

一种机会协作重传协议及其性能分析模型研究

崔海霞^{1,2}, 韦岗¹, 张军¹

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 2. 广州大学物理与电子工程学院, 广东广州 510006)

摘 要: 本文基于机会中继协作通信系统的优良特性, 改进了传统的多中继 ARQ (Automatic Repeat Request) 协作分集机制, 联合物理层与数据链路层优化了无线频谱与能量的利用率, 并且首次提出了采用 Markov (马尔可夫) 吸收链方法的端到端性能分析模型. 在此分析模型的基础上, 对本文改进的机会协作重传协议进行了端到端成功传输概率、丢包率、时延、吞吐量等性能参数的数值分析, 最后用仿真实验对此模型进行了验证, 详细讨论了最大重传次数、信道衰落参数、总发送功率等对性能的影响. 结果表明, 本文改进的机会协作重传协议在节能、抗信道衰落方面, 表现出了比直接重传协议和传统的多中继协作重传协议具有更优越的性能.

关键词: 协作分集; 机会中继; Markov 吸收链

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2410-06

An Opportunistic Cooperative Retransmission Protocol and the Research of Its Performance Analytical Model

CUI Hai-xia^{1,2}, WEI Gang¹, ZHANG Jun¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. School of Physics and Electronics Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: Based on the eminent characteristics of opportunistic relaying cooperative communication system, this paper improves the conventional multi-relay ARQ (Automatic Repeat Request) cooperative diversity scheme, and optimizes the utility of wireless spectrum and energy by designing physical layer and data link layer jointly. The end-to-end performance analytical model using absorbing Markov chain is firstly proposed. With the application of this proposed analytical model, we analyze our improved opportunistic cooperative retransmission protocol's performance parameters in terms of probability of end-to-end delivery success, probability of end-to-end delivery failure, delay, and throughput. Simulation results are finally provided to verify the correctness of our proposed analytical model, and the effects of the maximal retransmission times, channel fading parameters, and total transmission power on performance are discussed in detail. Our numerical results show that our improved opportunistic cooperative retransmission protocol has several desirable characteristics in energy saving and channel fading overcoming compared to other schemes, such as direct retransmission protocol and conventional multi-relay cooperative retransmission protocol.

Key words: cooperative diversity; opportunistic relaying; absorbing Markov chain

1 引言

基于多天线的 MIMO^[1] (Multi-Input Multi-Output) 技术可以有效地抵抗无线信道的多径衰落, 并且利用空间分集可以在不增加发送功率与无线带宽的情况下提高系统的传输可靠性. 但是由于体积、能耗、硬件等条件的限制, 移动终端用户往往无法支持多根天线的配置. 鉴于无线信道的广播特性, 多个节点之间可以共享彼此的天线组成一个虚拟的天线阵列, 协作传输各自的数据信息, 协作分集的思想便由此产生了, 并成为近年来无线通信领域的研究热点^[2,3].

现有的协作中继协议中, 分布式空时码^[4]与波束赋型^[5]都受到了广泛的关注, 并且取得了显著的性能增益. 但是这种多中继的协作机制, 随着参与协作的节点数增多, 频谱效率与能量效率会有一定程度的下降, 同时会带来同步、节点间协调等系列问题. 文献[6~8]针对此难题提出了最佳协作中继选择的传输机制, 并且分析了其在各种状态下的性能, 验证了单中继协议的有效性. 机会协作传输^[8]就是在成功解码源节点广播信息的中继节点中, 选择一个到目的节点链路最优的中继节点进行协作传输. 文献[9,10]分别对机会中继协议在独立 Nakagami- m 衰落信道与瑞利衰落信道中的中断概率进

行了详细的分析.遗憾的是,这些机制与分析都单纯考虑的是物理层协作分集,无线网络的跨层设计是利用不同协议层之间的关系来提升系统的整体性能,文献[11]提出了联合物理层与媒质接入层的协作通信机制,提高了系统的能量效率,文献[12,13]提出了联合物理层与数据链路层的 C-ARQ(Cooperative ARQ)协作分集机制,并且分析了 C-ARQ 对复用-分集均衡的改进.另外,文献[13]给出了分簇多跳多中继 ARQ 协作分集机制的端到端性能分析模型,但是此模型并未考虑数据包在节点队列的等待时间,而且多个中继节点协助单个用户转发数据也会消耗大量的频谱与能量资源,不符合实际应用.

