要好。

5 小结(Conclusion)

本文提出的新的无线实时通信混合编解码方法,能有效的提高传输的实时性和可靠性。其中的表决策略,在不耗费额外带宽的情况下,从已有出错信息中尝试正确解码。而基于截止时间松弛度的编码方法能根据环境具体情况自适应改变编码冗余度,

特别适合工业环境信道特征波动情况。新的编解码策略目的是在干扰环境和有限带宽下,保证实时性的前提下使信号传输的可靠性尽可能大。编码的冗余度选择是和传输截止时间、当前信道特征和所要求的可靠性都相关,本文只给出了一个定性的描述,冗余度大小定量分析可以进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- 1 郭 峰, 曾兴雯, 刘乃安, 马义广. 无线局域网[M]. 电子工业出版社, 1997
- 2 Cavalieri S, Panno D. A novel solution to interconnect FieldBus systems using IEEE wireless LAN technology [J]. Computer Standards & Interfaces, 20, 1998: 9~ 23
- 3 Chao W, Stankovic J A, Ramamirtham K. A window protocol for transmission of time-constrained messages [J]. IEEE Transactions on Computers, 9, 1990: 1186~ 1203
- 4 Agrawal B, Chen B, Zhao W. Local synchronous capacity allocation for guaranteeing message deadlines with the time token protocol [A]. Proc INFOCOM[C], 1993: 186~ 193
- 5 Chase A. Code combining—a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets [J]. IEEE Transactions on Communications. 1985, COM-33(5): 385~ 393
- 6 Wicker S B. Error control systems of digital communication and storage [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc. 1995

作者简介

沈 钢(1975-), 博士研究生. 研究领域为工业控制网通信协议, 网络仿真.

蔡云泽(1975-), 博士研究生. 研究领域为智能控制、信号处理.

何 星(1969-), 副教授. 研究领域为智能控制, 工业控制组态软件.

(上接第 415 页)

14 S J Huang, K H Chiou. The Application of Neural Networks in Self-Tuning Constant Force Control. Int. J Mach. Tools Manufact., 1996, 36: 17~ 31

15 B Yoo, W Ham. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Nonlinear Systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1998, 6: 315~ 321

16 李 斌, 吴 波, 罗 欣, 杨叔子. 设备自律控制器的结构及其实现技术. 中国机械工程, 1998, 9(5): 36~ 38

作者简介

温 度(1975-), 女, 博士研究生. 研究领域为智能制造系统及其智能控制, 智能制造, 数据挖掘, 元学习等.

陈统坚(1936-), 男, 博士生导师. 研究领域为制造系统的计算机控制, 智能控制等.

彭永红(1967-), 男, 博士, 副教授. 研究领域为智能制造系统及其智能控制, 人工智能, 模糊与神经网络、数据挖掘.