



中国通信学会学术会议文集

2008 年

通信理论 与信号处理学术年会 论·文·集

2008年10月
河南·郑州

◎ 高世海 葛临东 刘伟 韩旭 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

2008 年通信理论与信号处理 学术年会论文集

高世海 葛临东 刘 伟 韩 旭 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本论文集收录论文 84 篇, 范围涉及 MIMO 与 OFDM 技术、编码、译码与解调、信道估计与均衡、认知无线电与网络新技术、信息与网络安全、自适应信号处理、阵列信号处理、雷达信号处理、语音信号处理、图像与多媒体信息处理、DSP 应用、基础理论与方法等方面的内容。

本书适合通信、电子、信号与信息处理领域的科研人员 and 高校师生阅读。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

2008 年通信理论与信号处理学术年会论文集 / 高世海, 葛临东主编. —北京: 电子工业出版社, 2008.10
ISBN 978-7-121-07478-3

I. 2… II. ①高… ②葛… III. ①通信理论—学术会议—文集 ②数字信号—信号处理—学术会议—文集
IV. TN911-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 152208 号

责任编辑: 竺南直

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 35 字数: 896 千字

印 次: 2008 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 128.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会
2008 年通信理论与信号处理学术年会

主办 (Sponsor):

中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会
(CIC Communications & Signal Processing Society)

承办 (Organizer):

解放军信息工程大学
(Information Engineering University)

协办 (Co-sponsor):

IEEE 通信学会南京分会
(IEEE Communications Society Nanjing Chapter)

大会主席:

邬江兴 (教授 解放军信息工程大学校长)

大会组委会主席:

郑晓东 (教授 解放军信息工程大学信息工程学院院长)

高世海 (副教授 解放军信息工程大学信息工程学院三系主任)

委员:

崔景伍 竺南直 葛临东 杨绪华 温建华 王 地 陈庶民 李存宝
王天鹏 胡建伟 韩 旭 刘 伟 郭志刚 周 俊 赵 闯 徐毅琼

中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会成员

主任委员:

郑宝玉

副主任委员:

项海格 林孝康 田宝玉 吴镇扬 彭启琮 阮秋琦 范平志

委员:

颜永红 胡波 杜歆 何晨 刘贵忠 戴旭初 刘文予
郑林华 许录平 殷福亮 冯穗力 张晓琳 张邦宁 王岩飞
周治中 宋志群 谢显中 范京 王晓明 许宗泽 刘中
王晖 于全 王盛利 黄剑明 侯春萍 安建平 仇洪冰
竺南直 葛临东 顾学迈 孙洪 崔景伍 (秘书长)

前 言

当前,网络和通信的发展趋势是宽带化、移动化、泛在化,人们将通过 RFID(射频识别芯片)和传感器生活在无所不在(Ubiquitous)的网络(即所谓泛在网络或 U 网络)中。移动化催生 U 网络时代;融合与协同,是 U 网络架构的主要特征。频谱利用率是考验新一代移动通信网络的重要指标。为了满足新一代移动通信系统对频谱效率的要求,人们纷纷探索更加高效的无线通信技术。认知无线电技术是有效提高频谱利用率的重要手段,是未来无线移动通信的发展方向之一;已经提出的高效传输技术有多载波调制技术、多天线 MIMO 技术、空时信号处理技术、混合多址技术等。它们都是信号处理和无线通信(包括组网技术)的结合,这些结合极大地推动了无线通信技术的进步。

所有这些在本论文集集中均有所反映。此外,论文集中还包括信道估计、均衡与编码,计算智能与盲信号处理,雷达信号处理与智能天线,信息论、网络编码及安全,DSP 及应用,语音与图像信号处理,光通信与光信息处理等,共 84 篇。这些论文通过专家严格评审,从收到的 125 篇挑选出来的。这些论文充分反映了通信与信号处理领域近年来的研究成果及今后的发展趋势。由于版面和时间等条件的限制,还有不少优秀论文未能选入,深表歉意。

本着通信理论与信号处理专业委员会的一贯宗旨,我们希望本次学术会议也像本专委会的历次学术活动那样,办成一次既是交流成果,联络感情,结识新友的会议,也是探索未来,促进通信与信号处理学科发展的会议。衷心祝愿大家在会议期间收益多多,满载收获地返回各自的工作岗位,创造新的业绩,做出新的贡献。

