

## 协同分集和截断 ARQ 在单中继无线网的使用：一种交互层研究

孟庆民<sup>①③</sup> 马宝萍<sup>②</sup> 高西奇<sup>③</sup> 尤肖虎<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

<sup>②</sup>(南京师范大学电气与自动化工程学院 南京 210042)

<sup>③</sup>(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

**摘要：**该文着重研究了无编码两跳中继网中考虑各节点的最大传输次数受限时的一种交互层协同设计，提出了两种类型的简单自适应中继协同策略以探索一种合并的空间分集与时间分集。分析与计算机仿真表明：在非对称的多跳无线网和块衰落信道下，尽管基于截断 ARQ (Automatic Repeat Request) 的重传将带来一定的平均吞吐量下降，但该协同策略在实现有效的天线与能量共享的同时，也显著地改善了系统的帧误码性能。

**关键词：**协同分集；中继信道；截断 ARQ；交互层设计

中图分类号：TN925

文献标识码：A

文章编号：1009-5896(2007)11-2593-06

## On The Effectiveness of Cooperation Diversity and Truncated ARQ in Single Relay Wireless Networks: A Cross-Layer Study

Meng Qing-min<sup>①③</sup> Ma Bao-ping<sup>②</sup> Gao Xi-qi<sup>③</sup> You Xiao-hu<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>②</sup>(School of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

<sup>③</sup>(National Mobile Communications Research Lab, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, a cross-layer cooperative design is developed under the constraint of maximum transmission number per node in an uncoded two-hop relay network. Two-type simple single-relay adaptive cooperative protocols are proposed in order to exploit a combined spatial and time diversity. Analysis and simulation show that for the asymmetric multi-hop relay wireless networks, the cooperative protocols enable effective antenna/energy share and remarkable frame error rate performance gain in block fading channels at the moderate loss of average throughput due to truncated ARQ (Automatic Repeat Request) re-transmissions.

**Key words:** Cooperative diversity; Relay channel; Truncated ARQ; Cross-layer design

### 1 引言

无线网中协同分集或者用户分集<sup>[1,2]</sup>近几年来正受到人们的广泛注意。由于具有节省路径损耗和增加网络覆盖范围等优点，中继辅助的传输将有望成为下一代无线网的一种关键技术。按中继处对接收码字检测方式，协同技术主要包含译前传 (Decode-and-Forward, DF) 和放大前传 (Amplify-and-Forward, AF) 等协同策略。文献 [3,4] 中的分布式 ARQ (Automatic Repeat Request) 则可被看作为协同分集策略的一种通用 ARQ<sup>[5]</sup> 的解释，它们展现可带来时间分集的 ARQ 与可带来一种空间分集的中继协同传输的一种合并方案。采用中继的分布式 ARQ 与基本协同策略通常存在如下的不同：在采用重复码的基本协同分集策略中，为了保持端到端总传输速率  $R$  (bps/Hz) 不变，中继信道的各个链路的传输

速率需要加倍；在分布式 ARQ 中，目的与源和中继间必须有反馈通路，但是各链路的传输速率通常不需要加倍。因为中继节点仅在目的节点发生检测错误时才重传，因此，源节点将以更高的概率占用传输时隙。此外，与传统数据链路层 ARQ 策略类似，分布式 ARQ 中节点最大重传次数也必须满足一定约束<sup>[6]</sup>，即截断 ARQ 机制也以一定方式被引入到基于分布式 ARQ 的中继网络中。最近的文献 [7] 则从合并链路层 ARQ 与物理层协同分集的交互层设计方面扩展了该研究。

针对 SN 与 RN 的最大传输次数同时受限和 RN 是否具有优先发射等两种约束情况，本文提出了两种类型的简单自适应译码重传 (adaptive DF 或者 aDF) 策略：基于链路信噪比质量的译码重传和基于中继 CRC 的译码重传。该文的第 2 节给出了系统模型，提出了两种不同类型的 aDF 策略并给出了时隙分配结构。第 3 节对中断概率与频谱利用率进行了分析，第 4 节为仿真结果与讨论，最后为本文的结束语。

