

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.03.007

引用格式:陈胜男,雷维嘉,王音.一种数据包合并跨层优化编码方案[J].电讯技术,2015,55(3):270-274. [CHEN Shengnan, LEI Weijia, WANG Yin. A Cross-layer Optimization Coding Scheme Based on Data Packets Merge[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(3):270-274.]

一种数据包合并跨层优化编码方案*

陈胜男**,雷维嘉,王 音

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

摘 要:在传统分层系统中,信息数据包首先在数据链路层进行数据包级的检错码编码,然后一个数据包对应一个信息分组在物理层进行符号级的纠错码编码,最后送入信道中传输。为提高系统的传输效率,提出了一种基于数据包合并的物理层与数据链路层编码的跨层优化方案,即数据链路层的多个数据包合并对应物理层的一个信息分组,然后进行纠错编码后再传输。通过理论推导得出了使系统传输效率最大的最优合并数据包个数和数据包长度表达式。通过仿真验证了理论推导的正确性,并与传统方案进行了比较,结果表明,该方案能有效提高系统的传输效率。

关键词:跨层优化编码;纠错编码;数据包合并;传输效率

中图分类号:TN919.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)03-0270-05

A Cross-layer Optimization Coding Scheme Based on Data Packets Merge

CHEN Shengnan, LEI Weijia, WANG Yin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts
and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In a conventional layered system, data packets are firstly encoded by packet-level error detection code in the data link layer. Then a data packet corresponding to an information block is encoded by symbol-level error correction code in the physical layer. Finally, the data packets are transmitted in channels. In order to improve the transmission efficiency of system, this paper proposes a cross-layer optimization scheme of the physical layer and data link layer coding based on data packets merge. Namely multiple packets of data link layer merge and correspond to an information block of the physical layer, and then transmit after error correction coding. Furthermore, through theoretical deduction, the optimal number of merging packets and the best length of each packet are computed analytically when the transmission efficiency of system is maximal. Simulation results verify the accuracy of theoretical analysis, and show that the proposed scheme significantly improves the transmission efficiency of system compared with traditional scheme.

Key words: cross-layer optimization coding; error correction coding; data packets merge; transmission efficiency

1 引 言

在信息的传输中,目前最常用的差错控制方法

是混合自动请求重传(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)^[1]。在发送端,信息数据包首先在数

* 收稿日期:2014-10-13;修回日期:2015-01-13 Received date:2014-10-13;Revised date:2015-01-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471076,61271259,61301123);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1299);重庆市科委重点实验室专项经费项目
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61471076,61271259,61301123); Project of Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China(IRT1299); Key Research Special Foundation from Chongqing Science and Technology Committee
** 通讯作者:861845789@qq.com Corresponding author:861845789@qq.com

据链路层进行数据包级的检错码编码,然后一个数据包对应一个信息分组在物理层进行符号级的纠错码编码,最后送入信道中传输。在接收端,首先在物理层对接收到的信息数据包进行纠错码译码,尽量纠正在无线信道传输过程中引入的错误。然后在数据链路层进行差错校验以检验信息数据包是否接收正确。如果信息数据包接收正确,接收端向发送端发送正确接收信号(ACK),发送端继续发送下一个信息数据包;如果检验出接收到的信息数据包含有错误信息,则丢弃该信息数据包或者保存该信息数据包,然后向发送端发送接收错误信号(NAK),发送端根据预先确定的传送方案重新发送该信息数据包的信息。常用的检错码有循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)、奇偶校验码,纠错码有卷积码、RS 码、Turbo 码、低密度奇偶校验(Low Density Parity Check Code, LDPC)码等。

