

分布式协作通信网络中一种新的跨层设计方案

徐 峰^{1,2}, 岳殿武^{1,2}

(1. 大连海事大学信息科学与技术学院, 辽宁大连 116026; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 提出了一种新的跨层设计方案, 即选择中继重传方案 (SN-RT, selective-node-based retransmission scheme). 它把物理层中的协作分集技术和数据链路层中的自动请求重传 (ARQ) 协议有效地结合起来. 在重传过程中, 依据中继与目的节点间链路的瞬时信噪比选择一个最佳中继, 联合源节点进行 Alamouti 空时编码. 在 Rayleigh 衰落环境和 MPSK 调制下, 给出了确切的吞吐量表达式. 结果显示, 相比于固定中继重传方案 (FN-RT, fixed-node-based retransmission scheme), SN-RT 跨层方案能明显进一步提升系统吞吐量.

关键词: 协作通信; 跨层设计; 吞吐量; 自动请求重传; 空时编码

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1434-06

A Novel Cross-layer Design Scheme for Distributed Cooperative Communication Networks

XU Feng^{1,2}, YUE Dian-wu^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper proposes a novel cross-layer design scheme, named selective-node-based retransmission scheme (SN-RT). It efficiently combines cooperative diversity at the physical layer and automatic repeat request (ARQ) at the data link layer. At the stage of retransmission, the source together with an optimal relay, which is selected based on the instantaneous signal-to-noise ratio of relay-to-destination link, transmit signals to the destination node by following Alamouti-based space-time coding. The explicit expressions of throughput with MPSK modulation over Rayleigh fading channels are derived. The simulation results show that compared to the fixed-node-based retransmission scheme (FN-RT), SN-RT scheme can notably improve system throughput.

Key words: cooperative communication; cross-layer design; throughput; automatic repeat request (ARQ); space-time coding

1 引言

多输入多输出 (MIMO) 技术已成为近十多年来无线通信领域研究的热点之一^[1,2]. 在收发信机上架设多天线阵列, 无需占用系统额外带宽的前提下, MIMO 系统能有效增加信息传输速率、提高系统可靠性. 随着学者们的研究, 人们发现在某些场合把 MIMO 技术实用化受到一定的阻碍. 为了最大限度的利用多天线阵列, 保证各天线间不相关, 在较大设备上架设多根不相关的天线相对比较简单. 然而对于便携式移动设备, 由于受体积或能量等因素的约束, 要想保证天线间不相关是非常困难的. 因此, 为了使小型无线设备也能很好地利用 MIMO 技术的优势, 获取一定分集增益, 协作通信技术应运而生. 分布式协作通信的核心思想是无线网络利用多个分布式中继来协助源节点与目的节点间的通信. 网络中的各用户通过相互资源共享, 在收发设备之间构建多

条虚拟的无线衰落链路, 同样可以充分享用传统 MIMO 技术中的空间分集特性. 理论分析表明, 作为一种抵抗无线信道衰落损伤的有效手段, 协作通信能被广泛应用在未来无线通信网络中, 如: 无线局域网、无线蜂窝网络、传感器网络和 ad-hoc 网络等^[3~6].

协作通信技术首先由 Sendonaris 等人提出^[7,8], 并讨论了 CDMA 协作系统的性能和实现方式. 其结果显示每个协作用户的可获取速率均得到显著提高, 并且深衰落用户能从协作中获取更多的益处. 之后, Laneman 等人提出了各种中继协议^[9], 如前向放大中继和前向译码中继, 也可以分别称之为非再生中继 (non-regenerative relaying) 和再生中继 (regenerative relaying). 从渐近中断概率角度来分析, 协作系统能获取满分集增益, 这正是协作通信极具吸引人的重要原因之一. 基于这两种协议, 国内外学者们进行了大量的研究^[10~13].

上述文献大多是基于物理层下的研究, 结果表明

协作通信不失为未来通信方式的一种备选方案.事实上,大多数的收发信机都是工作在半双工模式,即接收和发送信号不能同时进行.为了保证源节点与中继节点之间的互不干扰,通常采用时分多址(TDMA)方式发送信号来保持发射节点间的正交性.在每个时隙(time slot)内,只允许一个节点发送信号.因此,为了完成一次信号的传输,总共需要多个时隙.然而,从整个网络来看,这样就大大降低了系统的吞吐量.