### 2 系统模型与传输策略

2006-04-27 收到，2006-10-16 改回

国家 863 计划(2006AA01Z264)和自然科学基金(60496311)资助课题

## 2.1 系统模型

系统模型见图 1 所示, 它含有单天线的分布节点: 源节点(SN), 中继节点(RN)和目的节点(DN)。SN-RN 链路、RN-DN 链路分别为中继信道的第 1 跳和第 2 跳。基于联合的物理层协同分集与数据链路层 ARQ, 系统可实现一种分布式交互层设计。RN 以半时分双工(TDD)方式工作并且整个网络以时分复用(TDMA)分配正交子信道, 每个数据包的信息比特  $N_b$  仅与物理层的一帧符号对应, 每帧含有发射符号数为  $N_f = N_b/q$  ( $2^q$ -QAM 调制)。本文假设各节点之间信道为非频率选择性的块衰落信道, 信道在每帧内不变但在帧与帧间作随机变化, 除了由低速反馈信道(见图 1 中的虚线)获得有限的反馈信息外各个发射(Tx)端未知信道, 各个接收(Rx)端具有完善的信道状态信息和同步。在物理层, 每次协同过程都基于同样的重复码; 在数据链路层, 限制各个节点的最大传输次数为  $\bar{N}_{\text{all}}$  (或者截断参数为  $n_{\text{max}} = \bar{N}_{\text{all}}$ ), 它既适用于 SN 也适用于 RN。当一个数据包检测错误时, DN 处的 ARQ 生成器将产生一个重传请求。在图 1 中, 我们还考虑 RN 处的 ARQ 控制器 II 将根据一种物理层与数据链路层联合设计机制安排 RN 在下一物理帧究竟是发射还是接收。在 DN 处对数据包正确检测时, SN 将占有下一个物理帧(这里与一个时隙对应)。如果某节点最大传输次数  $\bar{N}_i$  与  $\bar{N}_{\text{all}}$  相等并且 DN 处数据包检测依然有错时, 数据链路层将丢弃该包, 系统将记录一次中断事件。

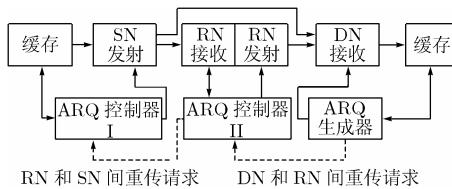


图 1 两跳无线中继网的系统模型

为了简化表达, 下文也用 1、2 和 3 代表图 1 中共线的节点 SN, RN 和 DN。当  $d_{3,1}$  为参考距离时, SN 与 RN, RN 与 DN, SN 与 DN 的归一化距离分别为  $E_{2,1} = d_{2,1}/d_{3,1}$ ,  $E_{3,2} = d_{3,2}/d_{3,1}$  和  $E_{3,1} = 1$ 。其次, 设各节点的发射能量约束为  $E_s$ ,  $x_j$ ,  $j = 1, 2$  表示功率归一化的发射符号, 所有节点处都采用相同调制, 路径损耗指数为  $\alpha$ 。在各接收节点处, 独立同分布的复高斯噪声  $z_{i,j}$  的参数为均值 0 方差  $N_0$ , 这里  $i \in \{2, 3\}$ ,  $j = (i-1), \dots, 1$ 。信道衰落系数项  $h_{i,j} = \mu_{i,j} w_{i,j}$  既含有路径损耗项  $\mu_{i,j} = (1/E_{i,j})^{\alpha/2}$ , 也含有小尺度衰落  $w_{i,j}$ , 后者是均值 0 方差 1 的复高斯随机变量。DN 与 SN 直接传输的等效基带的接收信号为

$$r_{i,j} = h_{i,j}y_j + z_{i,j}, \quad i = 3, \quad j = 1 \quad (1)$$

该直接传输的平均接收信噪比(SNR)为  $\gamma_0 = E_s/N_0$ 。

第  $n$  次传输过程中的各个链路瞬时信噪比为  $\gamma_{i,j} = |h_{i,j}|^2 \gamma_0$ , 它对应的最大平均互信息可以表示为