近年来,有很多文献对跨层设计方案^[2-6]进行了研究,然而这些研究都是在一个数据链路层的数据包对应物理层的一个信息分组的基础上进行的。此外,数据包合并的思想也在很多方面得到了应用。在 Type-III 型 HARQ 中,接收错误的数据包并不会被丢弃,接收机会将其存储起来与后续的重传数据包合并后进行解码。在这种方案中,每次重传的数据包携带的用户信息是相同的,数据包是在收端译码前进行组合^[7]。数据包合并是在无线传感器网络中也是一种有效的数据融合算法。其中典型的数据包合并算法 AIDA(Application Independent Data Aggregation)实质上是在 MAC 层与网络层之间加入了一个数据融合层进行数据包合并的操作。通过数据包合并,AIDA 能够有效地减少网络中的数据传输量,降低无线信道中发生冲突的可能性。

由信道编码定理可知,对于物理层的纠错编码而言,信息分组越长,纠错能力越好,误比特率越低。但是,对于数据链路层而言,每个数据包的长度越长,在一定的误比特率下,误包率也越大。因此针对误比特率和误包率的要求在分组长度的设置上存在矛盾。为解决这个问题,文献[8]提出了一种使用 Turbo 码作为前向纠错码的 HARQ 的差错控制方法,通过数据包合并改变 Turbo 码的交织长度。当某个数据包重传次数超过最大重传次数时,将该数据包和其后续的数据包在添加 CRC 校验码之前或之后进行合并,合并后的数据包含有一组或两组独立的 CRC 校验码,然后再进行 Turbo 编码并发送。接收端对合并后的数据包进行解码。通过数据包的

合并,交织长度增加,可改善 Turbo 码的译码性能,从而提高 HARQ 系统正确接收的概率,减少数据包的平均重传次数。

文献[8]中的方法是在传输错误后进行处理,而本文针对数据长度上误比特率和误包率的矛盾,提出一种跨层优化编码方案,打破传统分层系统中一个数据链路层的数据包对应一个物理层的编码分组的约束,将数据链路层的多个数据包合并对应物理层的一个信息分组进行纠错码编码。这样,增加了物理层的信息分组长度,因而能降低误比特率。同时,数据链路层的包长并未增加,误包率不会因此增大,反而会因为误比特率的下降而下降。

数据链路层的数据包中除信息外,还存在包传输所需要的控制信息和包数据的校验信息等开销,数据包的长度越短,开销越大,因此数据包的长度不能太短。显然,在一定的信道条件下,存在一个最优的数据包长度和数据包的合并编码方案。本文从提高系统传输效率的角度出发,对基于数据包合并的物理层与数据链路层编码的跨层优化方案进行分析,通过理论推导给出系统传输效率最大时的数据链路层数据包长度值和合并的数据包个数,并通过仿真来验证所提方案的性能和理论分析的结论。

2 跨层优化编码方案

假设要传输的信息总长度为 M bit。数据链路层对信息进行分组并加上包头信息、校验位信息等控制用的冗余信息。设每个数据包的长度为 k bit,其中的冗余信息长度为 r bit,则每个数据包可传输的信息长度为 $m=k-r$ bit。传输 M bit 的信息需要的数据包数为

$$N_p = \frac{M}{m} = \frac{M}{k-r} \quad (1)$$

为简单起见,这里假设 M 能被 m 整除。

假设数据包经过物理层的纠错编码,并经过信道传输后,接收端对接收码字进行译码后的误比特率为 P_{eb} ,则数据链路层数据包的误包率为^[9]

$$P_{ep} = 1 - (1 - P_{eb})^k \quad (2)$$

可见,缩短数据包的长度和降低误比特率均能降低误包率。而增加物理层纠错编码的码长可有效降低误比特率。

数据链路层在对接收到的数据包进行校验后,如果接收错误则请求发送端重传。为正确传输 N_p 个数据包,在误包率为 P_{ep} 时,发送端共需发送的数据包的数量的平均值为

$$N_{pt} = \frac{N_p}{1-P_{ep}} = \frac{N_p}{(1-P_{eb})^k} = \frac{M}{(1-P_{eb})^k(k-r)} \quad (3)$$

