

无线 ATM 系统的混合纠错方案及其 在突发信道上的性能分析¹

李立忠 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

摘要 本文提出了一种适用于无线 ATM 系统的混合纠错方案: 用 RS 码保护语音信号, 用截短 RS/ 混合 II 型 ARQ 保护图像和数据. 文中分析和仿真了这一混合纠错方案在突发信道上的性能. 结果表明, 利用 RS 码强的纠错能力, 通过有限次的重传就可获得低的信元丢失率和传输时延.

关键词 无线 ATM, ARQ, RS 码, 码组合

中图分类号 TN929.5, TN919.4

1 引言

无线 ATM(W-ATM) 是对 ATM 网络的无线扩展^[1]. 由于标准的 ATM 基于低误码率的光纤链路, 因此只在信元头含能纠 1bit 误码的头差错控制(HEC). 与光纤链路相比, 无线信道的误码率很高, 且随机错和突发错都存在. 因此在 W-ATM 协议栈中, 需加入必要的 LLC(Logical Link Control) 层对 W-ATM 信元进行误码保护, 才能满足服务质量(QoS). 进行差错控制的主要方法是 FEC(Forward Error Correction)、ARQ(Automatic Repeat Request) 及其混合型^[2]. 一般地, ARQ 及其混合型可获得比 FEC 更高的系统可靠性, 但传输时延很大. 为了减小 ARQ 系统的传输时延, 需限定最大允许的重传次数^[3].

W-ATM 系统可支持语音、图像、数据等多种业务, 每一种业务对时延、信元丢失率等的要求不一样, 因此不能采用单一的纠错方法. 文献[4]讨论了 W-ATM 中的可变速率 FEC 方式; 文献[5]中, W-ATM 协议栈的低层采用卷积码与 BCH 码构成的级连码, 以满足语音和图像的 QoS 要求, 在协议栈的高层用 ARQ 来保证数据的 QoS; 文献[6]提出为每个虚拟电路(VC) 都建立一个 ARQ 单元, 以便根据各 VC 所需的 QoS 分别进行差错控制. Wicker 等人^[7,8] 组合 RS 码与 SR-ARQ(选择重传) 给出了高可靠性的 RS/ 混合 II 型 ARQ 系统, 在此基础上, 我们提出一种混合纠错方案, 它可保证 W-ATM 系统上多种业务对 QoS 的不同要求. 本文首先对混合纠错方案进行详细描述, 然后分析了这一方案在突发信道上的性能, 最后给出了数值仿真结果.

2 无线 ATM 系统的混合纠错方案

我们所建议的 W-ATM 系统采用蜂窝式的小区结构, 图 1 为其协议栈, 图 2 为其信元格式. 图 2 中, 地址信息被压缩成 9bit 的 VCI, 这样每个小区可以提供 512 个连接; 5bit 信元序列号 CSN(Cell Sequence Number) 可用在 ARQ 中以确定信元是否丢失; 3bit 业务类型 ST(Service Type) 用以区分语音、图像、数据, LLC 层可据此确定误码保护方式; 3bit

¹ 1998-05-12 收到, 1999-04-19 定稿

保留字 RES (Reserved) 用于越区切换控制或它用; 3bit 净荷类型 (PT) 和 1bit 信元丢失优先级 (CLP) 与标准 ATM 信头中的一致; 净荷被压缩成 16byte 以减小打包时延。