$$I(\gamma_{i,j}) = \log_2(1 + \gamma_{i,j}) \quad (2)$$

其次, 与文献[4]对 RN 的发射能量的处理类似, 采用功率调整的 RN 发射能量取为  $(E_{3,2})^\alpha \cdot E_s$ , 它可以使得来自 DN 与 RN, DN 与 SN 的两链路信号在 DN 处的平均 SNR 相同, 即  $\gamma_{3,2} = \gamma_{3,1}$ 。在 DF 情况下, 当 RN 处可以对 SN 发射符号  $x_1$  正确译码时, 其发射符号  $x_2 = x_1$ , RN 处的发射信号可表示为  $y_j = \sqrt{E_j}x_j$ ,  $j = 2$  并且  $E_j = (E_{3,j})^\alpha \cdot E_s$ 。RN-SN 链路和 DN-RN 链路的等效基带的接收信号可以表示为

$$r_{i,j} = h_{i,j}y_j + z_{i,j}, \quad i \in \{2, 3\}, \quad j = (i-1) \quad (3)$$

在固定 DF 情况下, RN 先对来自 RN 和 SN 链路的式(3)的接收信号  $r_{2,1}$  进行处理(检测、存储、重新调制和重发)。接着 DN 对来自 SN 和 RN 链路的接收信号  $r_{3,1}$  和  $r_{3,2}$  分别进行相干检测, 所得到对数似然比(LLR)为  $L_k^{(3,1)}$  和  $L_k^{(3,2)}$ 。对此两分支的估计合并后, DN 可以得到软比特估计量  $L_k^b = L_k^{(3,1)} + L_k^{(3,2)}$ 。所有  $L_k^b$  在 DN 中重新合并为一个数据帧, 该帧被送到链路层以进行错误检测(基于 CRC 处理)。对于分布式 ARQ 中的 aDF, 它与固定 DF 的不同之处仅在于: 当 RN 获得 DN 错误译码的控制信息并且 RN 处的瞬时 SNR 高于一定门槛或者 RN 处的具有正确的 CRC 差错检测时, aDF 策略中的 RN 才重发。

下文主要研究 aDF 下的交互层设计, 其中第一类“aDFARQ”策略表示基于链路信噪比质量的 aDF 与 ARQ 的合并策略, 它可以被看作为一种复杂度比较低的“cheap”中继。在考虑基于中继处 CRC 差错检测的数据链路层 ARQ 时, 按中继对于前次码字的处理方式, 基于中继处 CRC 判决的第二类合并策略又可以被划分为两个子策略: CRC 中继优先(CRC Relay precedence, 下面简称为 CRCR)和 CRC 中继优先与合并(CRC Relay precedence and combining, 下面简称为 CRCRB)。CRCR 表示中继仅仅对当前的接收码字进行 CRC 差错检测, CRCRB 表示中继需要把当前的接收码字(估计)与前次的码字(估计)合并后再进行差错检测。

## 2.2 基于协同分集和截断 ARQ 的策略

在  $n_{\text{max}}$  下, 定义起始协同过程的序号  $n$ , 即最大协同过程的序号为  $n + n_{\text{max}} - 1$ 。在单中继半 TDD 方式下, 此类策略的第一次协同过程(第  $n = 1$  次重传)与传统的 aDF 类似, 即在第一个阶段(与时隙  $S_{n,1}$  对应)RN 和 DN 都接收来自 SN 的广播信号, RN 需要对 SN 的信号进行完全译码。但是第二次以及第二次以后的协同过程(序号在  $n+1$  与  $n + n_{\text{max}} - 1$ )将与第一次协同传输有不同之处, 在当 RN 在满足一定条件时, 它将在第二阶段(与时隙  $S_{n,2}$  对应)向 DN 转发信号; 否则, RN 中的 ARQ 控制器将要求 RN 结束第二阶段并且 SN 将占用时隙  $S_{n,2}$ 。因此, 在考虑基于截断 ARQ

机制的 aDF 时,除了与前次 ARQ 的输出结果进行合并外,在相邻的两帧中, DN 合并的两个分支含有 3 个组合:来自 SN 和 RN、来自 SN 和 SN 及来自 RN 和 RN 等。该多重组合思想将启发我们设计与传统点到点截断 ARQ 不同的分布式交互层方案。