为了克服这一缺点,学者们展开了对跨层设计方案^[14~17]的研究.它实质上是一种物理层和数据链路层中自动请求重传(ARQ)的一种有效结合.源节点首先与目的节点直接进行信息传输,一旦目的节点检测出数据包(packet)存在错误,则由无差错反馈信道通知源节点进行数据重传.文献[17]已指出,这种简单的重传模式对吞吐量并没有影响.针对这一问题,文献[17]提出了一种改进的跨层设计方案,为了明确起见,本文称之为 FN-RT.在重传阶段,源节点和所有可利用中继(在第一次传输后,从源节点正确获得信息的中继)通过空时编码方式^[18]进行编码、重传(类似于基于多天线发送的传输模式).尽管这种方案能够带来一定的吞吐量提升,可是 FN-RT 有两个固有的缺陷.第一,参与重传的中继仅在第一次源节点传输完成后就选定好了,在所有重传过程中保持固定不变,其余中继处于闲置状态,浪费了系统资源.这样,以后的重传过程实质上又重复了简单重传模式.第二,由空时编码特性知道^[18],仅当发射天线为二时才能保证编码速率为一,大于两天线情况编码速率要小于一.所以,当可利用中继数大于一且系统需要重传时,尽管重传时的可靠性增加了,但传输过程的速率下降了,进而影响到吞吐量.

鉴于此,本文提出一种新的跨层设计方案,称之为 SN-RT 方案.考虑 Rayleigh 衰落信道环境,以吞吐量作为性能比较准则.在重传过程中,根据当前瞬时信道状态,从所有可利用的中继中选择一个与目的节点间链路(R-D)最佳的中继联合源节点进行 Alamouti^[19]空时编码(形成虚拟两发射天线),保证了重传过程中码率等于一,克服了上述缺点二.并且,每次传输时,所有非可利用中继依然接收源节点发送来的信息并检测是否成功收到,一旦有中继正确接收,它将成为可利用中继并将参与下一次重传过程,充分利用网络中的所有中继,克服了上述缺点一.最后通过仿真验证了本文提出的 SN-RT 跨层设计方案的优点.

2 系统模型

无线协作通信网络包含一个源节点, N_R 个再生中继和一个目的节点.所有节点均配置一根天线.每次以一个数据包为单位进行传送,并且接收端利用循环冗余

校验码(CRC)来检验接收数据包信息的正确性. CRC 已在数字通信中作为一种标准技术而广泛使用,为此本文将不考虑 CRC 所带来的冗余.考虑平坦的 Rayleigh 衰落信道,任何衰落链路都保持相互独立,并且在每一数据包传输过程内信道保持恒定不变,包与包之间相互独立.假定接收端(中继和目的节点)完全知道信道状态信息而发射端(源节点和中继)不知道信道状态信息.

