

基于截短 ARQ 协议的协作分集系统吞吐量研究

张广驰,唐 冬,李光平,张 琳,秦家银

(中山大学电子与通信工程系,广东广州 510275;中山大学数字家庭教育部重点实验室,广东广州 510275)

摘 要: 研究协作分集通信系统的跨层设计使系统吞吐量最大化. 首先推导基于截短 ARQ 协议的协作分集和两跳系统的吞吐量理论表达式,揭示数据包长度和调制方式对系统吞吐量的影响,在此基础上用自适应技术优化系统性能,采用连续二维优化求出了吞吐量的最大值,进而提出了实用的二维离散吞吐量优化算法,该算法的优化结果与吞吐量最大值相差很小,最后提出了计算量更小的一维离散优化算法,且其吞吐量性能损失也很小.

关键词: 协作分集; 截短 ARQ 协议; 跨层设计; 自适应技术

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 08-1603-05

Throughput Study of Cooperative Diversity System Based on Truncated ARQ Protocol

ZHANG Guang-chi, TANG Dong, LI Guang-ping, ZHANG Lin, QIN Jia-yin

(Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

Key Laboratory of Digital Life (Sun Yat-sen University), Ministry of Education, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: In this paper, the throughput of a cooperative diversity communication system based on truncated ARQ protocol is studied. The theoretical throughput expressions of cooperative diversity and two-hop systems are derived. According to the expressions, throughput is affected by the MAC layer parameter data packet length L and physical layer parameter modulation level b , so cross-layer design can be used for throughput optimization. By assuming that L and b are continuous variables, the maximum throughput is evaluated by two-dimension (2-D) continuous optimization algorithms. Then a 2-D discrete optimization algorithm is proposed to find the maximum throughput, which is practical for applications. Furthermore, with the knowledge of signal-to-noise ratio (SNR) information, the 2-D algorithm is simplified into a 1-D algorithm. The 1-D discrete algorithm has only a little performance loss compared with the 2-D algorithm.

Key words: cooperative diversity; truncated ARQ protocol; cross-layer design; adaptive techniques

1 引言

多天线技术能够大幅度提高无线通信系统容量,其特征之一是引入了新的分集方式——空间分集 (spatial diversity)^[1]. 然而,在无线 ad hoc 网络、无线传感器网络、蜂窝系统等无线通信网络中,通信终端由于尺寸限制无法配备多根天线. 使用无线中继传输技术^[2~4]在抗信道衰落、增加无线覆盖范围、减小功率损耗等方面有很大的发展潜力. 多跳 (multihop) 系统^[4]使用中继进行数据转发,能减轻信道路径损耗的影响. 协作分集 (cooperative diversity) 系统^[3]也使用中继,它不仅能减轻路径损耗的影响,还能在每个通信终端使用一根天线的情况下获得与多天线技术类似的空间分集增益. 然而,协作分集系统的同一信息要在两个时隙内被重复转发,在等长的时间内它发送的新信息只有直接传输系统的一半. 因

此,提高协作分集系统的传输速率是其需要解决的重要问题.

自适应技术是解决这一问题的办法. 无线通信系统物理层的自适应调制技术^[5]是提高通信速率的有效手段. 然而,随着无线多媒体信息业务对无线数据传输速率和服务质量 (QoS) 的要求越来越高,有必要研究物理层以上的自适应技术. 为此,文献[6]首先进行了有关的研究,通过综合考虑误码率和重传次数对通信系统有效传输速率的影响,定义了吞吐量,并讨论了使用自适应技术最大化吞吐量的方法. 文献[7]讨论了使用自适应调制的协作分集系统的容量. 文献[8]讨论了结合自适应调制的协作分集系统的吞吐量,说明了对系统进行优化的必要性.

在数据链路层,能减弱信道衰落影响的方法是使用检错重发 (automatic repeat request, 简称 ARQ) 协议^[9,10].

在实际系统中,为了保证延迟和通信终端的数据缓存的最小化,重传的次数有上限约束,这样的 ARQ 协议叫做截短 ARQ 协议(truncated ARQ protocol)^[9].