因此,建立合理的基于跨层的单中继网络端到端性能分析模型对系统的性能分析及优化设计有着重要的意义,具有很大的挑战性.本文的创新之处与主要贡献在于:针对每个用户只有一个机会中继的协作情况,对联合物理层与数据链路层的多中继 C-ARQ 协议进行了改进,并且首次提出了马尔可夫吸收链分析模型;在此分析模型的基础上,对本文提出的跨层机会协作重传协议进行了端到端成功传输概率、丢包率、时延和吞吐量等性能参数的数值分析;最后用仿真实验对此模型进行了验证,对一些重要参数对性能的影响进行了讨论分析,并与直接重传协议和传统的多中继协作重传协议进行了比较.

2 机会协作重传协议

机会协作重传机制的基本结构如图 1 所示,为了便于分析说明,本文只把单个数据包的发送与接收作为研究对象,网络中有 N 个移动终端节点与一个基站(Base station),除了源节点(Source)之外的 $N-1$ 个终端节点均可作为源节点的候选中继(Relay),每个终端节点仅配有单根天线,半双工传输信息,基站作为目的节点(Destination)接收源节点发送的信息.

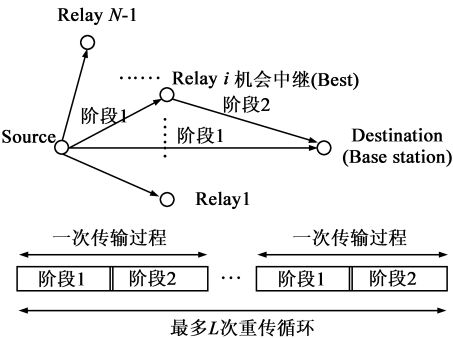


图1 机会协作重传机制

每次传输过程分为两个阶段:阶段 1 和阶段 2.在阶段 1 开始时刻,源节点向目的节点广播发送数据包,每个阶段的时隙长度应稍稍大于传输一个数据包所需

要的时间,用来保证数据包与控制信息的可靠传输.目的节点首先要对接收数据进行循环冗余码(Cyclic Redundancy Code, CRC)校验,校验正确则对源节点发回确认信息(ACK);否则,发回接收错误信息(NACK),同时在能正确 CRC 校验源节点发送的广播数据包,并且接收到 NACK 包的其余移动终端节点中,选择一个到目的节点链路条件最优的节点作为机会协作中继节点,在阶段 2 进行解码前传(Decode-and-Forward, DF),协作源节点传输数据,目的节点对阶段 1 与阶段 2 接收到的信息用最大比合并(Maximum ratio combiner, MRC)进行解码校验,这里假定反馈信道是无差错理想信道.如果目标节点还是未能成功地接收到数据包,那么在阶段 2 结束后重新进入下一个循环重传过程,选择相同的传输机制,源节点与中继节点继续重传,重传过程一直持续到最大传输次数 L ,即最多 L 次重传循环,目标如果仍然没有正确接收,则做丢包处理.文中的最佳机会中继节点的选择可以利用文献[8]中的分布式计时器获得.

对传统的多中继 ARQ 协作分集机制的改进在于:机会中继节点的选择是随着信道的变化而变化的,每次不同的重传循环有可能得到不同的中继节点,也就是说中继不是固定的;也不是所有能正确解码源节点信息的节点都作为中继进行协作.这样既可以实时地抵抗无线信道的衰落,又可以避免大量中继节点的频谱与能耗浪费,提高了无线资源的利用率.

3 分析模型

3.1 协议分析模型

假定中继节点暂时没有数据收发,或者是有数据收发但优先级小于源节点的数据,图 2 给出了协议的分析模型.