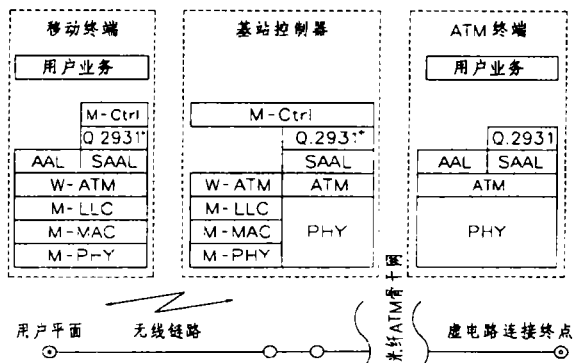


图 1 无线 ATM 协议栈

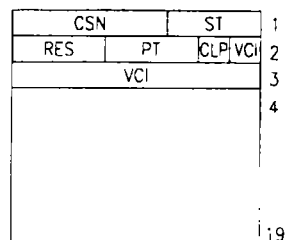


图 2 无线 ATM 信元格式

文献 [7,8] 组合 RS 码和 SR-ARQ 给出了高可靠性的 RS/ 混合 II 型 ARQ . 在此基础上, 我们根据不同业务对时延和信元丢失率的不同要求, 提出用截短 (truncated)RS/ 混合 II 型 ARQ 来对多种业务进行误码保护, 具体描述如下。

首先, 由于话音信号具有严格的时延限制, 因此不能采用重传方式, 而只能用 FEC , 如 GSM 中的非平衡 (unequal)FEC(即根据话音比特流中各比特对话音质量的不同贡献把比特分类, 每一类用不同的 FEC 进行保护)。在我们的纠错方案中, 话音只用 (n, k) RS 收缩码 C1 保护, 同时根据时延限制可加入适当深度的符号交织。这样 $(2n, k)$ RS 码 C3 的选择应使得由它收缩得到的 (n, k) RS 码 C1 满足话音对信元丢失率的最低要求。

对图像这样的 VBR 业务, 因为要求较小的传输时延和中等程度的信元丢失率, 因此我们限定只重传一次。

数据业务大多对传输时延没有限制, 但高速数据 (如文本传输等) 则要求中等程度的时延。因此, 在我们的方案中, 数据业务在接入时把它允许的最大传输时延通过信令告知网管, 网管把这一最大时延按 ARQ 中的往返时间折合成重传次数。

为进一步提高 ARQ 系统在高信道误码率时的通过效率 (Throughput efficiency) , 可采用每分组跳频一次的慢跳频 ARQ(SFH/ARQ) 方式 [9] 。在后面对截短 RS/ 混合 II 型 ARQ 的分析中, 我们将假设每个分组用不同的频率传输, 这样分组与重传分组之间相互独立。

3 混合纠错方案在突发信道上的性能分析

文献 [7,8] 分析了多进制对称信道上 RS/ 混合 II 型 ARQ 的性能。下面, 我们将对截短 RS/ 混合 II 型 ARQ 在突发信道上的性能进行分析。

对有限域 $GF(2^m)$ 上的 (n, k) RS 码, 其纠错能力为 $t = \lfloor (n - k)/2 \rfloor$, $\lfloor x \rfloor$ 表示小于等于 x 的最大整数。设 $P_j = P(j, n)$ 为传输 n 个符号的分组时出现 j 个符号错的概率, 则如果对 (n, k) RS 码进行 BDD (Bounded Distance Decoding) 译码, 正确译码的概率为

$$P_{cd} = \sum_{j=0}^t P_j. \quad (1)$$

对突发信道, 错误符号之间具有一定的相关性, 文献 [10] 给出了这种情况下的译码错误 (decoding error) 概率 P_{de} . 因此译码失败 (decoding failure) (即检测到有误差发生) 的概率为

$$P_{df} = 1 - P_{cd} - P_{de}. \quad (2)$$

对有限域 $GF(2^m)$ 上的 (n, k) RS 码, 在冗余符号数较大的情况下, 译码错误可以忽略, 则 $P_{df} \approx 1 - P_{cd}$.

RS/混合 II 型 ARQ 中, $(2n, k)$ RS 码码字 c_3 由 (n, k) RS 码码字 c_1 和 c_2 组合而成. 若 c_1 中的符号错都可被纠正 (即 c_1 中符号错的个数 t_1 满足 $0 \leq t_1 \leq t$), 或者 c_1 中出现不可纠正符号错 (即 $t+1 \leq t_1 \leq n$) 但重传的码字 c_2 中的符号错都可被纠正 (即 c_2 中符号错的个数 t_2 满足 $0 \leq t_2 \leq t$), 则不出现对 c_3 进行译码的情况, 这相当于码字 c_3 中无符号错误. 若出现对 c_3 进行译码的情况, 则表明对码字 c_1 不能正确译码且已请求重传, 即 t_1 满足 $t+1 \leq t_1 \leq n$; 同时重传的码字 c_2 也不能正确译码, 即 t_2 满足 $t+1 \leq t_2 \leq n$. 前面已假设每个分组用不同的频率传输, 则 c_1 和 c_2 彼此独立, 因此我们可得到 c_3 中错误符号的概率分布:

$$P(0, 2n) = P_{cd} + P_{cd} \sum_{j=t+1}^n P(j, n); \quad (3a)$$

$$P(i, 2n) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 2t+1; \quad (3b)$$

$$P(2t+m, 2n) = \sum_{j=1}^{m-1} P(t+j, n)P(t+m-j, n), \quad m = 2, 3, \dots, 2n-2t. \quad (3c)$$

(3a) 式中 P_{cd} 为 (n, k) RS 码 c_1 、 c_2 正确译码的概率; 当 $j > n$ 时, $P(j, n) = 0$.

令 P_{cd} 、 P_{df} 、 P_{de} 分别为 (n, k) RS 码 C_1 、 C_2 的正确译码、译码失败、译码错误的概率; P_{cd3} 、 P_{df3} 、 P_{de3} 分别为 $(2n, k)$ RS 码 C_3 的正确译码、译码失败、译码错误的概率. 进一步假设反馈信道无误码, 且 SR-ARQ 具有无限长缓存器. 考虑到 C_1 、 C_2 、 C_3 的译码错误概率很小, 则我们可以得到 N 次重传 RS/混合 II 型 ARQ 的平均传输次数 T 、分组错误率 PER(Packet Error Rate) 和通过效率 η :

$$\begin{aligned}
 T &= 1 \cdot P_{cd} + 2 \cdot P_{df}(P_{cd} + P_{df}P_{cd3}) + 3 \cdot P_{df}^2 P_{df3}(1 - P_{df}P_{df3}) \\
 &\quad + \cdots + (N-1) \cdot P_{df}^{N-2} P_{df3}^{N-3}(1 - P_{df}P_{df3}) + N \cdot P_{df}^{N-1} P_{df3}^{N-2} \cdot 1 \\
 &= 1 + \sum_{i=1}^N P_{df}^i P_{df3}^{i-1}, \tag{4}
 \end{aligned}$$

$$\text{PER} = P_{df}^{N+1} P_{df3}^N + TP_{de} + \sum_{i=1}^{N-1} P_{df}^{i+1} P_{df3}^{i-1} P_{de3}, \tag{5}$$

$$\eta = \frac{1}{T} \times \frac{k}{n} = \frac{k}{nT}. \tag{6}$$

设往返时延 (round-trip delay) 为 T_{rd} ，且单边传输时延 (one-way delay) t_0 正好是往返时延的一半，即 $T_{rd} = 2t_0$ ，则 N 次重传 RS/ 混合 II 型 ARQ 的平均传输时延为

$$E[D] = 2t_0 T - t_0. \tag{7}$$

可以证明，当最大允许重传次数 N 趋于无穷大时，(5)、(6) 式分别与文献 [7] 中第 130 页的 (4)、(3) 式一致。

4 数值仿真结果

基于前面的分析，本节我们给出一些数值仿真结果。进行数值仿真的前提是：

(1) 截短 RS/ 混合 II 型 ARQ 中，信息位数等于我们建议的 W-ATM 信元长度，即 $k=19$ ；如果经过 N 次重传后，W-ATM 信元仍有错，则丢弃信元，这样 W-ATM 信元丢失率即为 (5) 式中的分组错误率。

(2) MAC 层采用动态 TDMA 协议^[1]，该协议把 TDMA 信息时隙分成 CBR、VBR、ABR 三类；协议首先满足 CBR 业务接入，并可在多帧中预约 CBR 时隙，剩余的时隙动态地分给 VBR 和 ABR 业务；每一时隙传输一个分组。在我们的方案中，各种业务经 RS 编码后，分别送入 CBR、VBR、ABR 三类不同的缓存器，然后由对应的动态 TDMA 时隙送出；这样，可适当交织 CBR 缓存器中的话音业务。

