

• 学术论文与技术报告 •

截短 RS/混合II型 ARQ 在衰落信道上的性能分析*

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】 分析了截短 RS/混合II型 ARQ 在无线衰落信道上的分组错误率、通过效率、传输时延等特性,给出了数值仿真结果。研究发现,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分组错误率,同时减小了因重传而引起的传输时延。

关键词 移动通信;自动重传请求;RS码;码组合

中图分类号 TN919.4; TN911.22

未来第三代地面数字移动通信系统(如 IMT-2000, UMTS 等)将可支持语音、图像和数据等多种业务。在多种业务中,语音和图像有严格的时延限制,而数据则要求很低的分组错误率。无线信道上,多径、阴影、多普勒效应等使信道误码率很高,且随机错和突发错都存在,因此必须进行有效的差错控制,才能满足服务质量 QoS(Quality of Service)。一般地,ARQ(Automatic-Repeat-Request)及其混合型可获得比 FEC(Forward Error Correction)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,必须限定最大允许的重传次数。近来,限定重传次数的截短 ARQ 在无线多媒体通信中得到了应用,如文献[1]建议用一次重传混合II型 ARQ 来保证无线语音通信的 QoS;文献[2]建议用 N 次重传混合II型 ARQ 来满足压缩图像对时延和分组错误率的要求。

RS 码具有很强的纠/检错能力^[3]。Wicker 等把 RS 码与 SR-ARQ(选择重传)相结合给出了高性能的 RS/混合II型 ARQ 系统^[4,5],并对其在多进制对称信道(M-ary symmetric channel)上的性能进行了分析。本文分析了截短 RS/混合II型 ARQ 在衰落信道上的性能,并给出了数值仿真结果。

1 RS/混合II型 ARQ

数据传输系统常用 ARQ 来获得高的可靠性^[6]。ARQ 可分为纯 ARQ 和混合型 ARQ。混合型 ARQ 由于采用纠错码来纠正经常出现的错误图样,因此在高信道误码率情况下可获得比纯 ARQ 更高的通过效率。

文献[4,5]利用码组合技术,结合 RS 码和 SR-ARQ 给出了 RS/混合II型 ARQ。其具体描述为:首先选择一低码速率 $(2n,k)$ RS 码记作 C_3 ,根据 RS 码的收缩性(即对 (n,k) RS 码的任意 j 次收缩得到 $(n-j,k)$ RS 码),通过对 C_3 连续 n 次收缩去掉后面 n 个符号得到一 (n,k) RS 码并记作 C_1 ;同样,通过对 C_3 连续 n 次收缩去掉前面 n 个符号得到一 (n,k) RS 码并记作 C_2 。RS 码的强可逆性(即码字中的任意 k 个符号都可通过逆运算恢复出信息符号)确保可由码字 c_1 、 c_2 或 c_3 中的 k 个符号恢复出所需要的信息符号。传输时, k 个符号的信息分组先由 C_1 、 C_2 分别编成码字 c_1 和 c_2 并存储起来。第一次传码字 c_1 ,若收端发现不可纠正误码,则保留 c_1 并请求重传。第二次传码字 c_2 ,若 c_2 中发现不可纠正误码,则 c_1 、 c_2 组合成低码速率 c_3 码进行译码,若 c_3 中含不可纠正误码,则保留 c_2 并请求重传。第三次传码字 c_1 ,若 c_1 中发现不可纠正误码,则前面的 c_2 与新的 c_1 组合成低码速率 c_3 码进行译码,若 c_3 中含不可纠正误码,则请求重传,这一过程交替进行下去。由于 RS 码具有很强的纠/检错能力,因此 RS/混合II型 ARQ 可提供较高的系统可靠性。

1998年7月15日收稿,1998年10月9日修改定稿

* 高校博士点专项科研基金资助项目,基金号:98061409

** 男 31岁 博士生

***男 66岁 大学 工程院院士 教授 博士生导师

对无线衰落信道上的 ARQ 系统, 如果采用比特/符号交织或在分组内使用跳频, 则系统的通过效率大大降低^[7]; 如果采用每分组跳频一次的 SFH/ARQ 方式, 则可大大提高系统在高信道误码率时的通过效率^[8]。在下面对截短 RS/混合II型 ARQ 的分析中, 我们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。