新产生的数据包以速率 λ 到达节点,首先通过排队等待接入信道.如果接入信道成功,则源节点在阶段

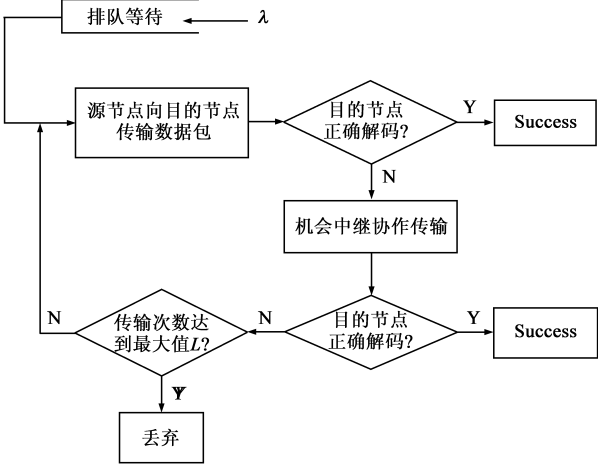


图2 协议分析模型

1 开始时刻向目的节点广播发送数据包, 机会协作传输协议开始执行; 否则, 继续在源节点缓存队列内等待, 这里假定节点缓存足够大, 不考虑拥塞、溢出等问题。

设 h_{sd} , h_{sr} 和 h_{rd} 分别表示源与目标、中继之间以及中继与目标之间的信道增益, 且分别服从参数为 (m_{sd}, Ω_{sd}) , (m_{sr}, Ω_{sr}) 和 (m_{rd}, Ω_{rd}) 的 Nakagami- m 分布, 源节点与中继节点的发送功率分别为 p_s , p_r 。在一次传输过程的阶段 1 结束后, 目的节点与中继节点的接收信噪比 γ_{sd} , γ_{sr} 分别为

$$\gamma_{sd} = p_s |h_{sd}|^2 / N_0 \quad (1)$$

$$\gamma_{sr} = p_s |h_{sr}|^2 / N_0 \quad (2)$$

其中 N_0 是高斯白噪声信号功率强度。机会中继协作传输后, 即阶段 2 结束后, 目的节点的接收信噪比 γ_{MRC} 为^[9]

$$\gamma_{MRC} = (p_s |h_{sd}|^2 + p_r |h_{rd}|^2) / N_0 \quad (3)$$

本文考虑采用 M-PSK 方式调制数据包, 调制等级 $b = \log_2 M$ 表示一个调制符号里面包含的比特数, 根据文献[14], 接收误符号率 (Symbol Error Rate, SER) $P_{sym,e}$ 在接收信噪比 γ 条件下的通用表达式为

$$P_{sym,e}(\gamma) = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \exp(-\gamma \frac{\sin^2(\pi/M)}{\sin^2\theta}) d\theta \quad (4)$$

再利用 Nakagami- m 分布特性, 信道增益的概率密度函数^[14]

$$f(h) = \frac{2m^m h^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp(-\frac{mh^2}{\Omega}) \quad (5)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数, 结合文献[15]中的矩生成函数 (Moment Generating Function, MGF), 可得, 在阶段 1, 源节点到目的节点的直接传输 SER 为

$$\begin{aligned} P_{sym,e}(\gamma_{sd}) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \exp(-\frac{p_s |h_{sd}|^2 \sin^2(\pi/M)}{N_0 \sin^2\theta}) d\theta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + \frac{p_s \Omega_{sd} \sin^2(\pi/M)}{N_0 m_{sd} \sin^2\theta})^{-m_{sd}} d\theta \end{aligned} \quad (6)$$

源节点到机会中继节点的 SER 为

$$\begin{aligned} P_{sym,e}(\gamma_{sr}) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \exp(-\frac{p_s |h_{sr}|^2 \sin^2(\pi/M)}{N_0 \sin^2\theta}) d\theta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + \frac{p_s \Omega_{sr} \sin^2(\pi/M)}{N_0 m_{sr} \sin^2\theta})^{-m_{sr}} d\theta \end{aligned} \quad (7)$$

同理可得, 若机会中继正确解码源节点数据包, 在阶段 2, 目的节点的合并 SER 为

$$\begin{aligned} P_{sym,e}(\gamma_{MRC}) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \exp(-\frac{(p_s |h_{sd}|^2 + p_r |h_{rd}|^2) \sin^2(\pi/M)}{N_0 \sin^2\theta}) d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + \frac{p_s \Omega_{sd} \sin^2(\pi/M)}{N_0 m_{sd} \sin^2\theta})^{-m_{sd}} \\ &\quad \cdot (1 + \frac{p_r \Omega_{rd} \sin^2(\pi/M)}{N_0 m_{rd} \sin^2\theta})^{-m_{rd}} d\theta \end{aligned} \quad (8)$$