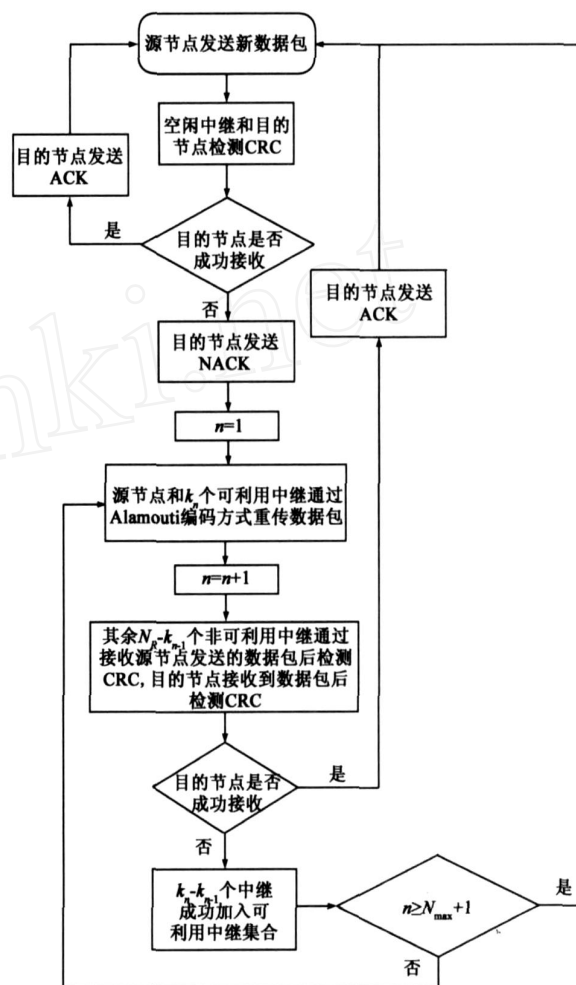


图1 SN-RT跨层设计方案流程图

当不存在 ARQ 协议时,目的节点收到源节点发送来的数据包后通过 CRC 校验码判别接收到的信息是否正确.如果包内不存在错误则此数据包被成功接收;如果存在错误,则放弃该数据包并通知源节点进行下一数据包的发送.这样势必会造成大量信息的丢失,影响系统吞吐量.因此我们将 ARQ 协议应用到协作通信网络中,流程图如图 1 所示.具体传输过程可描述如下:

(1) 最开始,源节点广播数据包($n=1$).除了目的节点接收数据包外,所有中继经由单发单收链路也同樣能监听源节点发送来的信息.各个中继根据 CRC 判别

自己是否成功获取源节点信息. 成功接收的中继 (设有 k_1 个可利用中继) 将信息存储起来以备将来重传需要, 不再接收源节点重传来的数据包, 直到数据包成功被目的节点接收或达到系统所设定的最大重传次数 N_{\max} 时, 信息将被释放掉. 没有成功接收信息的中继 ($N_R - k_1$ 个非可利用中继) 立即丢掉该错误数据包, 等待源节点发送来的重传数据包或接收新的数据包.

(2) 如果数据包没有成功到达目的节点, 目的节点将通过无差错链路发送 NACK (Non-Acknowledgment) 信号给源节点和中继, 系统进入重传状态; 如果目的节点成功接收到数据包, 则发送 ACK (Acknowledgment) 确认信号, 系统进入新数据包传输状态.

(3) 一般的, 在第 n 次传输时 ($n-1$ 次重传), 如果当前没有可利用中继 ($k_{n-1} = 0$), 仅源节点重发数据包, 类似于 $n=1$ 过程. 如果当前重传过程中有 $k_{n-1} > 0$ 个可利用中继, 从所有可利用的中继中选择一个 R-D 链路最佳的中继联合源节点进行 Alamouti 空时编码 (形成虚拟两发射天线). 其余 $N_R - k_{n-1}$ 个非可利用中继继续接收源节点发送的重传信息, 检测是否成功接收. 成功接收到数据包的 $k_n - k_{n-1}$ 个中继加入到可利用中继集合中, 准备下一次重传需要. 其余 $N_R - k_n$ 个非可利用中继丢掉错误信息, 等待接收重传数据包或接收新数据包.

(4) 上一过程一直重复, 直到数据包成功被目的节点接收或系统到达预设的最大重传次数 N_{\max} , 系统进入新数据包传输.

3 性能分析

这一节, 我们将根据前面阐述的跨层协议来求解吞吐量的确切数学表达式. 吞吐量 (bits/s) 定义为成功接收的比特数与传送这些比特所需时隙数的比值, 以数据包错误率 (PER) 为函数表达的.

3.1 SN-RT 跨层设计方案

本节将讨论本文所提出的 SN-RT 跨层设计方案. 定义 $\bar{\gamma}_{s,d}$, $\bar{\gamma}_{s,r}$, $\bar{\gamma}_{r,d}$ 分别为 Rayleigh 衰落环境下源节点与目的节点 (S-D)、源节点与中继 (S-R)、R-D 链路的衰落系数模方的平均值. 为方便研究, 本文采用文献 [17] 中的假设 $\bar{\gamma}_{s,d} = \bar{\gamma}_{r,d}$, 对于更为一般的情形 $\bar{\gamma}_{s,d} \neq \bar{\gamma}_{r,d}$, 容易从本文推广而得. 另设所有接收端的噪声方差为 N_0 , 任意时刻总的发送符号能量为 E_s . 如果只有源节点发送信号, 则发送能量为 E_s ; 如果源节点和中继联合发送, 则每个节点分配能量为 $E_s/2$. S-R 链路上的符号错误率 (SER) 记为 $P_{1, SER}(\bar{\gamma}_{s,r})$, 其中: $\bar{\gamma}_{s,r} = \frac{E_s}{N_0}$ 或 $\bar{\gamma}_{s,r} =$

$$\frac{E_s}{2N_0} \quad \text{定义: } J_n(c) = \frac{1}{0} \left(\frac{\sin^2 t}{\sin^2 t + c} \right) dt.$$