定义系统传输效率 η 为需要传输的原始信息比特数与在信道上实际传输的比特数的比值,即平均每个信道比特中所传输的信息量,实际上这也是一种吞吐量的评价方式。根据前面的分析,可得

$$\eta = \frac{M}{N_{pt} \times k} = \frac{M}{\frac{M \times k}{(1-P_{eb})^k(k-r)}} = \frac{(1-P_{eb})^k(k-r)}{k} \quad (4)$$

观察上式可知,随着误比特率的下降,传输效率将会增大。虽然通过采用低阶的调制方式或降低编码的码率等手段也可降低误比特率,但传输效率会相应下降,而通过增加码长并不会降低传输效率。本文从码长这个角度出发,通过尽量加长物理层纠错编码的码长,降低误比特率。而数据包长度 k 对传输效率的影响则不是单调的。 k 越小,虽然可以减小误包率,减少数据包的重传次数,但是会导致每个数据包中信息所占的比重减小,每个包的传输效率下降。因此,当每个数据包的冗余位长度 r 和物理层的误比特率 P_{eb} 一定时,一定有一个使得系统效率最高的最佳数据包长度。

对式(4)求 η 关于 k 的一阶导数得

$$\frac{d\eta(k)}{dk} = (1-P_{eb})^k \ln(1-P_{eb}) + \frac{r}{k^2} (1-P_{eb})^k - \frac{r}{k} (1-P_{eb})^k \ln(1-P_{eb}) = (1-P_{eb})^k \left[\ln(1-P_{eb}) - \frac{r}{k} \ln(1-P_{eb}) + \frac{r}{k^2} \right] \quad (5)$$

由于 $k>0, (1-P_{eb})^k>0$, 所以 $\eta(k)$ 的极值点满足方程

$$\ln(1-P_{eb}) - \frac{r}{k} \ln(1-P_{eb}) + \frac{r}{k^2} = 0 \quad (6)$$

解方程(6)得

$$k^* = \frac{r \pm \sqrt{r^2 - 4r/\ln(1-P_{eb})}}{2} \quad (7)$$

k^* 必须是一个正数。由于 $\ln(1-P_{eb})<0$, 故 $r^2 - 4r/\ln(1-P_{eb}) > r^2$, 因此只能取 $k^* = \frac{r + \sqrt{r^2 - 4r/\ln(1-P_{eb})}}{2}$ 。为确定该极值点为极大值点,求在 k^* 处 η 关于 k 的二阶导数:

$$\frac{d^2\eta(k)}{dk^2} = (1-P_{eb})^k \ln(1-P_{eb}) \times$$

$$\left[\ln(1-P_{eb}) - \frac{r}{k} \ln(1-P_{eb}) + \frac{2r}{k^2} \right] - \frac{2r}{k^3} (1-P_{eb})^k \quad (8)$$

由于 $k^* > r, \ln(1-P_{eb}) < 0$, 观察该式可知 $\frac{d^2\eta(k)}{dk^2} \Big|_{k=k^*} < 0$, 因此 k^* 为函数 $\eta(k)$ 的极大值。

虽然物理层的编码码字越长性能越好,但编译码复杂度(一般与码长为指数关系)和译码延时也越高。如果考虑到实际系统的译码复杂度和译码延时等,物理层的编码码字不宜取得过长。与常规方案相比,若采用的纠错编码方案相同,本文的方案在物理层上仅在纠错编码前增加了一个将多个数据链路层的数据包合并的环节,复杂度增加微乎其微,而译码延时则是一样的。对于数据链路层本文方案则没有任何复杂度的增加。因此,与常规方案相比,在码字长度和码率相同的条件下,本文提出的方案能在编译码复杂度、译码延时等性能指标不变的情况下有效地提高系统的传输效率。