为了清晰表达与 MAC (Medium Access Control) 层的正交时隙分配<sup>[2]</sup>有关的策略,作如下的定义:

D: DN 译码正确(采用 CRC 差错检测);  $\bar{D}$ : DN 译码错误(采用 CRC 差错检测);

A: 在相邻的源发射时隙中, DN 译码错误但是 RN 处的接收 SNR 高于门槛。此时 RN 先接收来自 DN 的正认证信号(ACKD),接着 SN 接收来自 RN 的正认证信号(ACKR);

$\bar{A}$ : 在相邻的源发射时隙中, DN 译码错误但是 RN 处的接收 SNR 低于门槛。此时 RN 先接收来自 DN 的正认证信号(ACKD),接着 SN 接收来自 RN 的负认证信号(NACKR)。

B: 在相邻的源发射时隙中, RN 码字检测正确(采用 CRC 判定);  $\bar{B}$ : 在相邻的源发射时隙中, RN 码字检测错误(采用 CRC 判定)。

其次,对 ARQ 过程中的时隙定义为:  $S_{n1}$ : 第  $n$  次 ARQ 协同过程(第一个阶段中)所使用的第一个时隙, SN 进行发射;  $S_{n2}$ : 第  $n$  次 ARQ 协同过程(第二个阶段中)所使用的第二个时隙, RN 进行发射。类似地,  $S_{(n+1)1}$  与  $S_{(n+1)2}$ 、 $S_{(n+2)1}$  与  $S_{(n+2)2}$  分别与第  $n+1$  次、第  $n+2$  次 ARQ 协同过程的相应时隙对应。

(1)DFARQ 该策略采用了一种 SN 与 RN 以重复码轮流发送的机制,它便于实现二者的能量共享<sup>[8]</sup>。利用 aDF 中 RN 的自适应传输以及 ARQ 重传机制, DN 可由多个正交信道接收到的最大码字数为  $\bar{n}_L = 2n_{\max}$ 。由式(2),多个码字的分集合并使得 SN 与 DN 端到端可达到最大平均互信息,即  $I(\gamma_{\text{div}}) = 1/\bar{n}_L I(\gamma_{\text{div}})$ 。这里,各正交信道的瞬时 SNR 为  $\gamma_{\bar{n}}$ ,等效 SNR 为  $\gamma_{\text{div}} = \sum_{\bar{n}=1}^{\bar{n}_L} \gamma_{\bar{n}}$ 。图 2 表示了最大传输次数为 3 的 aDFARQ 的发射时隙结构,它反映了该自适应的协同策略具有的可变速率或者占用不等长度时隙的特性。

图 2 (a) 对应事件 D 发生,即 DN 译码正确,占一个时隙(slot),不需要中继的重传。在后面的时隙中 SN 将发送一个新数据帧;图 2 (b) 表示在 slot 1 中 DN 译码错误。在 slot 2 中,由于事件 A 发生, RN 向 DN 发送一个估计的码字,与此同时 DN 合并两个码字后得到正确的结果,即事件 D 发生。该过程占用二个时隙;图 2 (c) 表示在 slot 1 中 DN 译码错误。在事件 A 成立的 slot 2 中, DN 合并由中继所重传的码字后依然没有得到正确的结果,即事件  $\bar{D}$  发生。在 slot 3 中, SN 向 RN 和 DN 发送 1 个码字,接着 DN 合并所有 3 个码字(包含前次 ARQ 的输出结果)后有事件 D 发生;图 2 (d) 在 slot 1, slot 2 与图 2 (c) 相同。在 slot 3 中, SN 向 DN 发

送一个估计的码字后事件  $\bar{D}$  发生。在事件 A 成立的 slot 4 中, RN 发送后事件 D 发生,该过程共占用 4 个时隙。图 2 (e)~图 2 (l) 解释可以参照上面。