由文献 [20] 可以求出:

$$P_{1, SER}(\bar{\gamma}_{s,r}) = J_1 \left(\frac{(M-1)}{M}, \sin^2(\pi/M) \bar{\gamma}_{s,r} \right).$$

同理, S-D 链路上的 SER 为:

$$P_{1, SER}(\bar{\gamma}_{s,d}) = J_1 \left(\frac{(M-1)}{M}, \sin^2(\pi/M) \bar{\gamma}_{s,d} \right)$$

其中: $\bar{\gamma}_{s,d} = \frac{E_s}{N_0}$.

在重传阶段, 当有 k 个可利用中继参与重传时, 目的节点处的 SER 表示为:

$$P_{k+1, SER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d}) = \begin{cases} P_{1, SER}(\bar{\gamma}_{s,d}), & \text{if } k=0 \\ P_{k+1, SER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d}), & \text{if } k>0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $k+1$ 表示 k 个中继和一个源节点,

$$\begin{cases} \bar{\gamma}_{s,d} = \frac{E_s}{N_0}, & \text{if } k=0 \\ \bar{\gamma}_{s,d} = \frac{E_s}{2N_0}, \bar{\gamma}_{r,d} = \frac{E_s}{2N_0}, & \text{if } k>0 \end{cases} \quad (2)$$

式 (1) 中, 当 $k>0$ 时, $P_{k+1, SER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d})$ 可以通过附录中的式 (15) 得到.

依据 SN-RT 协议, 从第 $n-1$ 次传输过渡到第 n 次传输时, 可利用中继的状态转移概率 $h(k_n | k_{n-1})$ 可表示为:

$$h(k_n | k_{n-1}) = \begin{cases} N_R - k_{n-1} \\ k_n - k_{n-1} \end{cases} \left[1 - P_{1, PER}(\bar{\gamma}_{s,r}) \right]^{k_n - k_{n-1}} \left[P_{1, PER}(\bar{\gamma}_{s,r}) \right]^{N_R - k_n} \quad (3)$$

式 (3) 表明在第 n 次传输过程中, 有 $k_n - k_{n-1}$ 个非可利用中继状态发生变化, 即假定第 $n-1$ 次传输完成后有 k_{n-1} 个可利用中继, 第 n 次传输完成后 ($n-1$ 次重传), 共有 k_n 个中继成功获取数据包.

PER 与 SER 间存在如下的转换关系^[21]

$$P_{PER} = 1 - \left(1 - P_{SER} \right)^{1/\log_2 M} \quad (4)$$

其中 M 代表每数据包内的比特数, M 为 MPSK 调制阶数. 根据式 (4), 可以求得符号错误概率 $P_{1, SER}(\bar{\gamma}_{s,r})$ 、 $P_{1, SER}(\bar{\gamma}_{s,d})$ 和 $P_{k+1, SER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d})$ 相应的 PER, 分别记为 $P_{1, PER}(\bar{\gamma}_{s,r})$ 、 $P_{1, PER}(\bar{\gamma}_{s,d})$ 和 $P_{k+1, PER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d})$.

基于上述分析, 传输每一数据包所需的平均时隙数可以求得为:

$$\begin{aligned} \bar{N} = & \sum_{n=1}^{N_{\max}} \sum_{k_1=0}^{N_R} \sum_{k_2=k_1}^{N_R} \dots \sum_{k_{n-1}=k_{n-2}}^{N_R} \left[\sum_{j=1}^{n-1} h(k_j | k_{j-1}) \right] \\ & \times n \left[1 - P_{k_{n-1}+1, PER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d}) \right] \left[P_{k_{n-1}+1, PER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d}) \right] \\ & + \sum_{k_1=0}^{N_R} \sum_{k_2=k_1}^{N_R} \dots \sum_{k_{n_{\max}}=k_{n_{\max}-1}}^{N_R} \left[\sum_{j=1}^{N_{\max}} h(k_j | k_{j-1}) \right] \\ & \times \left(N_{\max} + 1 \right) \cdot \left[P_{N_{\max}+1, PER}^{SN-RT}(\bar{\gamma}_{s,d}, \bar{\gamma}_{r,d}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $k_0 = 0$. 式(5)的第一部分表明在 N_{\max} 次传输之内目的节点就能成功收到数据包;第二部分为前 N_{\max} 次传输失败,需要第 $N_{\max} + 1$ 次传输(N_{\max} 次重传),而不关心此次传输成功与否. 由于我们采用编码速率为一的 Alamouti 方案重传,因此,前 n 次传输总共需要 n 个时隙.