最后,感谢大家来参加这次盛会,感谢东道主和会议的工作人员为大会的成功召开所付出的巨大努力,感谢电子工业出版社各级领导和编辑为本论文集的出版所付出的辛勤劳动。

郑宝玉

中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会主任委员

目 录

第一部分 MIMO 与 OFDM 技术

一种基于空间复用 MIMO 系统的实用自适应传输方案	郭俊奇 任术波 项海格 (2)
基于减格算法的 MIMO 下行链路预编码系统性能研究	耿 烜 蒋铃鸽 何 晨 (9)
一种多用户 OFDMA 网络中的启发式调度机制	贺志强 孙 峥 牛 凯 田宝玉 (18)
基于最小二乘法的改进 COFDM 采样同步算法	艾凤英 陈月云 (26)
叠加信息: OFDM 系统叠加训练的逆向分析	井 俊 杨炜伟 徐友云 蔡跃明 (32)
一种基于 PN 序列的上行 Generalized- OFDMA 载波频偏估计算法	郭俊奇 任术波 项海格 (40)
基于量子遗传算法的 MIMO-OFDM 系统信号检测技术	王 伟 李 飞 徐国标 (47)
V-BLAST 系统检测算法的研究	唐 兴 丁 芳 (53)
基于块对角化的相关 MIMO 下行链路用户选择算法	宋文东 (58)
基于 Blackfin DSP 的 OFDM 系统设计与实现	方 威 (64)
MIMO-OFDM 技术研究	高 媛 路胜民 (69)

第二部分 编码、译码与解调

一种提高 SC-FDE 散射通信系统 分集增益的 STBC 编码方案	徐 信 宋志群 蔡跃明 刘利强 (78)
一种新的满分集度正交代数空时码	马 敏 刘 陈 (86)
机会式网络编码的系统中断性能	李世唐 郑宝玉 崔景伍 (91)
基于稳定子码的量子 LDPC 译码算法	袁幽然 孙 浩 (97)
一类基于 GF(4)域的量子稳定子码的构造	孙 浩 赵生妹 (102)
传真通信中的抗误码技术研究	刘立柱 王 刚 (106)
REED-MULLER 码的通用译码算法设计与实现	杜 健 杨莉芸 张白愚 (113)
基于复合网格技术的 CPM 信号非相干解调算法	周家喜 李 辉 戴旭初 徐佩霞 (120)

第三部分 信道估计与均衡

一种基于 Davidon-Fletcher-Powell 方法的拟牛顿恒模算法研究	马钰昕 鄢广增 (130)
逆信道检测在多址退化信道中的应用	沈志冈 赵生妹 (136)
一种基于数论变换进行反卷积运算的方法	王岩飞 (141)

一种新的联合盲均衡算法	刘 锋 葛临东 刘世刚 薛富强 (145)
高阶 QAM 信号均衡算法研究	董 政 葛临东 (152)

第四部分 认知无线电与网络新技术

基于 POMDPRS 模型的 CR-Ad Hoc 网络 DC-MAC 方案研究

.....	陈月云 秦石燕 黄 清 (160)
基于分层模拟退火的动态信道分配算法	汪振兴 杨 涛 胡 波 陈光梦 (167)
无线异构网络中多无线电多信道分配问题的研究	黄 川 郑宝玉 许 力 (174)
一种新的协作分集中继选择方案	唐金泉 楚龙佩 (182)
协作分集中 DMT 技术的研究	许晓荣 郑宝玉 崔景伍 (188)
认知无线电: 原理和相关技术的研究	陆路希 项海格 (197)
光码标记交换技术分析	雷 静 郭爱煌 陈晓敏 蒋仁钢 袁懿琳 (204)
协作频谱感知在认知网络中的应用	缪殿飞 郑宝玉 (209)
基于非规则 LDPC 码与空时分组码的协作通信	楚龙佩 唐金泉 (215)
一种改进的无线传感器网络拓扑控制算法	付海威 李 雷 (220)
无线传感器网络中基于 CSI 和 REI 的协同节点选择方案	
.....	张 余 张 良 杨炜伟 蔡跃明 (226)
基于源路由的 IPv6 网络拓扑发现优化技术研究	朱 可 王勇军 刘 波 (232)
TD-SCDMA 系统上行演进增强技术 HSUPA 的研究与仿真	
.....	钱兴燕 陈 光 刘 宇 (239)
802.11 和 802.16e 网络移动性管理的比较	李 明 杨 雷 韩清涛 黎山峰 (246)