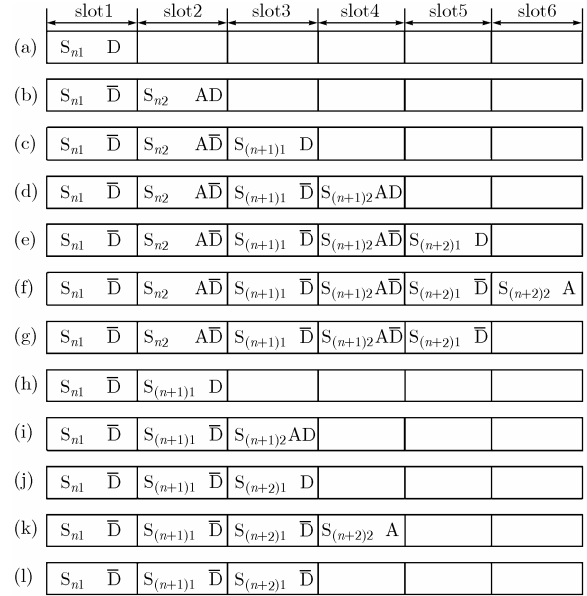


图 2 aDFARQ 的发射时隙结构

(2)CRCR 和 CRCRB 下面接着研究 RN 具有优先发射权的情况。对于 CRCR 和 CRCRB 两种交互式设计策略,中继优先的含义是:如果在相邻的源发射时隙里中继处 CRC 检测正确并且在当前时隙 DN 向 RN 发出重传请求,即满足  $B \cap \bar{D} = 1$ , RN 将优先于 SN 占有当前时隙。并且,按照 ARQ 的约束, RN 将最多占用持续的  $n_{\max}$  时隙。与传统截断 ARQ 中 SN 的重传类似,在此第二类策略中, RN 的多次重传在产生协同分集的同时,也带来了一定的时间分集。CRC 策略的发射时隙结构见图 3。图 3 (d) 展现了 RN 达到

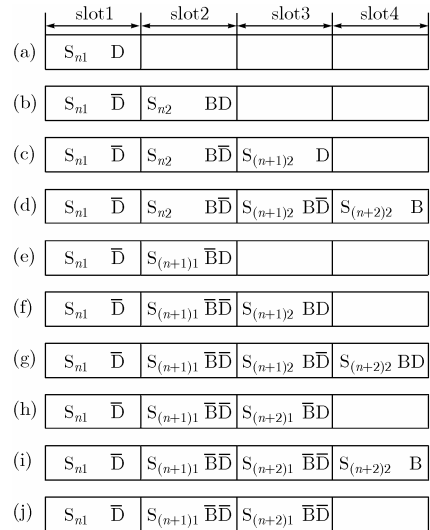


图 3 CRCR 策略的发射时隙结构

最大传输次数的情况, DN 合并了 4 个码字; 在图 3 (h)-图 3 (i) 展现了 SN 达到最大传输次数的情况; 图 3 (j) 也展现了 SN 达到最大传输次数的情况, 但是尽管 SN 在第 3 次传输过程的占用 slot3 进行发射(用  $S_{(n+2)1}$  表示 SN 的激活), 在 slot3 结束时事件  $\bar{D} = 1$  依然发生。在 slot4 中, 由于事件  $\bar{B} = 1$ , RN 不激活。用于 CRCRB 的时隙结构与 CRCR 类似, 但是 CRCRB 需要在中继处考虑合并前次接收码字, 然后作检测。

### 3 性能分析

由于图 2 和图 3 的各种图案的发生概率难以直接获得, 本文仅推导了 aDFARQ 时的中断概率和一种近似的频谱利用率表达式。在每次协同都基于重复码下, aDFARQ 的分析在一定程度上可以扩展到 CRCR 策略上。

采用 RN 处的功率调整后, 两跳网络的一个等效平均 SNR 为  $\tilde{\gamma} = 2\gamma_0 / (1 + (E_{3,2})^\alpha)$ , 并且各链路都采用一种相同链路门檻  $g(\gamma_{3,1}) = g(\gamma_{2,1}) = (2^{2R} - 1) / \tilde{\gamma}$ 。这里的门檻与基本 aDF 中的定义相同, 它可以保证各链路有足够高的信道质量。对于一次 aDFARQ, 其平均互信息可用 aDF 的最大平均互信息来表示, 即

$$I_{\text{aDF}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2 (1 + \tilde{\gamma} |h_{3,1}|^2), & |h_{2,1}|^2 < g(\gamma_{2,1}) \\ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \tilde{\gamma} |h_{3,1}|^2 + \tilde{\gamma} |h_{3,2}|^2), & |h_{2,1}|^2 \geq g(\gamma_{2,1}) \end{cases} \quad (4)$$