令 N_{packet} , N_{CRC} 分别表示单个数据包和 CRC 的比特数, $P_e(\gamma_{sd})$, $P_e(\gamma_{sr})$, $P_e(\gamma_{MRC})$ 分别是源到目标、源到机会中继、合并到目标的数据包错误接收概率, 则

$$P_e(\gamma_{sd}) = 1 - (1 - P_{sym,e}(\gamma_{sd}))^{N_{packet}/b} \quad (9)$$

$$P_e(\gamma_{sr}) = 1 - (1 - P_{sym,e}(\gamma_{sr}))^{N_{packet}/b} \quad (10)$$

$$P_e(\gamma_{MRC}) = 1 - (1 - P_{sym,e}(\gamma_{MRC}))^{N_{packet}/b} \quad (11)$$

对于 Nakagami- m 衰落信道的参数, 这里几点需要说明: 当参数 m 值越小的时候, 信道衰落的越严重, 比如 m 等于 1 就是我们常见的瑞利衰落信道模型; 当 m 值越大的时候, 信道也越平坦, 比如 m 趋向无穷的时候, 信道近似为无任何衰落。

3.2 Markov 吸收链模型

源节点的任何一个数据包在进入信道以后, 可能处于三种状态: 成功接收态、失败接收态和传输过程态, 如图 3 所示。如果没有找到成功解码的最优机会中继节点, 那么直接转移到下一个重传循环。目的节点成功接收数据包后, 则此数据包处于成功接收态; 重传 L 次后还是未能成功接收, 则数据包回到失败接收态, 即丢包; 其余的过程都属于传输过程态。当数据包进入成功接收态与失败接收态之后, 就被吸收, 不再转移, 这是典型的 Markov 吸收链模型。

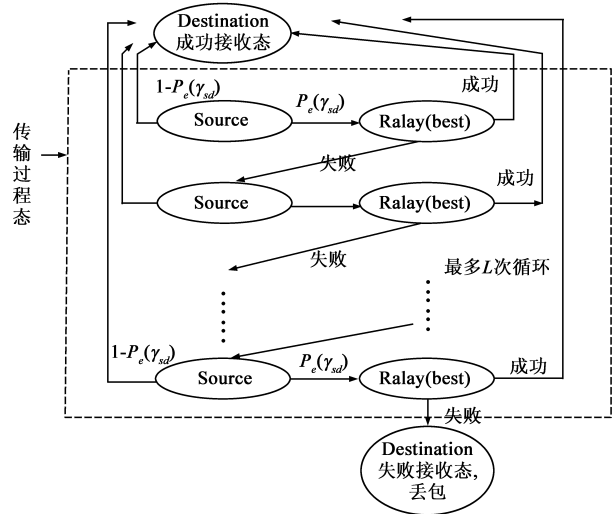


图3 Markov状态转移图

每个传输状态由源节点、中继节点两个发送源与传输循环次数 $k \in [1, L]$ 三个因素所决定, 系统的一步转移概率矩阵可以表示为下列形式:

$$P = \begin{bmatrix} E & Q \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 E 为传输过程态中不同状态之间的转移概率矩

阵,维数为 $2L \times 2L$; Q 为传输过程态转移到吸收状态的概率,第一列为成功传输概率,第二列为失败传输概率,即丢包率,维数为 $2L \times 2$; I_2 为维数为 2×2 的单位矩阵; 0 为零阵.根据状态转移图,可得源节点在阶段 1 成功传输的概率

$$P\{(Source, k) \rightarrow (\text{成功接收态})\} = 1 - P_e(\gamma_{sd}), 1 \leq k \leq L \quad (13)$$

转移到机会中继的概率

$$P\{(Source, k) \rightarrow (Relay, k)\} = P_e(\gamma_{sd}), 1 \leq k \leq L \quad (14)$$

在阶段 2 成功传输的概率

$$P\{(Relay, k) \rightarrow (\text{成功接收态})\} = (1 - P_e(\gamma_{sr}))(1 - P_e(\gamma_{MRC})), 1 \leq k \leq L \quad (15)$$

转移到下一个循环的概率

$$P\{(Relay, k) \rightarrow (Source, k+1)\} = (1 - P_e(\gamma_{sr}))P_e(\gamma_{MRC}) + P_e(\gamma_{sr}), 1 \leq k \leq L-1 \quad (16)$$

达到最大重传次数后,转移到失败接收态的概率

$$P\{(Relay, k) \rightarrow (\text{失败传输态})\} = (1 - P_e(\gamma_{sr}))P_e(\gamma_{MRC}) + P_e(\gamma_{sr}), k = L \quad (17)$$