2 截短 RS/混合II型 ARQ 在衰落信道上的性能分析

文献[4,5]分析了多进制对称信道上 RS/混合II型 ARQ 的性能, 本文对截短 RS/混合II型 ARQ 在衰落信道上的性能进行分析。

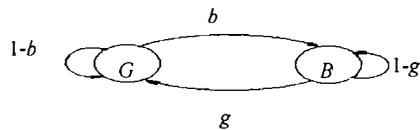


图1 两态 Gilbert 模型

2.1 Markov 信道模型

在无线信道上, 误码率或接收信号包络随时间而变化, 任一时刻信道的性能同前一时刻信道的条件有关。信道的这种记忆性可用 Markov 链描述, 其中如图 1 所示的两态 Gilbert 模型应用广泛^[8,9], M.Zorzi 等人对这一模型的准确性作出了评估^[10]。图中 G 代表信道处在低误码率 P_G 状态, B 代表信道处在高误码率 P_B 状态。两态 Gilbert 模型的状态转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1-b & b \\ g & 1-g \end{bmatrix} \quad (1)$$

这一模型常用于产生符号错误序列。对有限域 $GF(2^m)$ 上的 RS 码, Yee 等人给出一种简化 Gilbert 模型^[11], 即 $P_G \approx 0$, $P_B \approx 1$ 。在下面的分析中我们采用这种简化模型。简化 Gilbert 模型的稳态概率 π 、平均符号错误率 P_{av} 分别为

$$\pi = (\pi_G, \pi_B) = \left(\frac{g}{b+g}, \frac{b}{b+g} \right) \quad (2)$$

$$P_{av} = \pi_G P_G + \pi_B P_B = \frac{b}{b+g} \quad (3)$$

简化 Gilbert 模型的平均突发长度为 g^{-1} 。若设在一个符号的传输期间信道状态不发生变化, 文献[11]中式(19)给出了传输 n 个符号时出现 m 个符号错的概率 $P(m, n)$ 。

2.2 混合纠错方案在衰落信道上的性能分析

对有限域 $GF(Q=2^m)$ 上的 (n, k) RS 码, 其最小距离为 $d_{\min} = n - k + 1$; P 纠错能力为 $t = [(n - k) / 2]$, $[x]$ 表示小于等于 x 的最大整数; 设 A_j 表示重量为 j 的码字的个数, 则^[5]

$$A_j = \binom{n}{j} (Q-1) \sum_{i=0}^{j-d_{\min}} (-1)^i \binom{j-1}{i} Q^{j-d_{\min}-1} \quad (4)$$

式中 $j > 0$, $A_0 = 1$, $A_1 \sim A_{d_{\min}-1} = 0$ 。

令 $P_j = P(j, n)$ 为分组中出现 j 个符号错的概率, 则某一特定 j 个符号错出现的概率为

$$P'_j = \frac{P_j}{\binom{n}{j} (Q-1)^j} \quad (5)$$

如果对 (n, k) RS 码进行 BDD(Bounded Distance Decoding)译码, 则正确译码的概率为

$$P_{cd} = \sum_{j=0}^t P_j \quad (6)$$

错误符号间存在相关的情况下, 译码错误的概率为^[12]

$$P_{de} = \sum_{j=1}^n A_j \sum_{v=0}^i \sum_{l=0}^v P'_{j+l} \sum_{c=0}^v \binom{n-j}{c} \binom{j}{b} \binom{j-b}{c-i} (Q-1)^c (Q-2)^b \quad (7)$$

式中 $b = v - 2c + i$ 。而译码失败(即检测到有码字发生)的概率则为

$$P_{df} = 1 - P_{cd} - P_{de} \quad (8)$$

由式(7)不难发现,对 $GF(2^8)$ 上的 (n,k) RS 码,在冗余字节数较大的情况下,译码错误概率 P_{de} 可以忽略,则 $P_{df} \approx 1 - P_{cd}$ 。