假设由于受到编译码复杂度和译码延时的限制,物理层纠错编码的一个码字长度为 N , 码率为 R , 则一个码字传输的信息长度为 $K=RN$ 。此时,物理层的误比特率为 P_{eb} 。我们的跨层优化编码方案突破一个数据链路层的数据包对应物理层上一个码字的限制,而是多个数据链路层的数据包合并后再进行纠错编码。数据链路层的数据包长度应能整除 K , 因此最优的数据包长度 k_{opt} 应是 K 的因子中最接近由式(7)得到的 k^* 的一个因子。这样,合并进行物理层纠错编码的数据链路层的数据包数为

$$n_p = \frac{K}{k_{opt}} \quad (9)$$

此时,传输效率达到最大:

$$\eta_{max} = \frac{(1-P_{eb})^{k_{opt}}(k_{opt}-r)}{k_{opt}} \quad (10)$$

3 性能分析与仿真

为验证理论分析的结果,以及本文所提跨层编码方案的性能,我们采用 LDPC 码作为物理层的纠错编码,对所提方案进行了 Matlab 仿真分析。LDPC 码是一类具有稀疏校验矩阵的线性分组码^[10],它具有逼近 Shannon 限的良好性能、译码复杂度较低、结构灵活等特点,而且码长对译码性能影响很大。图 1 为三种不同长度的 LDPC 码的误码率仿真结果,编码码率均为 0.5,采用 BPSK 调制。其中码长 504

和 1008 的编码是行重 6、列重 3 的规则码,码长 64 800 的编码是 DVB-S.2 标准中采用的非规则 LDPC 码。可见,编码码字长度增加,编码的性能改善明显,误比特率显著下降。

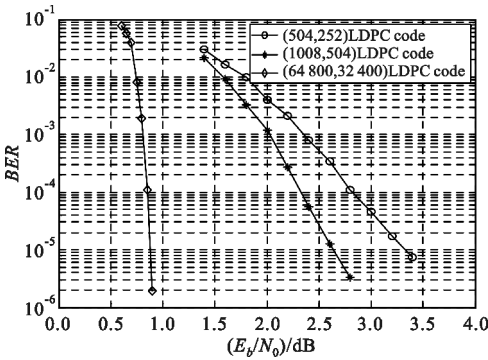
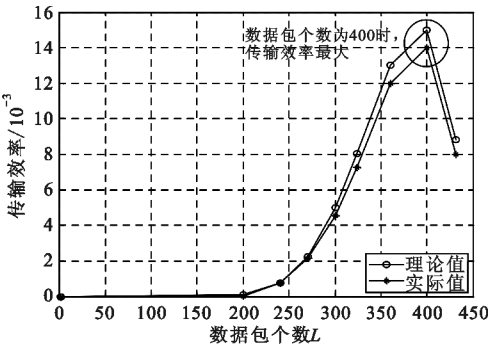


图 1 LDPC 码的误比特率
Fig.1 Bit error rate of the LDPC code

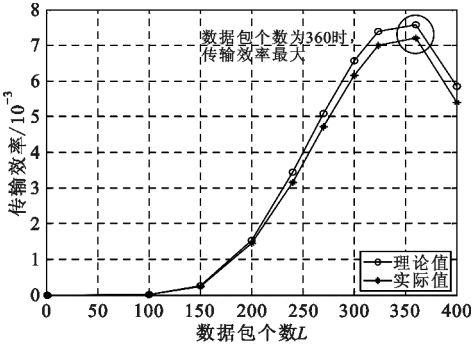
仿真中纠错编码采用码长 64 800、码率为 0.5 的 LDPC 编码,信息长度 $K=32\,400$ bit。采用 BPSK 调制方式。数据链路层上,一个数据包中的冗余位长度固定为 $r=72$ bit(其中包括 9 bit 的数据包序号、15 bit 的数据长度指示和 48 bit 的 CRC 校验位)。实际中,信噪比信息通过接收端进行估计,然后通过反馈信道反馈给发送端。发送端根据 LDPC 码在不同信噪比下的误比特率,在 K 的因子中找出最接近式 (7) 计算结果的一个因子作为最优的数据链路层分组长度 k_{opt} ,相应由式 (9) 计算得到一个码字对应的数据包个数 n_p ,如表 1 所示。