第五部分 信息与网络安全

A Cycling-like Attack on RSA	Yong-Hui Zheng Yue-Fei Zhu Hong Xu Peng-Fei Yang (254)
无线传感器网络密钥管理方案与协议研究	蹇 波 郭永辉 罗长远 李 伟 (260)
DVB-S 信道中 SIP 信令数据的捕获	张慧成 王 毅 李淳宇 魏 鸿 (267)

第六部分 自适应信号处理

基于负熵极大 FastICA 自适应抑制 ECG 中呼吸基漂干扰研究	王淑艳 (276)
移动通信多径反射信号的盲分解	范 京 张 焱 (281)
基于共轭梯度的线性受限差分恒模算法	蔡维嘉 鄯广增 马钰昕 (287)
多波束测深数据的自适应趋势面滤波分析	刘尧芬 邵 杰 (292)
粒子滤波常用重采样算法分析比较	范澎湃 隋立芬 牟忠凯 (299)

第七部分 阵列信号处理

Analysis of Lattice Constellation in Multi-Antenna Processing

- Lu Xiaoyu Wang Xing Hu Qing (308)
- 基于信号重构理论的新型阵列信号处理模型 赵拥军 金美娜 盖江伟 (316)
- 一种正交双通道不平衡的数字校正算法 张昆帆 赵拥军 王天鹏 陈庶民 (322)

第八部分 雷达信号处理

- 基于频域 DPCA 的机载双基地雷达地面动目标检测方法 李国刚 王盛利 (328)
- 基于 RSE 算法的雷达辐射源识别系统规则提取方法研究 黄 洁 李弼程 (334)
- SPECAN 算法在大斜视 ScanSAR 中的应用 邹海丽 朱岱寅 (340)
- 基于实测轨道数据的弹道导弹回波半实物仿真方法研究 湛 蓝 鲍庆龙 陈曾平 (350)
- 脉冲源在超宽带实验系统中的设计 石 越 潘 锦 (356)
- 相位编码脉压雷达高精度载频估计 李冬海 王孙轶 赵 闯 (362)
- 雷达情报侦察专用雷达系统仿真模型系统设计 王志钢 王建涛 杨承志 (367)
- 基于 DTM 的打击效果评估方法分析 王兴宝 李素敏 鲁传运 (374)

第九部分 语音信号处理

- 一种新的融合静音检测的粒子滤波声源跟踪算法 蔡卫平 吴镇扬 (380)
- 一种自适应速率的线谱频率参数暂时分解量化算法 汤一彬 吴海洋 吴镇扬 (387)
- 一种基于统计方法的语言辨识系统的实现 屈 丹 闫红刚 陈 琦 (394)
- 语音增强算法机理研究 袁 钢 刘志坤 唐小明 (402)
- 回波抵消中的 Doubletalk 检测算法研究 林本浩 王建波 刘 睿 (408)
- MELPe 语音编码算法研究 张连海 陈 琦 郭东杰 (413)
- 基于小波包变换的自适应阈值语音消噪 纪友芳 刘桂斌 (419)

第十部分 图像与多媒体信息处理

- 二维最小交叉熵阈值分割的快速迭代算法 付晓莉 吴一全 (426)
- 一种高效的由运动模式决定的自适应大小的 GOP 结构
..... 赵 凡 张 娜 任 斐 刘贵忠 (432)
- 基于支持向量机的频域自适应水印技术 杨 锋 李 雷 (439)
- 图像数字水印盲检测的研究现状与展望 胡玲娜 蒋铃鸽 何 晨 (445)
- 多特征身份识别 时 超 王保云 (450)
- 基于混沌序列和分组密码的数字水印技术 李 霞 李 雷 (454)

超分辨率重建及其进展	薛正亮 吴一全 (462)
全球无线电噪声温度分布图数字化研究	梁玉军 郭加宁 谢 慧 张 静 (467)
Speckle Reduction in Dual-polarization Images of ENVISAT/ASAR	Chaoyang Niu Debao Ma Wugao Li (471)
基于 SVM 和证据理论的图标识别	陈 刚 郭志刚 李弼程 (477)
几种算法在数字图像去噪中的应用	张俊华 徐 青 杨 根 (485)