RS/混合 II 型 ARQ 中, $(2n,k)$ RS 码 c_3 由 (n,k) RS 码 c_1 和 c_2 组合而成。若出现对 c_3 进行译码的情况,则表明 c_1 不能正确译码且已请求重传,同时重传的码字 c_2 也不能正确译码。上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,因此可得到 c_3 中错误符号的概率分布为

$$\begin{cases} P(0,2n) = P_{cd} + P_{cd} \sum_{j=t+1}^n P(j,n) \\ P(i,2n) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 2t+1 \\ P(2t+m,2n) = \sum_{j=1}^{m-1} P(t+j,n)P(t+m-j,n) \quad m = 2, 3, \dots, 2n-2t \end{cases} \quad (9)$$

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 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 C_3 的正确译码、译码失败、译码错误的概率。设反馈信道无误码,且考虑 C_1 、 C_2 、 C_3 的译码错误概率很小,则可以得到 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 为

$$\begin{aligned} T &= 1 \cdot P_{cd} + 2 \cdot P_{df} (P_{cd} + P_{df} P_{cd3}) + 3 \cdot P_{df}^2 P_{df3} (1 - P_{df} P_{df3}) + \\ &\dots + (N-1) P_{df}^{N-2} P_{df3}^{N-3} (1 - P_{df} P_{df3}) + N P_{df}^{N-1} P_{df3}^{N-2} = \\ &1 + \sum_{i=1}^N P_{df}^i P_{df3}^{i-1} \end{aligned} \quad (10)$$

$$PER = P_{df}^{N+1} P_{df3}^N + T P_{de} + \sum_{i=1}^{N-1} P_{df}^{i+1} P_{df3}^{i-1} P_{de3} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{1}{T} \times \frac{k}{n} = \frac{k}{nT} \quad (12)$$

设往返时延为 T_n , 且单边传输时延 t_0 正好是往返时延的一半,即 $T_n = 2t_0$, 则 N 次重传 RS/混合 II 型 ARQ 的平均传输时延为

$$E[D] = 2t_0 T - t_0 \quad (13)$$

可以证明,当 N 趋于无穷大时,式(11)、(12)分别与文献[5]中的式(4)、(3)一致。

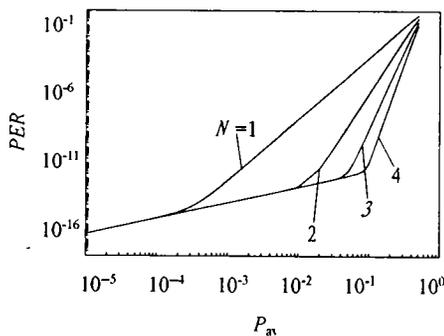


图 2 N 次重传 RS/混合 II 型 ARQ 在衰落信道上的分组错误率

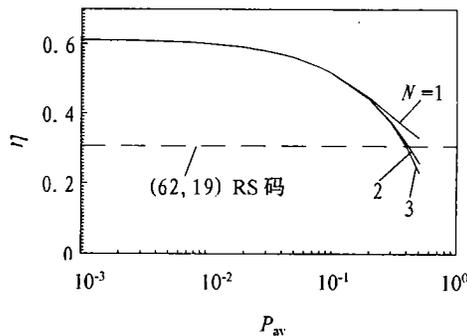


图 3 N 次重传 RS/混合 II 型 ARQ 在衰落信道上的通过效率

3 数值仿真结果

上面介绍的截短 RS/混合 II 型 ARQ 将用于无线 ATM 系统, 因此信息符号数 k 等于构造的无线 ATM 信元长度(19 字节); 同时, 在无线 ATM 系统中, 由于错误的语音分组不允许重传, 因此 $C1$ 或 $C2$ 的选择应满足语音对分组错误率的最低要求。在下面的仿真中, $C1$ 、 $C2$ 为有限域 $GF(2^8)$ 上的(31,19)RS 码, $C3$ 为(62,19)RS 码。