(3) 用简化 Gilbert 模型^[11]来描述突发信道，且假设突发信道的平均突发长度为 10 个符号。

图 3 给出了 (31,19)RS 码在突发信道上的信元丢失率与交织度 (L) 的关系。可以发现，用 (31,19)RS 码，交织度 L 取 8，当符号错误率为 10^{-2} 时，信元丢失率约为 10^{-3} ，因此可以保证话音的通信质量。这里交织度取为 8 与 GSM 中的交织度一致。交织度的大小可随时延要求而定。如果衰落引起太长的突发错，RS 译码器发现分组内含不可纠正错误，则可用‘内插’的方式来进一步提高话音的质量，即利用 W-ATM 信元信头中的信元序列号 CSN，把出错的话音帧用 CSN 值相近的正确帧取代。

图 4 给出了 N 次重传 RS/ 混合 II 型 ARQ 在突发信道上的信元丢失率，其中，C1、C2 为 (31,19)RS 码，C3 为 (62,19)RS 码。可以看出：若限定重传次数为 1，当平均符号错误率为 10^{-2} 时，协议的信元丢失率约为 10^{-8} ，可以满足图像业务的误码要求；随着容许的

最大重传次数 N 的增大, 协议的信元丢失率迅速减小, 若 $N \geq 2$, 可满足数据对信元丢失率的要求. 图 4 中的误码平台是由 RS 码的译码错误概率引起的.

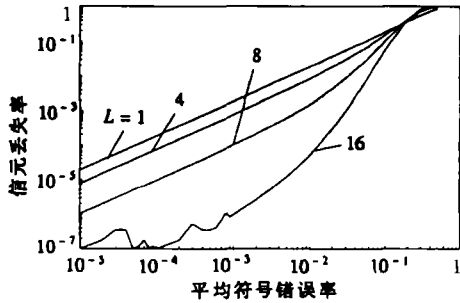


图 3 (31, 19)RS 码在交织信道上的性能

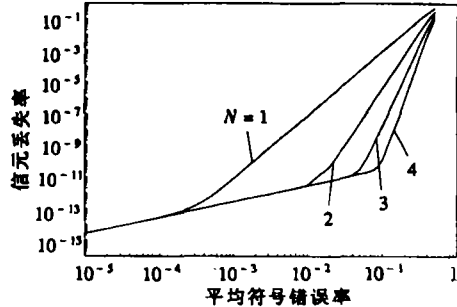


图 4 N 次重传 RS/ 混合 II 型 ARQ 在突发信道上的信元丢失率

图 5 和图 6 分别给出了 N 次重传 RS/ 混合 II 型 ARQ 在突发信道上的通过效率和传输时延(用单边时延 t_0 归一化). 可以看出, 当平均符号错误率较小时, RS 码强的纠错能力使得平均传输次数接近于 1, 即通过效率近似于 k/n , 平均传输时延近似于 t_0 ; 当平均符号错误率大于 0.1 时, 通过效率随 N 的增大而迅速减小, 平均传输时延随 N 的增大迅速增加; 若 N 限定为 1, 则通过效率随平均符号错误率的增大而趋近 $k/(2n)$, 这与文献 [3] 的结论一致.