第十一部分 DSP 应用

印刷数字水印检测系统的设计	晏 飞 彭启琮 (492)
基于 DM642 的智能视频监控系统	文锦松 徐 胜 管 庆 (499)
基于 FPGA 锁相环的动态频率配置技术研究及应用	欧阳喜 葛临东 李润东 (505)

第十二部分 基础理论与方法

时域有限差分算法引入入射能量方案的分析	郭爱煌 余硕军 屠燕春 杨 曦 (514)
平行金属圆盘电磁辐射问题的解析方法	刘临生 郭爱煌 桂任舟 杨 曦 (519)
多分量信号时频分布的交叉项抑制方法研究	王英志 章新华 (526)
几种频率估计算法的比较和仿真分析	王圆圆 刘 刚 何 兵 (532)
基于 STK 的微纳通信卫星星座设计	孟凡坤 党同心 张俊华 (538)
基于相位差的频偏估计算法	周 明 刘 恒 陈庆春 (544)

第一部分

MIMO 与 OFDM 技术

一种基于空间复用 MIMO 系统的实用自适应传输方案

郭俊奇 任术波 项海格

(北京大学 信息科技学院电子学系, 北京 100871)

摘要: 本文给出了一种基于空间复用多输入多输出 (MIMO) 系统的实用自适应调制和编码方案。仿真结果表明: 相对于 ASE 性能最优但复杂度很高的基于奇异值分解 (SVD) 的自适应方法, 本方案实现了 ASE 性能和复杂度的折中, 因此具有更大的实用意义。

关键词: 空间复用 MIMO 系统; 自适应编码和调制; 平均频谱利用率

A Practical Adaptive Transmission Scheme for Spatial Multiplexing MIMO Systems

Guo Junqi Ren Shubo Xiang Haige

(Department of Electronics Engineering, Peking University, Beijing, 100871, China)

Abstract: We propose in this paper a practical adaptive modulation and encoding scheme for spatial multiplexing multiple-input multiple-output (MIMO) systems. We demonstrate from the simulation that the proposed scheme is of practical significance since it provides a well-behaved tradeoff between the ASE and computational complexity, compared to the singular value decomposition (SVD) based adaptive transmission scheme with optimal ASE performance and high complexity.

Key Words: spatial multiplexing MIMO; adaptive encoding and modulation; average spectral efficiency.

1 引言

随着现有移动通信系统中语音、视频和数据业务的日益增加, 未来一代移动通信系统需要采用更先进的技术来提高系统容量。基于空间复用的多输入多输出 (MIMO) 系统^[1]在不增加带宽的前提下可以成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率, 被认为是新一代移动通信系统的核心技术; 另一方面, 自适应传输^{[2][3]}则是根据信道的状态选择调制方式和信道编码速率等, 使数据传输获得与信道的最佳匹配来最大化系统频谱利用率。因此基于空间复用的 MIMO 系统与自适应传输相结合所构成的自适应空间复用 MIMO 系统^[4]可以极大的提高信息传输速率, 成为下一代无线通信系统研究的热点。

现有文献^[4]大多根据奇异值分解 (SVD) 来设计 MIMO 系统自适应方案。在这类算法中, MIMO 系统需要获得精确的信道状态信息 (CSI) 矩阵并对其进行复杂度较高的 SVD 分解得到各等价子信道的奇异值, 发射端再据此自适应的分配各发射天线功率和选择各天线编码及

调制方式,并对每一时隙的调制符号矢量进行线性预变换再分解为各路数据送入各发射天线。虽然该算法具有最优的系统平均频谱利用率(ASE)性能,但由于SVD分解的计算复杂度过高,且线性预变换会增加发射端的硬件实现复杂度,另外CSI误差会极大影响到系统误比特率(BER)性能,因此不适用于实际应用。

本文则针对空间复用MIMO系统设计了基于不同信道条件的各发射天线自适应调制和编码方案。首先,系统接收端在已知信道状态信息(CSI)的前提下对接收信号进行线性变换将平衰落信道上的MIMO系统分解为等价的加性高斯白噪声(AWGN)信道上多个并行独立的SISO系统,并得到针对各路发射天线信号的后处理信噪比(post-processing SNR);另一方面,由AWGN信道上SISO系统的BER近似表达式可以计算出在给定的BER约束下不同调制方式的接收信噪比门限。因此接收端可以根据后处理信噪比和调制信噪比门限确定各路发射天线的最佳调制和编码方式,并通过反馈控制信号告知发射端实现各天线的自适应编码调制。相对于SVD自适应方法,本方案中系统发射端无需知道CSI、无需对信道传输矩阵进行SVD分解并且对发射符号矢量省去了线性预处理,而只是通过反馈控制信号就能自适应地选择调制和编码方式。这样一来很好的降低了系统尤其是发射端的硬件实现复杂度,实现了ASE性能和复杂度的折中,适于实际应用;另外,该方案还可以扩展应用于多用户上行链路系统的自适应。