参见式(4): 当 RN 处的门檻不能被满足时, DN 在此次 ARQ 过程中只能利用来自 SN-DN 链路的信号进行检测; 否则 DN 将合并来自 SN-DN 与来自 RN-DN 等两个分支的码字, 由于随机变量  $|h_{ij}|^2$ ,  $i \in \{2,3\}$ ,  $j = i-1$ , 为指数分布, 式(4) 第 2 种情况的中断概率  $P_{\text{aDF}}^{\text{out}} = \Pr[I_{\text{aDF}} < R]$  在高 SNR 可以表示为  $P_{\text{aDF}}^{\text{out}} = \Pr[|h_{3,1}|^2 + |h_{3,2}|^2 < g(\gamma_{3,1})]$ 。在图 1 所示的非对称中继网络(中继处的瞬时接收信噪比较高的概率高于  $g(\gamma_{2,1})$ ) 和高 SNR 时, 第  $n_{\text{max}} = 1$  次 ARQ(第一次协同过程) 中断概率的上界为

$$\begin{aligned} P_{\text{ARQ1}}^{\text{out}}(n=1) &\leq \Pr[|h_{3,1}|^2 + |h_{3,2}|^2 < g(\gamma_{3,1})] \\ &\approx g(\gamma_{3,1})g(\gamma_{3,1})/2 \\ &= \left(1 + (E_{3,2})^\alpha\right)^2 \frac{(2^{2R} - 1)^2}{8\gamma_0^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)的近似利用了文献[2]中附录 I 中引理 2, 与  $E_{3,2}$ ,  $\alpha$  和  $R$  有关的项反映了分布式系统在一定协同策略下的编码增益。在各链路与各帧的信道都独立的假设下, 具有最大  $n_{\text{max}}$  次相同 ARQ 处理的 aDFARQ 的中断概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{aDFARQ}}^{\text{out}}(n_{\text{max}}) &\leq (P_{\text{ARQ1}}^{\text{out}}(n=1))^{n_{\text{max}}} \\ &= \left(1 + (E_{3,2})^\alpha\right)^{2n_{\text{max}}} \frac{(2^{2R} - 1)^{2n_{\text{max}}}}{(8\gamma_0^2)^{n_{\text{max}}}} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中  $1/(\gamma_0)^{2n_{\text{max}}}$  显示 aDFARQ 在高 SNR 和一定网络几何参数(与中继位置有关)下所达到分集度上界为  $2n_{\text{max}}$ 。由于引入截断 ARQ 的多次重传机制, 在 DN 处当前的估计可以与前次 ARQ 的输出结果进行合并, 它使得分布式系统以降低频谱利用率的代价获得了一种合并的空间分集、时间分集增益和编码增益。在高 SNR 下, 任意  $n_{\text{max}}$  次 ARQ 时平均频谱利用率近似为

$$R_{n_{\text{max}}} \approx R \prod_{n=1}^{n_{\text{max}}} \frac{1}{(1 + P_{\text{aDFARQ}}^{\text{out}}(n=1))} \quad (7)$$

### 4 仿真结果

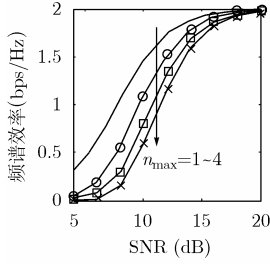
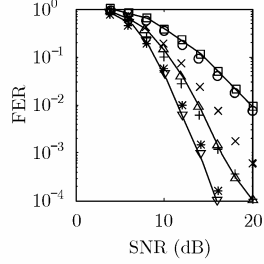
仿真参数为: 格雷映射的 4QAM( $q=2$ ), 它对应  $R=2$  (bps/Hz), 每帧信息比特数  $N_f=1080$ , 两跳中继网的路径损耗指数  $\alpha=3$ , 图 1 中的 RN 处于 SN 与 DN 连线的中点。以传统直接传输 ARQ 作为参考, 即“1Tx, ARQ1”-“1Tx, ARQ4”分别代表 1 发 1 收直接传输的第 1 次重传-第 4 次重传。对于第 1 类协同策略, 用“aDFARQ1”-“aDFARQ3”分别表示其第 1-第 3 次 ARQ; 用 CRCR3 表示第 2 类的 CRCR 策略的第 3 次 ARQ。在下面的仿真中, RN-SN 链路的接收信噪比  $\gamma_{2,1}$  采用第 2 节的定义, 没有采用固定  $\gamma_{2,1}$  的设定[7]。