表 1 $K=32\,400$ 时,不同信噪比下的最优的数据链路层分组长度 k_{opt} 和一个码字对应的数据包个数 n_p			
Table 1 The optimal packet length k_{opt} and the number of packets n_p corresponding to a codeword with different SNRs ($K=32\,400$)			
$(E_b/N_0)/\text{dB}$	P_{eb}	k_{opt}	n_p
0.60	7.83×10^{-2}	81	400
0.65	6.18×10^{-2}	81	400
0.70	3.57×10^{-2}	90	360
0.75	1.32×10^{-2}	120	270
0.80	1.40×10^{-3}	270	120
0.85	2.33×10^{-4}	600	54
0.90	1.95×10^{-6}	6480	5

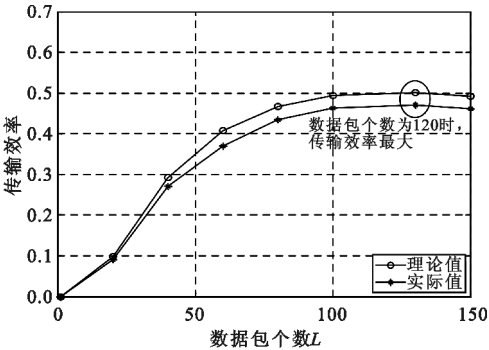
图 2 分别给出了信噪比 E_b/N_0 为 0.6 dB、0.7 dB、0.8 dB、0.9 dB 时不同的合并数据包个数对应的传输效率的理论分析和仿真的结果。结果显示,最佳的传输效率确实在理论分析得到的最佳的数据包合并数下得到。



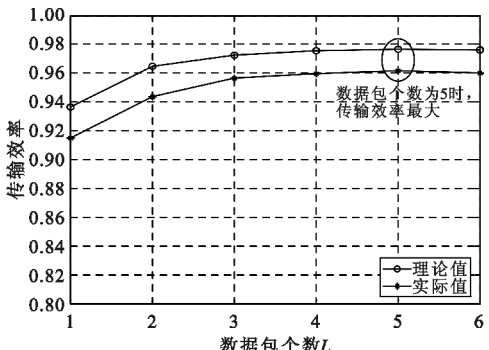
(a) $E_b/N_0=0.6\text{ dB}$



(b) $E_b/N_0=0.7\text{ dB}$



(c) $E_b/N_0=0.8\text{ dB}$



(d) $E_b/N_0=0.9\text{ dB}$

图 2 不同数据包个数对应的传输效率
Fig.2 The transmission efficiency with different number of packets

图 3 中的实线给出了根据式 (10) 计算得到的最优传输效率的理论值和仿真得到的传输效率值,

虚线为数据链路层的数据包个数为 1 (即传统的一个数据链路层的数据包对应物理层的一个信息分组) 时的最优传输效率的理论值和仿真得到的传输效率值。随着信噪比的增加, 传输效率增大。理论值和仿真值非常接近, 说明理论分析是正确的。显然, 本文提出的方案较传统的方案能够有效地提高系统的传输效率。