文献[11]提出了基于混合检错重发(hybrid-ARQ)的中继网络的通用模型.文献[12]研究了使用多个中继的、基于截短 ARQ 协议的自适应传输系统,提出了最大化吞吐量的算法.然而,使用多个中继帮一个用户转发数据不适合实际应用.为此,本文针对每个用户只有一个中继的情况,研究在物理层采用协作分集、在数据链路层基于截短 ARQ 协议的传输系统的跨层设计(cross-layer design),根据信道和信噪比信息自适应调整物理层和 MAC 层参数,达到吞吐量的最大化.同时本文还分析和优化了两跳(two-hop)系统(即只使用一个中继的多跳系统),并与直接传输系统的吞吐量进行了比较.

2 系统模型及工作过程

单用户协作分集系统和两跳系统的基本结构都由三个节点构成,如图 1,源节点(简称“源”)有信息需要发送,目标节点(简称“目标”)要接收该信息,中继节点(简称“中继”)帮助源传递信息,每个节点只配备一根天线.源到中继的距离通常小于源到目标的距离. h_{sd} 、 h_{sr} 和 h_{rd} 分别是源与目标、中继之间以及中继与目标之间信道的增益,它们是零均值复高斯随机变量,方差分别为 σ_{sd}^2 、 σ_{sr}^2 和 σ_{rd}^2 .协作分集系统和两跳系统的区别在于:协作分集系统的源可以直接与目标通信;而两跳系统的源不直接与目标通信,其目标只接收中继转发的信息.

基于截短 ARQ 协议的协作分集系统的工作过程如下:源发送一个总长度为 L 比特、包含 C 比特循环冗余校验码(CRC)

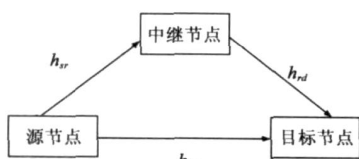


图 1 协作分集系统的基本框图

的数据包.目标和中继同时接收这个数据包,并对接收数据进行 CRC 校验.目标如果 CRC 校验正确,发送接收正确信号 ACK,中继不必转发数据;否则,发送接收错误信号 NACK,告知中继转发数据.中继如果 CRC 校验正确并且收到目标的 NACK 信号,就向目标转发从源收到的数据;否则,告知源做丢包处理.如果目标未能成功接收到来自中继的数据包,中继会继续重发.重传过程一直持续到目标成功接收数据或者重传次数达到了预设的最大重传次数 $N_{r,max}$ 为止.如果经过 $N_{r,max}$ 次重传,目标仍然没有正确接收,做丢包处理.

基于截短 ARQ 协议的两跳系统的工作过程如下:源发送包长为 L 、CRC 码长度为 C 的数据包.中继对接收数据进行 CRC 校验,校验正确就转发该数据,校验错

误就要求源重传,重传次数不能超过 $N_{1,max}$ 次,否则源做丢包处理.目标接收并校验来自中继的数据,校验错误就要求中继重传,传送次数不能超过 $N_{2,max}$ 次,否则做丢包处理.

3 系统的吞吐量分析

本文考虑一个采用方形 M-QAM 调制的未编码系统.在使用理想奈奎斯特脉冲的方形 M-QAM 调制中,调制水平(modulation level)定义为 $b = \log_2 M$,表示一个调制符号里包含的比特数.若符号速率不变, b 可以代表 M-QAM 的特性.根据文献[6,12],吞吐量的定义是单位带宽下成功接收的有效信息的速率.对于一个基于截短 ARQ 协议、采用方形 M-QAM 调制的未编码传输系统,假设 CRC 校验能查出所有错误,忽略应答信号(ACK 或 NACK)对吞吐量的影响,其吞吐量通式为:

$$T_{ARQ} = \frac{L-C}{L} b P_{suc} / \bar{N} \quad (1)$$

其中 P_{suc} 是系统成功传输数据包的概率, $\bar{N}$ 是每个数据包的平均传输次数.