每一数据包成功到达目的节点的概率为:

$$\bar{P} = \prod_{n=1}^{N_{\max}+1} \prod_{k_1=0}^{N_R} \prod_{k_2=k_1}^{N_R} \dots \prod_{k_{n-1}=k_{n-2}}^{N_R} \left[h \left(k_j / k_{j-1} \right) \right] \times \left[1 - P_{k_{n-1}+1, PER}^{SN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] \left[P_{k_{j-1}+1, PER}^{SN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] \quad (6)$$

最后利用式(7)求得 SN-RT 跨层方案的吞吐量为:

$$\bar{T} = \left(\log_2 M \right) \left(\frac{\bar{P}}{\bar{N}} \right) \quad (7)$$

3.2 FN-RT 跨层设计方案

为了与本文所提出的跨层设计方案进行对比,本节将给出文献[17]中的结果,从中可以观察与本文所提出的 SN-RT 方案的关系.

在 FN-RT 跨层方案中,参与重传的中继在第一次传输完成后就选定好了,以后参与重传的中继数目固定不变. 因此,我们有 $k_1 = k_2 = \dots = k_n$. 式(5)的平均时隙数表达式重新表示为:

$$\bar{N} = \prod_{n=1}^{N_{\max}} \prod_{k_1=0}^{N_R} \left[\frac{N_R}{k_1} \right] \left[1 - P_{1, PER} \left(\bar{s}, r \right) \right]^{k_1} \left[P_{1, PER} \left(\bar{s}, r \right) \right]^{N_R - k_1} \times \left[1 + \frac{n-1}{R(k_1+1)} \right] \left[1 - P_{k_{n-1}+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] \cdot \left[P_{k_{j-1}+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] + \prod_{k_1=0}^{N_R} \left[\frac{N_R}{k_1} \right] \left[1 - P_{1, PER} \left(\bar{s}, r \right) \right]^{k_1} \left[P_{1, PER} \left(\bar{s}, r \right) \right]^{N_R - k_1} \times \left[1 + \frac{N_{\max}}{R(k_1+1)} \right] \left[P_{k_{j-1}+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] \quad (8)$$

其中 $R(k+1)$ 表示等效 $k+1$ 个发射天线空时编码速率,选择规则如下:

(1) 当 $k=0$ 时,即只有源节点发送,等效为单发单收模型, $R(1) = 1$;

(2) 当 $k=1$ 时,即源节点和一个中继发送,采用 Alamouti 编码矩阵 G_2 , $R(2) = 1$;

(3) 当 $k=2$ 或 3 时,即源节点和 2 个中继或 3 个中继联合发送,采用 $3/4$ 速率的编码矩阵 H_3 或 H_4 , $R(3) = R(4) = 3/4$;

(4) 当 $k=4$ 时,采用 $1/2$ 速率的编码矩阵, $R(k+1) = 1/2$.

式(8)中的 $P_{k+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right)$ 满足:当 $k=0$ 时,

$P_{k+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) = P_{1, PER} \left(\bar{s}, d \right)$; 当 $k=1$ 时,能量 E_s 均匀地分配到 $k+1$ 个发射节点上,并利用文献[22],其相应的 SER 可求得为:

$$P_{k+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) = \frac{1}{M} \int_0^{\infty} \left[1 + \frac{\sin^2(\pi/M)}{\sin^2 t} \frac{\bar{s}}{(k+1)R(k+1)} \right]^{-k} dt = J_{k+1} \left(\frac{(M-1)}{M}, \frac{\sin^2(\pi/M)}{(k+1)R(k+1)} \right) \quad (9)$$

其中, $\bar{s}, d = \bar{r}, d = \bar{s}$. 然后,再利用式(4),求得相应 PER 值.