本文接下来分为四部分展开:第2节给出了基于空间复用的MIMO系统模型;第3节阐述了本文自适应传输的原理,并给出了应用于实际的具体自适应调制和编码方案;第4节给出系统的ASE仿真结果;第5节给出结论。

符号表示: $(\cdot)^*$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$ 和 $(\cdot)^{-1}$ 分别表示矩阵的共轭,转置,共轭转置和逆; $E(\cdot)$ 表示数学期望; $\text{diag}(\cdot)$ 表示由括号中矩阵的对角线上元素构成的行矢量。

2 系统模型

考虑如图1所示的基于平坦衰落信道上的空间复用MIMO系统。 N_T 、 N_R 分别为发射天线和接收天线数目($N_R \geq N_T$);系统接收端对接收信号矢量进行线性处理并确定自适应编码和调制方案,进而通过反馈信道将自适应控制信号告知发射端;系统发射端则由自适应编码和调制、空间复用模块构成,根据接收到的自适应控制信号对各路发射天线上比特流分别进行不同模式的自适应编码和调制。这里假设 $\mathbf{s}$ 表示一个时隙内的 $N_T \times 1$ 维发射信号矢量,其中每个元素的平均功率均为1; $\mathbf{r}$ 表示 $N_R \times 1$ 维的接收信号矢量; $\mathbf{n}$ 表示 $N_R \times 1$ 维均值为0、方差为 σ_n^2 的复加性高斯白噪声矢量,即有 $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$; $\mathbf{H}$ 表示 $N_R \times N_T$ 维的信道传输矩阵,其中第 i 行第 j 列元素 h_{ij} 表示从第 j 个发射天线到第 i 个接收天线的路径复增益,它是均值为0、方差为1的复高斯随机变量。则接收信号矢量 $\mathbf{r}$ 可以写成:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

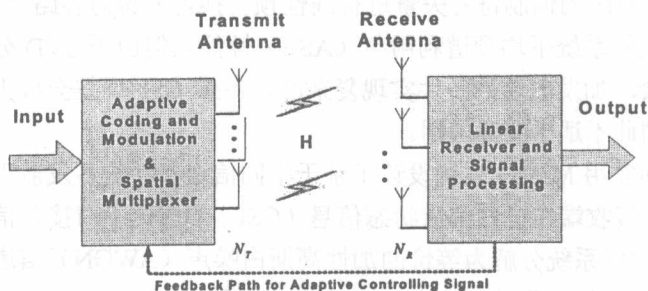


图 1 基于自适应编码调制的空间复用 MIMO 系统

3 自适应传输

3.1 自适应原理

由于本文研究自适应传输的基本思想是在给定的系统 BER 约束指标下针对不同的信道条件选择各发射天线上合适的调制和编码方式以便最大化系统 ASE 性能，即在某一根发射天线对应的信道条件良好时采用较高的调制阶数和编码率，反之则采用较低的调制阶数和编码率，以保证系统 BER 在不低于给定的约束指标下，尽可能的传输更多信息数据。因此在本节论述中，我们需要建立信道条件，调制方式和系统 BER 约束指标三者的关系（编码率自适应在后文中讨论）。

对于空间复用 MIMO 系统，首先需要分离出对应于各路发射天线的子信道并确定衡量各信道条件好坏的标准。系统接收端在已知信道传输矩阵 $\mathbf{H}$ 的前提下首先对式 (1) 中的接收信号矢量 $\mathbf{r}$ 进行线性变换，即左乘一个基于迫零准则 (ZF) 推导得来的接收矩阵 $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ ：

$$\mathbf{G}\mathbf{r} = \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{G}\mathbf{n} \Leftrightarrow (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r} = \mathbf{s} + (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{n} \quad (2)$$