基于截短 ARQ 协议的直接传输系统的吞吐量为^[6,12]:

$$T_{dir} = \frac{L-C}{L} b (1 - p_{sym, sd})^{L/b} \quad (2)$$

其中 $p_{sym, sd}$ 是从源向目标传输的误符号率^[13]:

$$p_{sym, sd} \approx 2(1 - 2^{-b/2}) \left[1 - \frac{3\gamma_{sd}}{\sqrt{2(2^b - 1) + 3\gamma_{sd}}} \right], b \geq 2 \quad (3)$$

$\gamma_{sd} = \sigma_{sd}^2 P_s / N_0$,是源与目标间信道的平均符号信噪比, P_s 是源的发射功率, N_0 是加性高斯白噪声功率.

基于截短 ARQ 协议的协作分集系统的吞吐量为:

$$T_{cd} = \frac{L-C}{L} b P_{suc, cd} / \bar{N}_{cd} \quad (4)$$

$P_{suc, cd}$ 为系统成功传输数据包的概率:

$$P_{suc, cd} = 1 - p_{sd} [p_{sr} + (1 - p_{sr}) p_{rd}^{N_{r,max}}] \quad (5)$$

$\bar{N}_{cd}$ 为平均传输次数:

$$\bar{N}_{cd} = 1 \cdot (1 - p_{sd}) + \sum_{i=1}^{N_{r,max}} (i+1) p_{sd} (1 - p_{sr}) p_{rd}^{i-1} (1 - p_{rd}) + (N_{r,max} + 1) p_{sd} (1 - p_{sr}) p_{rd}^{N_{r,max}} + 1 \cdot p_{sd} p_{sr} \quad (6)$$

上式等号右边第一项代表源向目标传输成功;第二项代表中继经过 i ($i \leq N_{r,max}$) 次传输最终成功;第三项代表中继 $N_{r,max}$ 次传输仍未成功;第四项代表源向中继传输失败.其中 p_{sd} 、 p_{sr} 、 p_{rd} 分别是源到目标、源到中继、中继到目标传输的数据包错误概率:

$$p_{sd} = 1 - (1 - p_{sym, sd})^{L/b} \quad (7)$$

$$p_{sr} = 1 - (1 - p_{sym, sr})^{L/b} \quad (8)$$

$$p_{rd} = 1 - (1 - p_{sym, rd})^{L/b} \quad (9)$$

$p_{\text{sym},sr}$ 和 $p_{\text{sym},rd}$ 分别是源到中继、中继到目标的误码率,它们可以采用式(3)的方法求得.结合式(4)~(9)可以求得基于截短 ARQ 协议的协作分集系统的吞吐量表达式.

同理,基于截短 ARQ 协议的两跳系统的吞吐量为:

$$T_{2\text{hop}} = \frac{L - C}{L} b P_{\text{suc},2\text{hop}} / N_{2\text{hop}} \quad (10)$$

$P_{\text{suc},2\text{hop}}$ 为系统成功传输数据包的概率:

$$P_{\text{suc},2\text{hop}} = 1 - [p_{sr}^{N_{1,\max}} + (1 - p_{sr}^{N_{1,\max}}) p_{rd}^{N_{2,\max}}] \quad (11)$$

$N_{2\text{hop}}$ 为平均传输次数:

$$\begin{aligned} N_{2\text{hop}} = & \sum_{i=1}^{N_{1,\max}} \sum_{k=1}^{N_{2,\max}} (i+k) p_{sr}^{i-1} (1-p_{sr}) p_{rd}^{k-1} (1-p_{rd}) \\ & + \sum_{n=1}^{N_{1,\max}} (n+N_{2,\max}) p_{sr}^{n-1} (1-p_{sr}) p_{rd}^{N_{2,\max}} + N_{1,\max} p_{sr}^{N_{1,\max}} \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(10)~(12)可以求得基于截短 ARQ 协议的两跳系统的吞吐量表达式.