#### 试验 1 ARQ 的最大传输次数与平均频谱利用率

使用式(7)进行数值计算, 就可以预测多次 ARQ 在高 SNR 区时所产生的频谱利用率(单位 bps/Hz)的损失。为了兼顾平均频谱利用率(参见图 4)与中断概率并且维持适当的总发射时隙图案数(参见图 2 和图 3), 本文考虑对所研究的方案采用三次截断的 ARQ, 即选择参数  $n_{\text{max}}=3$ 。

#### 试验 2 直接传输与 aDFARQ 的误码性能

图 5 比较了 DFARQ 与传统直接传输 ARQ 的 FER 性能。在 RN 处采用功率调整后, 具有一次重传的“1Tx, ARQ1”与“aDFARQ1”曲线基本重合。但是“aDFARQ2”优于“1Tx, ARQ2”并且与“1Tx, ARQ3”曲线基本重合, “aDFARQ3”与“1Tx, ARQ4”曲线基本重合。这里“1Tx, ARQ4”合并的最大码字数为 5。前期工作[9]已经对不完善 SNR 门檻问题做了初步研究, 本文的仿真显示: 在门檻分别为  $g(\gamma_{2,1}) = (2^{2R} - 1) / \tilde{\gamma}$  和  $g(\gamma_{2,1}) = (2^R - 1) / \tilde{\gamma}$  时, aDFARQ 的 FER 性能曲线基本重合。这可解释为: 多次重传将带来合并的分集和编码增益。因此, 引入截断的 ARQ 有助于降低 SNR 门檻对基于链路信噪比质量的译码重传策略性能的影响。我们的结果还显示: 第 2 类 CRCR 策略与 CRCRB 的 FER 性能的基本相同(因篇幅有限, 这里没有直接给出)。此外, 最大传输次数大于 1 时, 第 1 类策略的 FER 性能好于第 2 类策略。

图4 最大传输次数与  
频谱利用率图5 直接传输与aDFARQ的  
FER性能比较

### 试验3 吞吐量与时延性能

本文采用一种考虑时延的链路层的平均吞吐量的度量:

$$T_{n_{\max}}^{\text{type}} = (1 - \text{FER}_{n_{\max}}^{\text{type}})R / \bar{n}_{n_{\max}}^{\text{type}} \quad (8)$$

这里 type=aDFARQ 和 CRCR, 相应策略下的 DN 正确接收码字所占用的平均时隙数为  $\bar{n}_{n_{\max}}^{\text{type}} = E[\bar{n}_L]$  ( $E[\cdot]$  为期望, 单位为时隙或 slot),  $\text{FER}_{n_{\max}}^{\text{type}}$  为相应策略下的第  $n_{\max}$  次传输的 FER。

图6在第1类aDFARQ下显示了吞吐量与时延的性能, 其SNR阈值取  $g(\gamma_{2,1}) = (2^{2R} - 1) / \bar{\gamma}$ 。该图的左纵坐标轴为平均时延, 右纵坐标轴为平均吞吐量。在SNR为10dB时, 其吞吐量和时延分别为0.7 (bps/Hz)和2.5 (slot)。由于第2类CRCR与第1类aDFARQ具有类似的吞吐量, 这里没有直接给出CRCR的吞吐量。但是, 两者在低SNR时具有不同的时延特性。图7显示了传统(直接传输)ARQ、CRCR和aDFARQ等时延。其中, “SN, aDFARQ3”表示三次ARQ约束下的aDFARQ中的SN所使用的平均时隙数, “SN, CRCR3”表示三次ARQ约束下的CRCR中的SN所使用的平均时隙数。由图7可见: 在SNR小于12dB的区域, “SN, CRCR3”比“1Tx, ARQ4”节省传输时隙, 即在一定误帧性能下该第2类策略可以减少SN的功耗。比较图6和图7, 在SNR小于10dB时, 第1类aDFARQ的时延明显大于第2类的CRCR。这因为: aDFARQ中RN的重传依据为瞬时