FN-RT 跨层方案下的数据包成功被目的节点接收的概率为:

$$\bar{P} = \prod_{n=1}^{N_{\max}+1} \prod_{k_1=0}^{N_R} \left[\frac{N_R}{k_1} \right] \left[1 - P_{1, PER} \left(\bar{s}, r \right) \right]^{k_1} \left[P_{1, PER} \left(\bar{s}, r \right) \right]^{N_R - k_1} \times \left[1 - P_{k_{n-1}+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] \cdot \left[P_{k_{j-1}+1, PER}^{FN-RT} \left(\bar{s}, d, \bar{r}, d \right) \right] \quad (10)$$

最后,将式(8)和式(10)代入到式(7)中,求出 FN-RT 跨层方案下的吞吐量.

4 仿真与讨论

本节将进行仿真并讨论 Rayleigh 衰落信道环境下的新跨层方案的性能. 考虑路径损耗的影响, $d_{s,d}$ 、 $d_{s,r}$ 和 $d_{r,d}$ 分别代表 S-D、S-R 和 R-D 链路归一化距离. 本节中所有结果都假定路径损耗因子为 $q=3$, $d_{s,d} = d_{r,d} = 1$, $d_{s,r} = 0.1$, 每个数据包内的包含比特数设定为 $v=120$. 无特殊说明时,将采用 QPSK 调制 ($M=4$).

首先对 SN-RT 和 FN-RT 两个跨层方案进行性能比较. 如图 2 所示, $N_{\max}=0$ 表示无跨层通信. 从图中可以发现, FN-RT 方案的吞吐量性能和中继个数有很大关系. 例如仅在信噪比低于 11dB 时, $N_R=4$ 性能好于 $N_R=2$, 而当信噪比高于 11dB 时,情况恰恰相反,增加中继个数反而导致吞吐量性能下降. 这是由于 FN-RT 方案在重传时采用了编码速率小于一的空时编码方式. 在低信噪比情景, ARQ 起主要作用,增加了成功接收数据包的概率;而在高信噪比情况,空时编码速率将起决定性作用. 另外,我们还观察到,在高信噪比时, FN-RT 吞吐量性能反而劣于无跨层方式. 因此, FN-RT 方案仅适用于低信噪比环境. 而本文所提出的 SN-RT 跨层方案避免了上述问题的出现. $N_R=4$ 性能始终优于 $N_R=2$, $N_R=2$ 始终好于 $N_{\max}=0$. 并且, SN-RT 跨层方案始终好于 FN-RT 跨层方案,体现了本文所提出的 SN-RT 跨层方案的优越性.