在本文中,三个节点之间的无线信道采用通用的独立的平坦瑞利衰落信道^[12],信道衰落系数在一个调制符号的持续时间内保持不变,不同调制符号间的信道衰落系数相互独立;各节点间信道受相同的阴影衰落影响,信道的大尺度衰落的衰减因子为 4^[8,14].每个接收机能够获得理想的信道状态信息,并且应答信号(ACK 或 NACK)是在无错无延迟的信道上传输的.中继位于源与目标的连线上^[14].源到目标、源到中继、中继到目标的归一化距离分别为 $d_{sd} = 1$, $d_{sr} = 0.3$, $d_{rd} = 0.7$ ^[8].CRC 码长度固定为 $C = 16$ 比特^[6,12],协作分集系统的 $N_{r,\max} = 3$,两跳系统的 $N_{1,\max}$ 和 $N_{2,\max}$ 等于 3,源的发射功率 P_S 和中继的发射功率 P_R 相等.令数据包长度 $L = 120$ 比特,采用 QPSK 调制(即 $b = 2$).图 2 给出了此时基于截短 ARQ 协议的直接传输、协作分集和两跳系统在不同信噪比条件下的吞吐量的理论计算结果和十万次计算机仿真结果.图中横坐标“信噪比”定义为用于传输的总发射功率与目标的接收端的噪声功率的

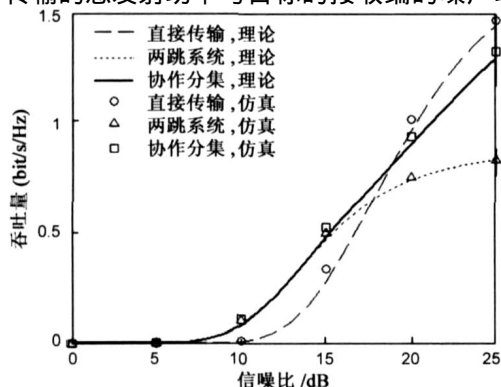


图 2 吞吐量的理论分析和仿真比较 ($L=120$ 、 $b=2$)

比值(用 γ 表示):在直接传输系统中, $\gamma = P_S / N_0$;在协作分集和两跳系统中, $\gamma = (P_S + P_R) / N_0$.如图所示,理论计算和计算机仿真结果吻合,证明了上述理论推导的正确性.

4 系统的吞吐量优化

根据理论分析,数据包长度 L 和调制参数 b 的取值决定了吞吐量的大小.因此,根据信道和信噪比信息自适应地在 MAC 层调整 L 值,在物理层调整 b 值,可以使系统的吞吐量最大化.假设 L 和 b 是连续变化的,当信噪比为 20dB 时基于截短 ARQ 协议的协作分集系统的吞吐量曲面如图 3 所示,其他两种系统的吞吐量曲面和图 3 类似.由图 3 可见曲面很平滑,使用已有的最优化算法(如 Hooke-Jeeves 算法^[15])可以求得最优的 L 和 b 取值以及对应的吞吐量最大值.

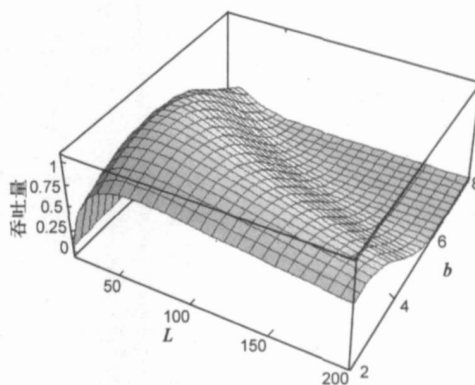


图 3 基于截短 ARQ 协议的协作分集系统的吞吐量曲面(信噪比为 20dB)

在不同信噪比条件下,三种系统的最优化吞吐量如图 4.由图 4 可见与 $L = 120$ 、 $b = 2$ 时相比,经过参数优化后的三种系统的吞吐量都有大幅度提高.