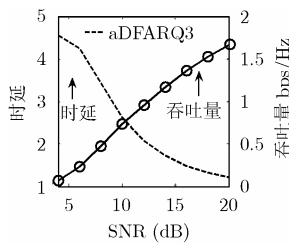


图6 时延与吞吐量性能

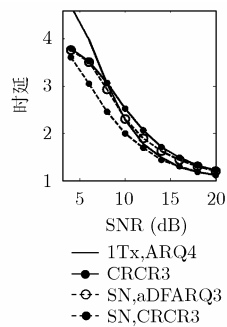


图7 传统 ARQ、aDFARQ 与

SNR与阈值比较的结果, 因此, 在低SNR时, aDFARQ占用时隙要多于CRCR, 它与图2及图3中发射时隙结构的分析是一致的。

## 5 结束语

本文研究了合并链路层ARQ和物理层协同分集的一种交互层设计, 提出了两类适合无纠错编码系统的简单自适应译码重传策略: 基于链路信噪比质量的译码重传和基于中继CRC的译码重传。分析和仿真显示: 在块衰落中继信道中, 有限的重传将引起平均时延的增加, 最大传输次数为3的参数选择可使得系统达到链路层的平均吞吐量与误帧率性能的折中。在信噪比低于10dB的区域, 由于基于链路信噪比质量的策略要比基于中继CRC的策略占用更多时隙, 后者将更适用于低SNR的应用场景; 在信噪比高于10dB时, 由于前者仅需要在中继节点处进行简单的信噪比质量比较, 该策略下的中继不需要了解源节点采用何种CRC编码, 因此, 它可以被看作是一种“透明”的交互层设计。此外, 由于ARQ和前向纠错码是改善无线通信系统误码性能的两种重要技术, 如何把这两项技术有效地结合到一个基于协同分集策略的交互层设计方案中将是一个很有意义方向, 它也有望应用于正在进行的Beyond 3G<sup>[10]</sup>、有线/无线的分布式天线系统<sup>[11]</sup>和无线多跳Ad hoc网等下一代无线通信系统中。

## 参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip Elza, and Aazhang B. User cooperation diversity-part I: System description [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [2] Laneman J N and Wornell G. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [3] Zhao B and Valenti M C. Practical relay networks: A generalization of hybrid-ARQ [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 7-18.
- [4] Zimmermann E, Herhold P and Fettweis G. On the performance of cooperative relaying protocols in wireless networks [J]. *European Trans. on Telecommunications*, 2005, 16(1): 17-35.
- [5] Lin S and Costello. Error Control Coding: Fundamentals and Applications [M]. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2004, Chapter 22.
- [6] Liu Q, Zhou S, and Giannakis G B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2004, 3(5): 1746-1755.
- [7] Dai Lin and Khaled Letaief B. Throughput maximization of Ad-hoc wireless networks using adaptive cooperative

- diversity and truncated ARQ, submitted to IEEE Transactions on Communications. Available: <http://www.ee.ust.hk/~eedailin/>.
- [8] Laneman J N and Wornell G. Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks. In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Chicago, IL, Sept. 2000: 7–12.
- [9] Meng Qingmin, You Xiaohu, and Boyer John. Relay assisted transmission with bit-interleaved coded modulation. *Journal of Electronics (China)*, 2006, 23(4): 520–527.
- [10] Yu Xiao-Hu, Chen Guoan, Chen Ming, and Gao Xiqi. Toward Beyond 3G: The Future project in China [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(1): 70–75.
- [11] Zhou Shidong, Zhao Min, Xu Xibin, Wang Jing and Yao Yan. Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 108–113.
- 孟庆民: 男, 1965 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO、迭代译码和无线通信中的协同技术.
- 尤肖虎: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为未来宽带移动通信理论与技术.