令 $\mathbf{r}' = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r}$ ， $\mathbf{n}' = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{n}$ ，则式 (2) 可以简化成：

$$\mathbf{r}' = \mathbf{s} + \mathbf{n}' \quad (3)$$

经过式 (2) 的操作，式 (1) 所示的 $N_R \times N_T$ 维空间复用 MIMO 系统转化为等价的 AWGN 信道上 N_T 个并行独立传输的单输入单输出 (SISO) 系统，如式 (3) 所示：空间复用 MIMO 系统的发送信号矢量 $\mathbf{s}$ 中各元素对应于各 SISO 系统所传输信号，而各路加性高斯白噪声大小代表了各 SISO 系统信道条件的好坏，分别对应于原 MIMO 系统各发射天线上发送信号所经历的信道条件。这样我们可求出式 (3) 中矢量 $\mathbf{s}$ 中各信号元素的信噪比并定义其为后处理信噪比 (post-processing SNR)，用于衡量 MIMO 系统各发射天线对应信道条件的好坏。由于系统模型中假定各天线发射信号平均功率为 1，因此对应于各发射天线的 post-processing SNR 可以表示为如下矢量形式：

$$\overline{\text{SNR}}_{\text{post}} = \frac{1}{\text{diag}\left\{\mathbf{E}\left[\mathbf{n}'(\mathbf{n}')^H\right]\right\}} = \frac{1}{\text{diag}\left\{\left((\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}\right)^H \cdot \sigma_n^2\right\}} \quad (4)$$

将空间复用 MIMO 系统转化为等价的 AWGN 信道上多个并行独立传输的 SISO 系统并判定出各自信道条件好坏之后，为了建立信道条件，调制方式和系统 BER 约束指标三者的关系，

我们需要利用 AWGN 信道下 SISO 系统各种调制方式的 BER 表达式。但是对于绝大多数高进制调制方式（如 MPSK 或 M-QAM）来说，要得到精确的 BER 解是不可能的。文献[5]给出了无信道编码的 SISO 系统在 AWGN 信道下经过格雷映射方形 M-QAM 调制的 BER 近似表达式如（5）所示：

$$P_e(\gamma, SE) \approx \frac{2}{SE} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2^{SE}}} \right) \cdot \text{erfc} \left(\sqrt{1.5 \frac{\gamma}{2^{SE} - 1}} \right) \tag{5}$$

其中 γ 是 SISO 系统的接收信噪比，即可看作是空间复用 MIMO 系统中后处理信噪比 $\overline{\text{SNR}}_{\text{post}}$ 矢量中的一个元素； SE 定义为调制方式的谱效率，即为一个调制符号传输的比特数，因此 M-QAM 调制的星座大小为 $M = 2^{SE}$ ； $\text{erfc}(x)$ 表示互补误差函数。该近似表达式能够很好地逼近 M-QAM 调制方式的实际 BER 性能，但却无法通过它反推出 γ 随 SE 和 P_e 变化的显式解，因此在给定系统 BER 约束指标时需要利用数值计算得到各种调制方式（即不同 SE ）的接收信噪比 γ 门限（此处指下限），记作 $\gamma_{\text{thred}}^{\text{MQAM}}$ 。接收端将其与各路发射天线上发送信号的后处理信噪比 $\overline{\text{SNR}}_{\text{post}}$ 进行比对就可以判定出各路发射天线的最佳调制方式。

我们将上述自适应原理概括如下：

- 1) 接收端对空间复用 MIMO 系统接收信号矢量进行线性处理，如式（2）（3）所示；
- 2) 利用式（4）计算各发射天线上发送信号的后处理信噪比 $\overline{\text{SNR}}_{\text{post}}$ ；
- 3) 将 BER 约束指标代入式（5）经过数值计算得到不同调制方式的接收信噪比门限 $\gamma_{\text{thred}}^{\text{MQAM}}$ ；
- 4) 将 $\overline{\text{SNR}}_{\text{post}}$ 和 $\gamma_{\text{thred}}^{\text{MQAM}}$ 进行比对，判定出各路发射天线的最佳调制方式；
- 5) 通过反馈控制信号告知发射端实现自适应调制。

3.2 自适应传输方案

3.2.1 自适应调制方案

本文设定调制谱效率 SE 取值为 2，4，6，分别对应备选的自适应调制方式为采用格雷映射的 QPSK，16QAM 和 64QAM（由于 4QAM 和 QPSK 在同样的符号 SNR 时具有类似的性能 [10]，因此下面均讨论 QPSK 以代替 4QAM）。根据式（5），我们可以计算出上述三种调制方式在给定系统 BER 约束指标分别为 10^{-2} ， 10^{-3} 和 10^{-4} 时的接收信噪比门限值，见表 1。