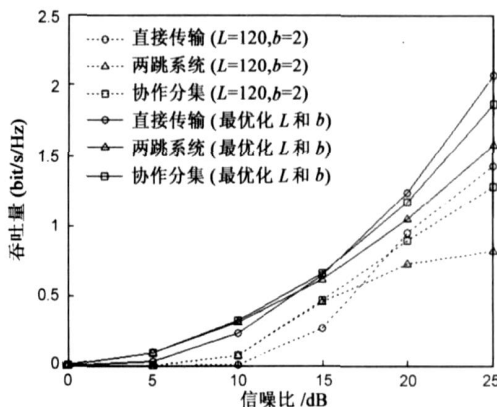


图 4 当 L 和 b 取值固定和最优化取值时的系统吞吐量比较

以上讨论都基于 L 和 b 是连续的假设,但实际上 L 和 b 取值是离散的.因为系统使用方形 M-QAM 调制,所以 b 必须是偶数;一个包含 CRC 码的数据包必须包含整数个调制符号,那么 $L > C$ 且 $L = nb$ (n 是正整数).在离散条件下,计算每一个可能的离散 L 和 b 的

组合,一定能找到使吞吐量最大的 L 、 b 组合.但是这种方法带有盲目性,计算量大,不适合对延时有严格要求的通信系统.虽然根据系统吞吐量表达式无法判断吞吐量的凹凸性,但是根据图 3,在 L 、 b 的实际取值范围内,吞吐量曲面连续平滑只有一个最大值.从 b 的最小值开始,搜索合适的 L 使吞吐量最大,然后对逐步增加的 b 做同样的操作;若发现吞吐量最大值开始下降,搜索过程结束.此搜索过程找到的最大吞吐量就是最优吞吐量.根据这个特点,我们提出了一个吞吐量二维离散优化算法,求离散条件下吞吐量的最优值和相应的 L 、 b 组合.令 $f(L, b)$ 表示包长为 L 、每个调制符号包含 b 比特信息时的系统吞吐量表达式, $\text{mod}(x, y)$ 表示整数 x 除以整数 y 的余数,算法输出的最优值用 $T_{\text{opt}} \setminus L_{\text{opt}} \setminus b_{\text{opt}}$ 表示.算法的具体步骤如下:

(1) 初始化,令 $k = 1$.

(2) $b_{\text{temp}} = 2k$, $L_{\text{temp}} = C + b_{\text{temp}} - \text{mod}(C + b_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$, $T_{\text{temp}} = f(L_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$.

(3) $T_{\text{temp2}} = f(L_{\text{temp}} + b_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$.

(4) 如果 $T_{\text{temp}} < T_{\text{temp2}}$, 则 $T_{\text{temp}} = T_{\text{temp2}}$, $L_{\text{temp}} = L_{\text{temp}} + b_{\text{temp}}$, 到步骤(3);否则, $T_{\text{opt}} = T_{\text{temp}}$, $L_{\text{opt}} = L_{\text{temp}}$, $b_{\text{opt}} = b_{\text{temp}}$.

(5) $k = k + 1$.

(6) $b_{\text{temp}} = 2k$, $L_{\text{temp}} = L_{\text{opt}} - \text{mod}(L_{\text{opt}}, b_{\text{temp}})$, $T_{\text{temp}} = f(L_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$, $T_{\text{temp2}} = f(L_{\text{temp}} - b_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$.

(7) 如果 $T_{\text{temp}} < T_{\text{temp2}}$, 到步骤(8);否则,到步骤(9).

(8) $T_{\text{temp}} = T_{\text{temp2}}$, $L_{\text{temp}} = L_{\text{temp}} - b_{\text{temp}}$, $T_{\text{temp2}} = f(L_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$;如果 $T_{\text{temp}} < T_{\text{temp2}}$, 重新开始步骤(8);否则,到步骤(10).

(9) $T_{\text{temp2}} = f(L_{\text{temp}} + b_{\text{temp}}, b_{\text{temp}})$;如果 $T_{\text{temp}} < T_{\text{temp2}}$, 则 $T_{\text{temp}} = T_{\text{temp2}}$, $L_{\text{temp}} = L_{\text{temp}} + b_{\text{temp}}$, 重新开始步骤(9);否则,到步骤(10).

(10) 如果 $T_{\text{opt}} < T_{\text{temp}}$, 则 $T_{\text{opt}} = T_{\text{temp}}$, $L_{\text{opt}} = L_{\text{temp}}$, $b_{\text{opt}} = b_{\text{temp}}$, 到步骤(5);否则,算法结束.