4 性能评估

根据吸收链的性质, $F = (I - E)^{-1}$ 为吸收链的基本矩阵,基本矩阵里面的元素为各个非吸收状态之间的平均转移次数.矩阵 $B = FQ$ 里面的元素为从非吸收状态出发,转移到吸收状态的概率,由以上性质可得

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, [P_s, P_f] = AB \quad (18)$$

其中 A 为初始状态概率矩阵,即状态转移是从源节点的第一次传输循环开始, P_s, P_f 分别为源节点到目的节点的端到端成功、失败传输概率(即丢包率).令 T_s, T_f 分别为源节点到目的节点成功、失败传输一个数据包的平均转移次数,同样根据吸收链性质,可得

$$[T_s, T_f] = A(I - E)^{-2}Q \quad (19)$$

由此便可推导出数据包从进入信道到离开信道的传输时延,即数据包在信道中的平均传输时间为

$$D = (T_s + T_f) T_{slot} \quad (20)$$

T_{slot} 为一次传输过程单个阶段的时间长度.吞吐量 Th 定义为单位时间内传输的有效业务量

$$Th = (1 - P_f)(N_{packet} - N_{CRC})/(D + W) \quad (21)$$

其中 W 为数据包在源节点缓存内的等待时延.

针对数据包在源节点缓存内的等待时延,可以近似地用一个 $M/G/1$ 排队模型^[12]来分析,服务速率可以用参数为 $1/D$ 的指数分布来近似,排队等待时延可以表示为

$$W = \frac{\lambda D^2}{1 - \lambda D} \quad (22)$$

这里稳定条件为 $\lambda D < 1$,即数据包到达的速率要小于服务的速率,否则源节点缓存内的数据包排队会越来越长.

5 仿真与讨论

本节通过仿真验证机会协作重传协议端到端性能分析模型的有效性,以及通过此模型分析协议的性能.数值仿真参数采用如下设置: M -PSK 调制方式中的 M 取值为 4,数据包的长度 N_{packet} 为 1000 比特, N_{CRC} 为 16 比特,每次传输过程的时间长度为 2ms,终端节点之间的无线信道均为相互独立的 Nakagami- m 衰落信道,信道的衰落参数在一个调制符号的持续时间内保持不变,不同的调制符号间的信道衰落参数相互独立,各个节点之间的信道受相同的干扰热噪声的影响,信道的反馈信道是理想的信道,均能正确接收 ACK/NACK 信号,并且是在无延迟的情况下传输的.

为了更明显地体现协作通信系统的抗衰落特性,仿真过程中,源节点与目的节点之间的信道衰落比源到中继、中继到目的节点之间的信道衰落严重,即 $m_{sd} = 0.5, m_{sr} = 1.5, m_{rd} = 1.5, \Omega_{sd} = 0.5, \Omega_{sr} = \Omega_{rd} = 1.0$. 所有参与传输此数据包的节点传输功率总和固定为 p ,即传输过程中 $p_s + p_r = p$,传统的多中继 ARQ 协作分集机制中所有节点的发送功率之和也为 p ,并且为了计算方便,本文中假定所有的节点平分总传输功率,例如机会协作中 $p_s = p_r = p/2$. 固定总发送功率的目的是,在总功率一定的情况下,比较其它参数的性能,分析无线资源的利用率.

图 4 给出了机会协作重传协议与直接 ARQ 重传协议、多中继协作重传协议在不同信噪比条件下的端到端失败传输概率理论计算结果和仿真模拟结果,图中的横坐标“信噪比”定义为用于传输的总发射功率 p 与目的端节点的白噪声功率 N_0 的比值.本文中直接 ARQ 重传协议为每次传输过程只有源节点独自发送自己的信息,没有中继节点协助,每次传输过程不分阶段,失败后源节点继续重传;多中继协作重传协议与机会协