表 1 不同 BER 约束指标下的三种调制方式接收信噪比门限

BER 约束指标	$\gamma_{\text{thred}}^{\text{QPSK}}$ (dB)	$\gamma_{\text{thred}}^{\text{16QAM}}$ (dB)	$\gamma_{\text{thred}}^{\text{64QAM}}$ (dB)
$\leq 10^{-2}$	7.34	13.91	19.74
$\leq 10^{-3}$	9.80	16.55	22.55
$\leq 10^{-4}$	11.41	18.23	24.31

以系统 BER 约束指标取 10^{-4} 为例。从表 1 中我们设计出具体的自适应调制方案如下：

- 1) 如果 $\text{SNR}_{\text{post}} < 11.41\text{dB}$ ，表示该发射天线信道条件很差，不发送任何数据（ $SE=0$ ）；
- 2) 如果 $11.41\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 18.23\text{dB}$ ，表示该发射天线信道条件一般，用 QPSK 调制（ $SE=2$ ）；

- 3) 如果 $18.23\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 24.31\text{dB}$, 表示该发射天线信道条件较好, 用 16QAM 调制 ($SE=4$);
- 4) 如果 $24.31\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}}$, 表示该发射天线信道条件很好, 用 64QAM 调制 ($SE=6$).

接收端将包含上述自适应调制信息的反馈控制信号传输给发射端, 使各发射天线实现自适应调制。

3.2.2 调制方式和编码速率联合自适应方案

式 (5) 描述了信道条件, 调制方式和系统 BER 约束指标三者的关系。在此基础上, 如果引入信道卷积编码, 很难找到系统 BER 关于信道编码率、调制方式和信道条件的显式函数关系。因此我们通过对 AWGN 信道上应用不同组合的信道卷积编码 (码率 $R_c=1/6, 1/2$ 和 $2/3$) 和调制方式 (QPSK, 16QAM 和 64QAM) 的 SISO 系统进行蒙特卡罗仿真, 得到其 BER 性能曲线如图 2 所示。

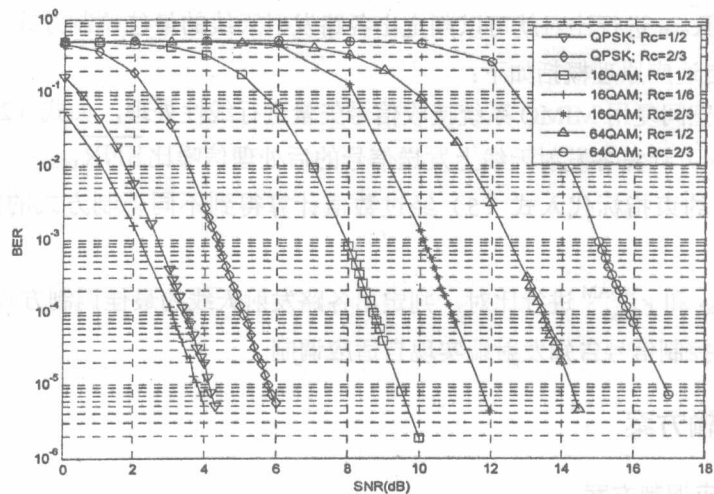


图 2 AWGN 信道上应用各种编码调制组合方式的 SISO 系统 BER 性能曲线

根据 3.1 节所述的自适应原理, 空间复用 MIMO 系统在分解为等价的 AWGN 信道下多个并行独立 SISO 系统后, 便可以根据图 2 估计出任何 BER 约束指标下各种编码调制组合方式的接收信噪比门限。同样以系统 BER 约束指标取 10^{-4} 为例, 估计结果见表 2 所示。

表 2 给定 BER 约束指标为 10^{-4} 时各种编码调制组合方式的接收信噪比门限

组合方式	16QAM $R_c=1/6$	QPSK $R_c=1/2$	QPSK $R_c=2/3$	16QAM $R_c=1/2$	16QAM $R_c=2/3$	64QAM $R_c=1/2$	64QAM $R_c=2/3$
信噪比门限 (dB)	3.07	3.45	5.08	8.7	10.86	13.42	15.86
信息比特的频谱利用率 (bit/s/Hz)	2/3	1	4/3	2	8/3	3	4