为验证上述算法的有效性,我们比较了使用连续优化算法和离散优化算法的系统吞吐量.如图 5 所示,使用此离散优化算法的系统吞吐量与用连续优化求出的系统吞吐量最大值相差很小.表 1 列举了三种系统在不同信噪比条件下离散算法得出的 L 和 b 的最优值.

表 1 离散算法得出的不同系统在不同信噪比下的最优 L 、 b 值

信噪比		0dB	5dB	10dB	15dB	20dB	25dB
直接传输	L	20	22	28	42	40	60
	b	2	2	2	2	4	4
两跳系统	L	20	26	38	62	60	60
	b	2	2	2	2	4	6
协作分集	L	20	26	36	50	48	64
	b	2	2	2	2	4	4

上面我们讨论了吞吐量的二维优化问题.分析图 4、5 和表 1,可以发现:在信噪比较低时, b 的最优值固定为 2, L 的取值对吞吐量大小影响更明显;在信噪比较高时,增大 b 才能显著提高吞吐量, L 的最优值在 40 到 70 之间.当信噪比较低时,固定 $b = 2$,通过搜索最优的 L (步骤类似于上述二维算法的步骤(3)和(4)),使吞吐量 $T_{L, \max}(Y)$ 最大;当信噪比较高时,固定 $L = L_0$ (例如 $L = 60$),通过搜索最优的 b ,使吞吐量 $T_{b, \max}(Y)$ 最大.当 $Y \rightarrow 0$ 时,两种算法的 b 都等于 2, 因为 $T_{L, \max}(Y)$ 能动态调整 L , 所以 $T_{L, \max}(Y) > T_{b, \max}(Y)$; 当 $Y \rightarrow \infty$ 时, 因为 $T_{L, \max}(Y) \rightarrow 2$, $T_{b, \max}(Y) \rightarrow \infty$, 所以 $T_{L, \max}(Y) < T_{b, \max}(Y)$. 因为 $T_{L, \max}(Y)$ 和 $T_{b, \max}(Y)$ 是 Y 的单增函数, 所以只存在一个 $Y = Y_{th}$ 使二者相等. 因此, 二维优化简化为一维优化: 当 $Y < Y_{th}$ 时, 固定 $b = 2$, 搜索最优的 L ; 当 $Y \geq Y_{th}$ 时, 固定 $L = L_0$, 搜索最优的 b . 应用二分法求解方程 $T_{L, \max}(Y) = T_{b, \max}(Y)$ 可以求得 Y_{th} . 图 6 是协作分集系统的一维和二维优化算法的吞吐量比较图. 图中 $L_0 = 60$, 区分两个一维算法的信噪比阈值 Y_{th} 为 17.73dB. 当信噪比小于 17.73dB 时, 一维优化 L 和二维优化有相同的性能; 当信噪比大于 17.73dB 时, 一维优化 b 的性能与二维优化的性能十分接近. 对二维算法的简化进一步降低了系统优化的计算复杂度.