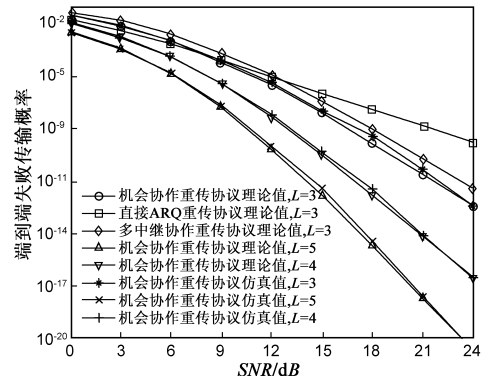


图4 端到端失败传输概率的性能曲线

作重传协议的区别在于,每次传输过程的第二个阶段,前者是能正确解码源节点数据包的所有终端节点均作为源节点的中继进行协作,而后者是在前者所有的中继节点中,选择一个到目的节点链路最优的终端节点作为中继。

图4表明,在最大重传次数 L 取值一定时,机会协作的端到端失败传输概率小于直接 ARQ、多中继协作的此性能参数,多中继协作也优于直接 ARQ。这是因为源节点到目的节点之间的信道衰落比较严重,而直接 ARQ 并没有协作中继节点,而多中继协作虽有效地抵抗了信道衰落,但是由于其协作节点众多(本文取值为3),在总发送功率一定的情况下,每个终端节点的发送功率小于机会协作机制,而其多中继协作往往发送了大量的重复数据,造成了资源的浪费。随着信噪比的提高,发送功率的增加,失败传输概率逐渐变小,重传次数的提高也会降低数据包失败传输的概率。另外,从图4可以看出,通过分析模型得出的理论计算结果与仿真模拟的结果是吻合的,从而验证了本文分析模型的有效性与其正确性。

图5给出了数据包在信道中的平均传输时间 D 与信噪比的关系曲线,由于参数 D 与数据包在源节点缓存内的等待时间 W 之和是数据包的端到端传输时延,并且 D 的大小决定着 W ,在数据包到达速率 λ 一定的条件下,传输时间多意味着等待时间也会多,因此,我们只仿真了 D 参数的性能,端到端时延及 W 的性能趋势与其是相同的。从仿真结果可以看出,当 $\Omega_{sd} = 0.5$ 时,源节点与目的节点之间的信道处于深度衰落,直接 ARQ 重传的时延是最大的,随着信噪比的不断增加,多中继协作与机会协作时延差距变小,这是因为,发送功率的增加使得多中继的能量劣势变小,但是在发送功率比较低到时候,机会协作的优势非常明显;当 $\Omega_{sd} = 1.0$ 时,源节点与目的节点之间的信道与别的信道质量是一致的,这时,直接 ARQ 重传的传输时延是最小的,因为其不需要平分发送功率,也不需要分时段发送。由

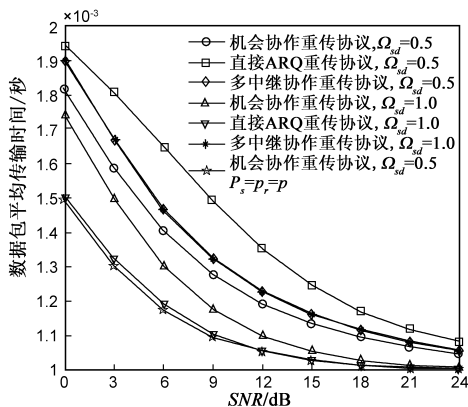


图5 数据包平均传输时间的性能曲线

上可以看出,协作通信系统在抵抗信道衰落方面具有非常优越的性能。如果不考虑能量消耗问题,每个终端节点拥有相同的发送功率 p ,图5中最后一条仿真曲线可以看出,机会协作重传协议的传输时延性能不差于直接 ARQ 重传协议。

图6给出了端到端吞吐量与信噪比的关系曲线,还是前面的信道衰落参数 $m_{sd} = 0.5, m_{sr} = 1.5, m_{rd} = 1.5, \Omega_{sd} = 0.5, \Omega_{sr} = \Omega_{rd} = 1.0$,从图中可以看出,机会协作重传协议由于较小的传输时延,端到端吞吐量最大,原因等同于前面的时延分析。当 m_{sd} 由 0.5 变为 1.5,其余参数不变的情况下,协议的端到端吞吐量增加;同样,当 Ω_{sd} 由 1 变为 2,其余参数均不变化时,协议的吞吐量继续增加。这是因为当信道衰落参数 m_{sd}, Ω_{sd} 数值越大的时候,信道衰落的越小,越平坦,那么成功传输的机会也会变大,端到端吞吐量自然会增加。