从表 2 中我们可以设计出信道编码率和调制方式的联合自适应方案如下:

- 1) 如果 $\text{SNR}_{\text{post}} < 3.07\text{dB}$, 不传输任何信息数据 ($SE=0$);
- 2) 如果 $3.07\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 3.45\text{dB}$, 选取 $R_c=1/6$ 和 16QAM ($SE=2/3$);

- 3) 如果 $3.45\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 5.08\text{dB}$, 选取 $R_c=1/2$ 和 QPSK ($SE=1$);
- 4) 如果 $5.08\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 8.7\text{dB}$, 选取 $R_c=2/3$ 和 QPSK ($SE=4/3$);
- 5) 如果 $8.7\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 10.86\text{dB}$, 选取 $R_c=1/2$ 和 16QAM ($SE=2$);
- 6) 如果 $10.86\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 13.42\text{dB}$, 选取 $R_c=2/3$ 和 16QAM ($SE=8/3$);
- 7) 如果 $13.42\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}} < 15.86\text{dB}$, 选取 $R_c=1/2$ 和 64QAM ($SE=3$);
- 8) 如果 $15.86\text{dB} \leq \text{SNR}_{\text{post}}$, 选取 $R_c=2/3$ 和 64QAM ($SE=4$).

接收端将包含上述自适应编码调制信息的反馈控制信号传递给发射端, 使各发射天线实现信道编码速率和调制方式的联合自适应。

4 仿真结果

在本文仿真中, 我们构建一个 4×4 的 MIMO 空间复用系统, 其中发射和接收天线均为 4 根; 平坦瑞利衰落信道建模为一个 4×4 的信道传输矩阵 $\mathbf{H}$ (具体描述见第 2 节), 其中元素服从均值为 0、方差为 1 的复高斯随机分布。本文仿真测试了 10^6 次信道实现条件下应用第 3.2.1 节自适应调制方案的系统 ASE 性能。

图 3 给出了在 BER 约束指标分别为 10^{-2} , 10^{-3} 和 10^{-4} 时本文所设计的自适应调制方案的系统 ASE 性能。从图中可以看出, 随着 BER 约束指标越来越严格, 系统 ASE 性能也越来越低。这说明 BER 受限的自适应传输系统是以牺牲一定的频谱利用率来换取系统误码性能的改善; 而在满足 BER 约束指标的前提下, 尽可能地提高了系统频谱利用率。

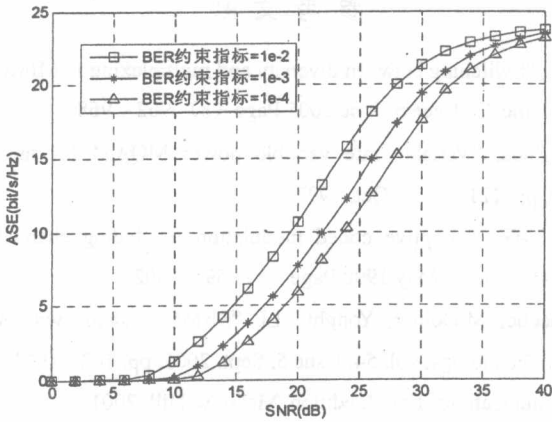


图 3 本文自适应方案在不同 BER 约束指标时的 ASE 性能比较 (4×4 MIMO)

图 4 比较了在给定 BER 约束指标同为 10^{-4} 时本文方案和基于 SVD 的最优自适应方案的 ASE 性能。SVD 自适应方案需要对信道矩阵 $\mathbf{H}$ 进行 SVD 分解, 将空间复用 MIMO 系统转化为等效的若干个去耦平行子信道, 并为每个子信道分配 $\mathbf{H}$ 的奇异值作为信道幅度增益。由于这些子信道是完全去耦合的, 因此相应的自适应方案也是最优的, 可作为我们研究自适应传输方案的频谱利用率性能上界。从图中可以看出, 本文自适应方案的 ASE 性能较为接近 SVD 自适应方案, 说明本方案的频谱利用率性能良好。相对于 SVD 自适应方法, 本方案中系统发射端无需对 $\mathbf{H}$ 进行 SVD 分解并且对发射符号矢量省去了线性预处理, 而只是通过反馈控制信