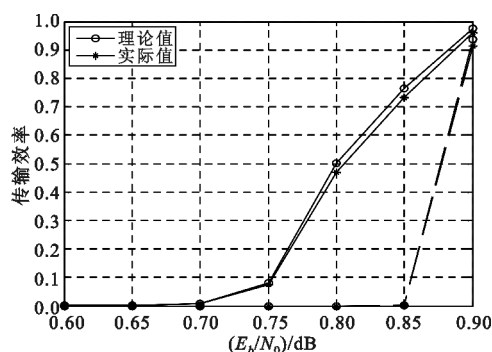


图3 不同信噪比下的传输效率

Fig. 3 The transmission efficiency with different SNRs

4 结束语

目前的跨层设计方案研究都是在一个数据链路层的数据包对应物理层的一个信息分组的基础上进行的。本文考虑在一定的信道质量下 (即特定的信噪比下), 数据链路层和物理层编码码长的优化选择问题。从数据包合并的角度出发, 提出将数据链路层的多个数据包合并对应物理层的一个信息分组, 然后进行纠错编码后再送入信道中传输。仿真结果表明, 通过文中推导得出的最优合并数据包个数和数据包长度进行数据包合并再传输, 与传统方案相比, 在码字长度和码率相同的条件下, 本文提出的方案能在编译码复杂度、译码延时等性能指标不变的情况下有效地提高系统的传输效率。在后续研究中, 可以进一步考虑编码码率不定时数据链路层和物理层的最佳冗余分配。

参考文献:

- [1] Lin S, Costello D J. 差错控制编码[M]. 晏坚, 何元智, 潘亚汉, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Lin S, Costello D J. Error control coding[M]. Translated by YAN Jian, HE Yuanzhi, PAN Yahan, et al. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Moghaddam M S, Khalaj B H, Pasandshanjani E. Cross-layer rateless coding over wireless relay network[C]// Proceedings of 2011 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Istanbul: IEEE, 2011: 1545-1549.
- [3] Berger C R, Zhou S L, Wen Y G, et al. Optimizing joint erasure- and error-correction coding for wireless packet

transmissions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4586-4595.

- [4] Courtade T A, Wesel R D. A cross-layer perspective on-rateless coding for wireless channels[C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Communications. Dresden: IEEE, 2009: 1-6.
- [5] Wang Y, Lei W J, Xie X Z. An H-ARQ transmission scheme based on rateless code[C]// Proceedings of 2013 International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou: IEEE, 2013: 201-204.
- [6] 杨静, 朱春华, 王珂. 多跳分集系统中一种新的基于无比率编码的跨层方案[J]. 电讯技术, 2012, 52(4): 492-496.
YANG Jing, ZHU Chunhua, WANG Ke. Cross-layer design based on rateless codes in multihop diversity systems [J]. Telecommunications Engineering, 2012, 52(4): 492-496. (in Chinese)
- [7] 李金磊. OFDM/MIMO-OFDM 系统中 HARQ 合并技术研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2011.
LI Jinlei. Research of HARQ combining techniques in OFDM and MIMO-OFDM systems[D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 魏岳军. 通过合并数据包改变交织长度的信息重传方法; 中国, 01117760. 8[P]. 2002-12-18.
WEI Yuejun. A retransmission method of changing interleave length by merging data packets: China, 01117760. 8 [P]. 2002-12-18. (in Chinese)
- [9] Mitra A. A PHY-MAC cross layer design for low PER with adaptive modulation and coding[C]// Proceedings of 2010 International Workshop on Cognitive Radio. Bangalore: IEEE, 2010: 1-5.
- [10] Gallager R G. Low-density parity-check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.

作者简介:



陈胜男 (1993—), 女, 安徽宿州人, 2013 年于重庆邮电大学获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为物理层安全及无率码编码;

CHEN Shengnan was born in Suzhou, Anhui Province, in 1993. She received the B. S. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2013. She is now a graduate student. Her research concerns physical security and rateless coding.

Email: 861845789@qq.com

雷维嘉 (1969—), 男, 云南元谋人, 博士、教授, 主要研究方向为无线和移动通信技术;

LEI Weijia was born in Yuanmou, Yunnan Province, in 1969. He is now a professor with the Ph. D. degree. His research concerns wireless and mobile communication technology.

Email: leiwj@cqupt.edu.cn

王 音 (1987—), 女, 河南濮阳人, 重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为协作编码。

WANG Yin was born in Puyang, Henan Province, in 1987. She is now a graduate student. Her research concerns cooperative coding.

Email: 599262926@qq.com