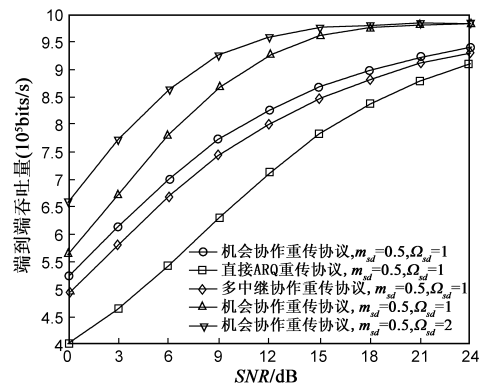


图6 端到端吞吐量的性能曲线

6 结论

本文就传统的多中继 ARQ 协作分集机制进行了改进,联合物理层与数据链路层优化设计了网络资源的利用率,首次提出了基于 Markov 吸收链方法的端到端性能分析模型。在此分析模型的基础上,分析了数据包传输过程中的端到端性能参数,并通过仿真验证了分析模型的正确性,以及机会协作的优越性。主要在抗无线信道衰落及节约能耗的基础上,充分挖掘了机会协作重传协议时分集(通过重传)与空间分集(通过中继协作)的联合优化,大大提高了资源的使用效率。

参考文献:

- [1] S Cui, A J Goldsmith, A Bahai. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO in sensor networks[J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 2004, 22(6): 1089 - 1098.
- [2] J N Laneman, D N C Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2004, 22(12): 3062 - 3080.
- [3] Y W Hong, W J Huang, F H Chiu, C C J Kuo. Cooperative

- communications in resource-constrained wireless networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 47 – 57.
- [4] A Stefanov, E Erkip. Cooperative coding for wireless networks[J]. IEEE Trans Commun., 2004, 52(9): 2415 – 2425.
- [5] H Ochiai, P Mitran, H V Poor, V Tarokh. Collaborative beam-forming for distributed wireless ad hoc sensor networks[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2005, 53(11): 4110 – 4124.
- [6] 邹玉龙, 郑宝玉. 基于分布式中继选择的自适应协作传输方案[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 13 – 20.
Zou Yulong, Zheng Baoyu. Adaptive cooperative transmission scheme based on distributed relay selection[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 13 – 20. (in Chinese)
- [7] 李国兵, 朱世华, 惠 ■. 最佳中继协作通信系统的功率分配算法[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 1944 – 1948.
Li Guobing, Zhu Shihua, Hui Hui. Power allocation in opportunistic cooperative relaying systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1944 – 1948. (in Chinese)
- [8] A Bletsas, H Shin, M Z Win. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2007, 6(9): 3450 – 3460.
- [9] F Xu, F C M Lau, Q F Zhou, D W Yue. Outage performance of cooperative communication systems using opportunistic relaying and selection combining receiver[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(2): 113 – 116.
- [10] J L Vicario, Albert Bel, Jose A. Lopez-Salcedo, G Seco. Opportunistic relay selection with outdated CSI: outage probability and diversity analysis[J]. IEEE Trans Wireless Commun., 2009, 8(6): 2872 – 2876.
- [11] Z Zhou, S L Zhou, J H Cui, S G Cui. Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun., 2008, 7(8): 3066 – 3078.
- [12] I Cerutti, A Fumagalli, P Gupta. Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ Protocols in slotted radio networks with Poisson frame arrivals[J]. IEEE/ACM Trans Networking, 2008, 16(2): 371 – 382.
- [13] L Le, E Hossain. An analytical model for ARQ cooperative diversity in multi-hop wireless networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun., 2008, 7(5): 1786 – 1791.
- [14] Y Lee, M H Tsai. Performance of decode-and forward cooperative communications over Nakagami-m fading channels[J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2009, 58(3): 1218 – 1228.
- [15] M K Simon, M S Alouini. Digital Communication Over Fading Channels[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2004.

作者简介:



崔海霞 女, 1979 年 7 月出生于山东齐河. 华南理工大学博士生, 研究方向为分布式无线网络协作通信、功率控制、信道接入等.
E-mail: cuicuihang@163.com;
cuicuihang0715@gmail.com



韦 岗 男, 1963 年 1 月出生于广西宾阳. 教授、博士生导师、中国电子学会会士、IEEE 高级会员. 现为华南理工大学电信学院院长, 主要从事通信与信号处理方面的研究工作.



张 军 男, 1975 年出生于广东广州. 华南理工大学副教授, 博士, 主要从事通信与信号处理方面的研究工作.