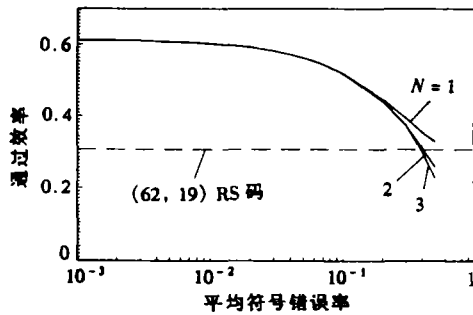


图 5 N 次重传 RS/ 混合 II 型 ARQ 在突发信道上的通过效率

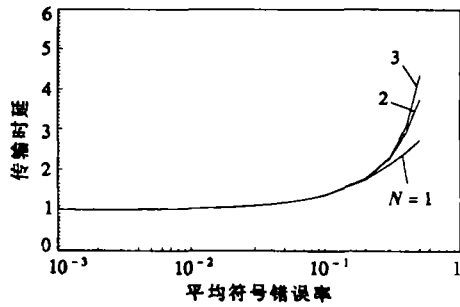


图 6 N 次重传 RS/ 混合 II 型 ARQ 在突发信道上的传输时延

5 结 论

本文提出了一种适用于 W-ATM 系统的混合纠错方案, 即用纯 FEC(RS 码) 保护语音信号, 用截短 RS/ 混合 II 型 ARQ 保护图像和数据. 文中分析了这一混合纠错方案在突发信道上的信元丢失率、通过效率、时延等特性, 并给出了数值仿真结果. 从中可以发现, 由于 RS 码具有很强的纠错能力, 通过有限次的重传就可达到很低的信元丢失率, 同时减小了因重传而引起的传输时延, 但这是靠牺牲系统的通过效率换来的.

参 考 文 献

- [1] Raychaudhuri D, Wilson N. ATM based transport architecture for multiservices wireless personal communication networks. *IEEE J. of Select. Areas. Commun.*, 1994, 12(8): 1401-1414.
- [2] Lin S, Costello Jr D J, Miller M J. Automatic-repeat request error control schemes. *IEEE Commun. Mag.*, 1984, 22(12): 5-17.
- [3] Yang Q, Bhargava V. Delay and coding gain analysis of a truncated Type-II hybrid ARQ protocol. *IEEE Trans. on Veh. Technol.* 1993, 42(1): 22-31.
- [4] Moore D, Rice M. Variable rate error control for wireless ATM networks. In: *Proc. IEEE ICC'95, Seattle, Washington: 1995, 988-992.*
- [5] Cheng F C, Holtzman M. Wireless intelligent ATM network and protocol design for future personal communication systems. *IEEE J. of Select. Areas. Commun.* , 1997, 15(7): 1289-1307.
- [6] 封 翔, 毕光国. 无线 ATM 网络的逻辑链路控制技术. *通信学报*, 1998, 19(1): 86-91.
- [7] Wicker S B, Bhargava V K. *Reed-Solomon Codes and Their Applications*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994, 125-149.
- [8] Wicker S B. Type II hybrid-ARQ protocols using punctured Reed- Solomon codes. In: *IEEE Proc. MILCOM'91, McLean, Virginia: 1991, 1229-1234.*
- [9] Guo N, Morgera S D. Frequency-hopped ARQ for wireless network data services. *IEEE J. of Select. Areas. Commun.* , 1994, 12(8): 1324-1337.
- [10] Gulliver T A, Jorgenson M, Moreland W K. Performance of Reed- Solomon codes with dependent symbol errors. *IEE Proc.- I*, 1996, 143(3): 117-121.
- [11] Yee J R, Weldon Jr E J. Evaluation of the performance of error-correcting codes on a Gilbert channel. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, 43(8): 2316-2323.

PERFORMANCE ANALYSIS OF
A HYBRID ERROR CONTROL SCHEME FOR
WIRELESS ATM SYSTEMS OVER BURSTY CHANNELS

Li Lizhong Li Lemin

(*National Key Laboratory on Broadband Communication, USETC, Chengdu 610054*)

Abstract This paper proposes a hybrid error control scheme suitable for wireless ATM systems, that is, voice telephone is protected by pure RS code, video and data are protected by truncated RS/Type II hybrid ARQ protocol. The performance of this hybrid error control scheme over bursty channels is analyzed and simulated. It is found that, by restricting numbers of retransmission, low transmission delay and cell loss rate can be obtained.

Key words Wireless ATM, ARQ, RS code, Code combining

李立忠: 男, 1967 年生, 博士生, 研究兴趣包括: 个人通信网络、ATM 网络互连技术、差错控制等.

李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究兴趣包括: 数字通信系统、宽带通信网络等.