图 3 给出了不同系统配置对 SN-RT 跨层方案吞吐量的影响. 从图中我们观察到,增加重传次数 N_{\max} 或中

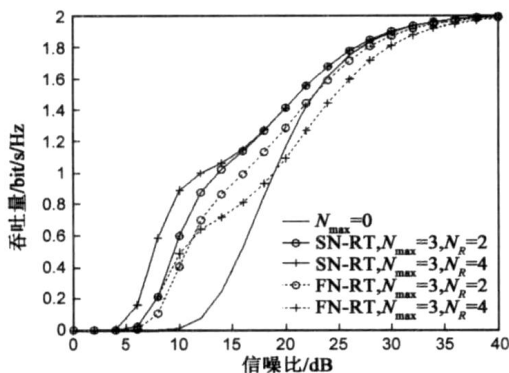


图2 SN-RT与FN-RT跨层方案对比

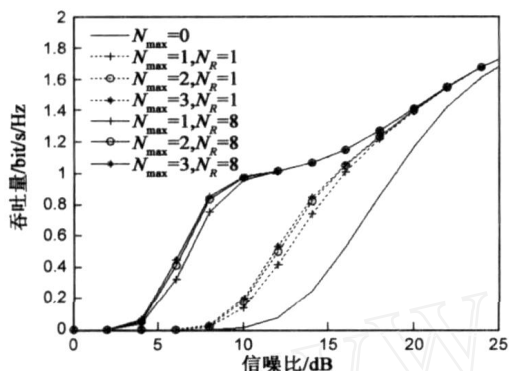


图3 SN-RT跨层方案的吞吐量分析

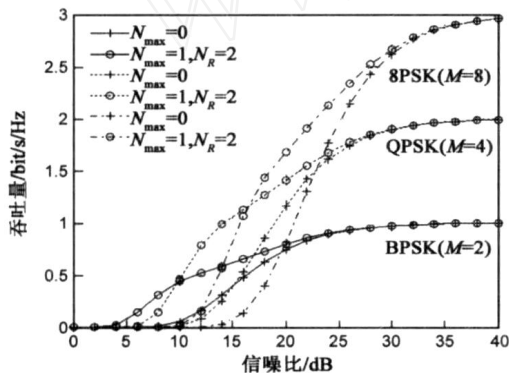


图4 SN-RT方案下调制方式对吞吐量的影响

继个数 N_R 都能带来一定的吞吐量提升. 如固定重传次数和增加中继个数可以显著增加吞吐量. 但是, 通过固定中继个数和增加重传次数来提高吞吐量, 收效甚微. 因此在实际通信环境下, 可以选择 $N_{\max} = 1$, 在损失很小性能前提下, 能大大降低系统实际应用的复杂度.

图4考虑不同的调制方式对吞吐量的影响. 在固定调制方式下, 利用跨层协作传输能提高系统性能. 然而当信噪比充分大时, 吞吐量将不再增加. 而此时的传输可靠性远远满足系统规定的可靠指标, 这样势必造成资源浪费. 因此可通过增大调制阶数来进一步提升吞吐量. 从图中我们发现, 低阶调制方式适合于低信噪比情况下传输, 高阶调制方式可用以在高信噪比环境下传输. 这样就充分利用了信道条件.

5 总结

本文提出了一种新的跨层设计方案, 推导了吞吐量的确切表达式. 从仿真结果分析看, SN-RT 跨层方案性能好于 FN-RT 跨层方案. 当 SN-RT 应用于实际通信系统中时, 可根据实际具体要求合理选择参数 N_{\max} 和 N_R 来满足吞吐量和实现复杂度的折中.

针对本文工作, 几点问题需要指出: (1) SN-RT 跨层方案性能优于 FN-RT 跨层方案是以牺牲实现复杂度来换取的. 这是因为 SN-RT 跨层方案在每次重传过程中, 参与传输的中继不固定, 因此每次重传时都需要从新的可利用中继群中选择最佳中继. 而在 FN-RT 方案中, 所有参与重传的中继固定不变, 因此减小一些额外的系统开销; (2) 针对图4所讨论的问题, 可以考虑采用自适应调制^[23, 24]. 根据当前信道状况及时更新调制阶数, 在协作跨层设计的基础上进一步提高吞吐量. 因此, 如何有效地将协作通信、ARQ 协议和自适应调制结合起来值得未来进一步思考.

附录 求解 $P_{L+1, SER}^{SN-RT} \left(\frac{-}{s, d}, \frac{-}{r, d} \right)$

设 y_1, \dots, y_L, y_{L+1} 为 $L+1$ 个服从参数为 $\frac{-}{s}$ 的指数分布随机变量. 定义 $y = \max\{y_1, \dots, y_L\} + y_{L+1}$ 和 $y = \max\{y_1, \dots, y_L\}$. 由概率论统计知识得知, 随机变量 y 的累积分布函数为:

$$F(y < x) = \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{s}\right) \right]^L = \sum_{i=0}^L \binom{L}{i} (-1)^i \exp\left(-\frac{i}{s}x\right) \quad (11)$$

然后对上式进行求导运算, 得到随机变量 y 的概率密度函数为:

$$f_y(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \sum_{i=1}^L \binom{L}{i} (-1)^{i+1} \exp\left(-\frac{i}{s}x\right) \quad (12)$$

进一步得到 y 的矩生成函数为:

$$\begin{aligned} \phi_y(s) &= \int_0^\infty \exp(-sy) f_y(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^L \binom{L}{i} (-1)^{i+1} \frac{1}{\left[1 + s \frac{-}{i}\right]} \end{aligned} \quad (13)$$

进而, 随机变量 y 的矩生成函数可以求得为:

$$\phi(s) = \frac{L}{\left(1 + s \frac{-}{s}\right)^2} + \sum_{i=2}^L \binom{L}{i} (-1)^{i+1} \left[\frac{1}{\left(1 + s \frac{-}{i}\right)} - \frac{1}{\left(1 + s \frac{-}{s}\right)} \right] \quad (14)$$

最后, 将式(14)代入下面表达式

$$P_{L+1, SER}^{SN-RT} \left(\frac{-}{s, d}, \frac{-}{r, d} \right) = \frac{1}{0} \sum_{i=0}^{(M-1)/M} \phi_r \left(\frac{\sin^2(\angle M)}{\sin^2} \right) d \quad (15)$$

得到 $P_{L+1, SER}^{SN-RT} \left(\begin{matrix} - \\ s, d, r, d \end{matrix} \right)$ 的结果, 其中 $\begin{matrix} - \\ s, d \end{matrix} = \begin{matrix} - \\ r, d \end{matrix} = \begin{matrix} - \\ s \end{matrix}$.