图 2 给出了 N 次重传截短 RS/混合 II 型 ARQ 在衰落信道($g=0.1$, 即平均突发长度为 10 个符号)上的分组错误率。不难发现, 随着允许的最大重传次数 N 的增大, 协议的分组错误率迅速减小。同时, 由于 RS 码强的纠错能力, 当信道平均符号错误率很高时, 仍可获得较低的分组错误率。如: 当平均符号错误率为 10^{-2} 时, 若 $N=1$, $PER \approx 7.3 \times 10^{-8}$; 若 $N=2$, $PER \approx 3.1 \times 10^{-12}$ 。可见, 若允许的最大重传次数 $N \geq 2$, 则可满足数据对分组错误率的要求。图 2 中的误码平台是由 RS 码的译码错误概率引起的。

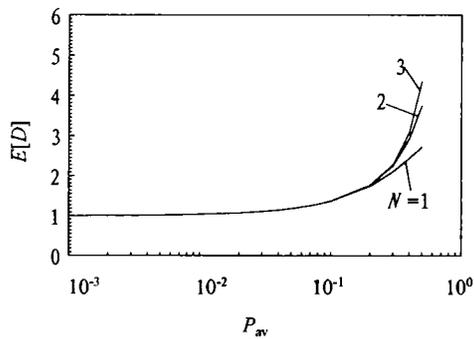


图 4 N 次重传 RS/混合 II 型 ARQ 在衰落信道上的传输时延 (用单边时延 t_0 归一化)

图 3、4 给出了 N 次重传 RS/混合 II 型 ARQ 在衰落信道($g=0.1$)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, 由于 RS 码强的纠错能力, 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[13]的结论一致。

4 结论

本文分析了截短 RS/混合 II 型 ARQ 在无线衰落信道上的分组错误率、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分组错误率, 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 Malkamaki E. Performance of the burst-level ARQ error protection scheme in an indoor mobile radio environment. IEEE Proc, VTC'94, 1994: 1 412~1 416
- 2 Liu H, Zarki M E. Performance of H.263 video transmission over wireless channels using hybrid ARQ. IEEE J Select Areas Commun, 1997, 15(9): 1 775~1 786
- 3 李立忠, 李乐民. 交叉交织 RS 码在旋转头数字磁记录器中的应用. 电子科技大学学报, 1997, 26 (3): 232~235
- 4 Wicker S B. Type II hybrid-ARQ protocols using punctured Reed-Solomon codes. IEEE Proc, MILCOM'91, 1991: 1 229~1 234
- 5 Wicker S B, Bhargava V K. Reed-Solomon codes and their applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994
- 6 Lin S, Costello Jr D J, Miller M J. Automatic-repeat request error control schemes. IEEE Commun Mag, 1984, 22(12): 5~17
- 7 Chiani M. Errors distribution in SFH mobile radio systems with application to ARQ. IEEE Proc GLOBALCOM'97, 1997: S37.5.1~S37.5.5
- 8 Guo N, Morgera S D. Frequency-hopped ARQ for wireless network data services. IEEE J Select Areas Commun, 1994, 12(8): 1 324~1 337

- 9 Benelli G, Favalli L, Filigheddu G. Error recovery for ATM transmission over wireless channels. *Electron. Lett.*, 1995,31(16):1 325~1 326
- 10 Zorzi M, Rao R R. On the statistics of block errors in bursty channels. *IEEE Trans on Commun* 1997,45(6):660~667
- 11 Yee J R, Weldon E J Jr. Evaluation of the performance of error-correcting codes on a Gilbert channel. *IEEE Trans on Commun*, 1995,43(8):2 316~2 323
- 12 Gulliver T A, Jorgenson M, Moreland W K. Performance of Reed-Solomon codes with dependent symbol errors. *IEE Proc Commun*, 1996,143(3):117~121
- 13 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

Performance Analysis of A Truncated RS/ Type II Hybrid ARQ Protocol in A fading Channel

Li Lizhong Li Lemin

(National Key Lab. of Broadband Optical Transmission and Communication Systems, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, after modelling the mobile channel with a two state Markov chain, the performances(packet error rate, throughput efficiency and transmission delay) of truncated RS/type II hybrid ARQ protocol in this fading channel are analyzed and simulated . It is found that, based upon the powerful error correcting capability of RS code, low transmission delay and packet error rate can be obtained by restricting numbers of retransmission.

Key words mobile communications; automatic repeat request; RS code; code combining