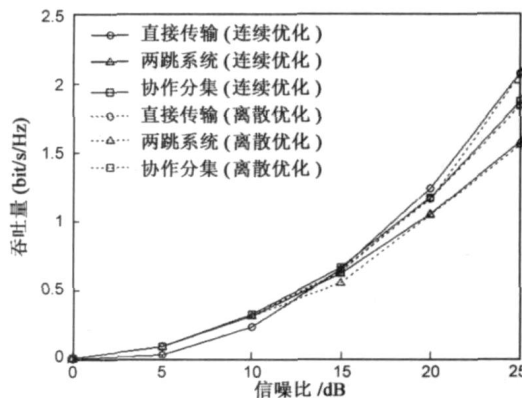


图 5 连续优化和离散优化的系统吞吐量比较

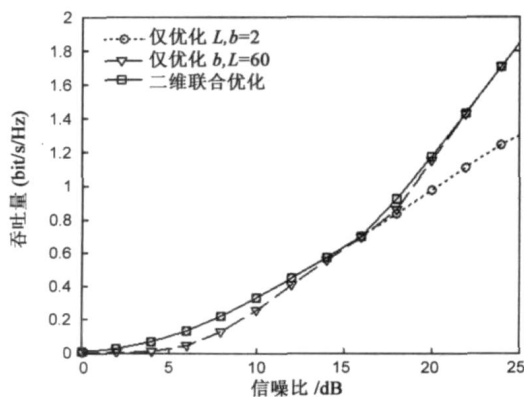


图 6 协作分集系统吞吐量一维和二维优化算法的比较

5 结论

本文研究了协作分集通信系统的跨层设计使系统吞吐量最大化. 推导了基于截短 ARQ 协议的协作分集和两跳系统的吞吐量表达式. 根据系统吞吐量表达式, 选择合适的 MAC 层参数数据包长 L 和物理层参数调制水平 b , 可以优化系统吞吐量. 针对 L 和 b 是离散值的实际情况, 我们提出了一种吞吐量二维离散优化算法, 其结果与用连续优化算法求出的吞吐量最大值十分接近. 在此基础上, 我们进一步提出了通过判断信噪比的大小用计算量更小的一维优化算法取代二维优化算法. 相应的计算机仿真结果证明了我们所提算法的有效性.

参考文献:

- [1] Paulraj A, Nabar R, Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity part I: system description [J]. IEEE Trans Commun, 2003, 51 (11): 1927 - 1938.
- [3] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2004, 50 (12): 3062 - 3080.
- [4] Boyer J, Falconer D D, Yanikomeroglu H. Multihop diversity in wireless relaying channels [J]. IEEE Trans Commun, 2004, 52 (10): 1820 - 1830.
- [5] Goldsmith A J, Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels [J]. IEEE Trans Commun, 1997, 45 (10): 1218 - 1230.
- [6] Lavery R J. Throughput optimization for wireless data transmission [D]. New York: Polytechnic University, 2001.
- [7] Hasna M O. On the capacity of cooperative diversity systems with adaptive modulation [A]. Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN) [C]. Dubai: IEEE Press, 2005. 432 - 436.
- [8] Lin Z, Erkip E, Ghosh M. Adaptive modulation for coded cooperative systems [A]. Proceedings of 2005 International Workshop on Signal Processing Advances for Wireless Communications (SPAWC) [C]. New York: IEEE Press, 2005. 615 - 619.
- [9] Malkamaki E, Leib H. Performance of truncated type-II hybrid ARQ schemes with noisy feedback over block fading channels [J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48 (9): 1477 - 1487.
- [10] Liu Q, Zhou S, Giannakis G B. Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 3 (5): 1746 - 1755.
- [11] Zhao B, Valenti M C. Practical Relay Networks: A Generalization of Hybrid-ARQ [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2005, 23 (1): 7 - 18.
- [12] Dai L, Letaief K B. Throughput maximization of ad-hoc wireless networks using adaptive cooperative diversity and truncated ARQ [DB/OL]. <http://hdl.handle.net/1783.1/2252>, 2005/2006-09-21.
- [13] Goldsmith A. Wireless Communications [M]. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2005.
- [14] Hasna M O, Alouini M S. Optimal Power Allocation for Relayed Transmissions Over Rayleigh Fading Channels [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 3 (6): 1999 - 2004.
- [15] Bazaraa M S, Sherali H D, Shetty C M. Nonlinear programming: theory and algorithms [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.

作者简介:



张广驰 男, 1982 年生, 中山大学信息科学与技术学院博士研究生, 主要研究方向为多输入多输出 (MIMO) 技术、协作通信技术以及无线通信系统性能优化. E-mail: guangchi @gmail.com

唐冬 男, 1967 年生, 广州大学副教授, 中山大学信息科学与技术学院博士. 主要研究方向为多输入多输出 (MIMO) 技术.

李光平 男, 1981 年生, 中山大学信息科学与技术学院博士研究生. 主要研究方向为多输入多输出 (MIMO) 技术以及多用户信息论.

张琳 女, 1976 年生, 中山大学信息科学与技术学院副教授, 博士, 研究方向为纠错编码及下一代无线通信新技术.

秦家银 男, 1961 年生, 中山大学信息科学与技术学院副院长, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为无线 CDMA 与新一代宽带无线移动通信技术.