参考文献:

- [1] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. Europe Trans Telecommunications, 1999, 10(6): 585 - 595.
- [2] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3): 311 - 335.
- [3] Nospatinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74 - 80.
- [4] Lee D C, Kwon Y H. Performance benefits of uplink packet relay protocols for cellular-link systems: Quantitative analysis[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2006, 5(7): 1569 - 1574.
- [5] Wei H, Gitlin R D. Two-hop-relay architecture for next-generation WWAN/ WLAN integration[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(2): 24 - 30.
- [6] Scaglione A, Goeckel D L, Laneman J N. Cooperative communications in mobile ad hoc Networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(5): 18 - 29.
- [7] Sendonaris A, Erkip E, Aaxhang B. User cooperation diversity part I: system description[J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11): 1927 - 1938.
- [8] Sendonaris et al. User cooperation diversity-part II: Implementation aspects and performance analysis[J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(11): 1939 - 1948.
- [9] Laneman J N, et al. Cooperative diversity in wireless networks efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2004, 50(12): 3062 - 3080.
- [10] Hasna M O, Alouini M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh fading channels [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1126 - 1131.
- [11] Anghel P A, Kaveh M. Exact symbol error probability of a cooperative network in a rayleigh-fading environment[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2004, 3(5): 1416 - 1421.
- [12] Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2003, 49(10): 3062 - 3080.
- [13] 程卫军, 朱柏承. 基于最小路由数的多点合作 MRC 系统的性能分析[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1246 - 1250.
Cheng Wei-jun, Zhu Bo-cheng. Performance analysis of multi-node cooperative MRC system with minimum routes[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1246 - 1250. (in Chinese)
- [14] Liu Q, Zhou S, Giannakis G B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2004, 3(5): 1746 - 1755.
- [15] Liu P, Tao Z, Lin Z, Erkip E. Cooperative wireless communications: a cross-layer approach[J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 84 - 92.
- [16] Zhao B, Valenti M C. Practical relay networks: A generalization of Hybrid-ARQ [J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 2005, 23(1): 7 - 18.
- [17] Dai L, Lbtaief K B. Cross-layer design for combining cooperative diversity with truncated ARQ in ad-hoc wireless networks[A]. Proceedings of IEEE Globecom [C]. St Louis, MO, USA: IEEE Press, 2005, 3175 - 3179.
- [18] Tarokh V, Jafarkhan H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal design[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1999, 45(5): 1456 - 1467.
- [19] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE J Selet Areas Commun, 1998, 16(8): 1451 - 1458.
- [20] Simon M K, Alouini M S. Digital Communication Over Fading Channels: A Unified Approach To Performance Analysis [M]. John Wiley & Son, Inc., 2000.
- [21] Xu F, Lau F C M, Yue D W. Cross-layer design scheme for multihop communications [J]. Electronics Letters, 2007, 43(14): 762 - 764.
- [22] Shin H, Lee H J. Exact symbol error probability of orthogonal space-time block codes[A]. Proc. IEEE Globecom 2002[C]. Taipei, Taiwan, IEEE Press, 2002. 1197 - 1201.
- [23] Golksmith A J, Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45(10): 1218 - 1230.
- [24] Alouini M S, Golksmith A J. Adaptive modulation over Nakagami fading channels[J]. Kluwer Journal on Wireless Communications, 1998, 16(8): 1451 - 1458.

作者简介:



徐 峰 男, 1981 年出生于黑龙江, 大连海事大学信息科学技术学院博士研究生, 主要研究方向为空时编码技术和协作通信技术等。
E-mail: xfeng6163 @tom.com



岳殿武 男, 1965 年出生于吉林, 大连海事大学信息科学技术学院教授、博士生导师, 主要研究方向为协作通信技术、多天线理论、纠错编码、信息安全等。