

MIMO 无线通信系统总体资源效率测度方法研究

刘金铸^{1,2}, 沈连丰¹

(1. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 南京信息工程大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 提出一种通信系统总体资源效率测度的一般模型, 以此为基础给出多输入多输出 (MIMO) 无线通信系统总体资源效率测度的具体方法。理论分析及实际测度结果表明, 虽然 MIMO 系统由于充分利用空间资源, 其归一化带宽与归一化信噪比需求相对较小, 但是, 就目前实现的 MIMO 系统而言, 若与基本的加性白高斯噪声 (AWGN) 信道下实际通信系统相比, 其总体资源效率更低, 与系统潜在能力的差距更大。

关键词: MIMO 无线通信系统; 归一化带宽; 归一化信噪比; 资源需求平面; 总体资源效率

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)12-0036-09

Method of overall resource efficiency measure of MIMO wireless communications

LIU Jin-zhu^{1,2}, SHEN Lian-feng¹

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: A general mode of overall resource efficiency measure of communication systems is proposed. Based on it, the specific method of overall resource efficiency measure of multiple input multiple output (MIMO) wireless communication systems is presented. The theory analysis and practice measure results show that although the requirements of the normalized bandwidth and the normalized signal noise ratio (SNR) of MIMO systems are relatively small due to the utilization of the space resource, but the overall resource efficiencies of the existing MIMO systems are low, and the gaps between their performances and their potential capacities are large, when compared to that of the existing communication systems under the basic additive white Gaussian noise (AWGN) channel.

Key words: MIMO wireless communication system; normalized bandwidth; normalized signal noise ratio; resource requirement plane; overall resource efficiency

1 引言

可靠、高效的信息传输是对通信系统的根本要求。其中, 高效传输应理解为: 通信系统的资源使用效率从总体上得到了尽可能的提高。信息传输涉及 4 种资源, 即能量、电磁波频谱、时间和空间。关于通信系统的资源使用效率, 通常的衡量方法有时间资源效率用信息传输速率衡量; 频谱资源效率用带宽效率 (信息传输速率与信道带宽之比) 衡量;

能量资源效率用达到特定的误比特率 (BER, bit error rate) 所需的信噪比 (SNR, signal noise ratio) 衡量^[1]。空间资源效率尚无统一的衡量指标, 然而空间资源的作用是显而易见的。例如, 多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 无线通信系统具有很高的带宽效率, 这是因为系统使用多副发送天线和多副接收天线并行传输的缘故。发送天线之间以及接收天线之间须相隔足够大的距离, 以保证各空间信道的统计特性相互独立^[2, 3], 这意味

收稿日期: 2013-09-04; 修回日期: 2014-07-06

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2012ZX03004005-003); 国家自然科学基金资助项目 (61171081, 61201175); 江苏省科技型企业技术创新基金资助项目 (BC2012006)

Foundation Items: The Important National Science & Technology Specific Projects (2012ZX03004005-003); The National Natural Science Foundation of China (61171081, 61201175); The Innovation Technology Found of Jiangsu Province (BC2012006)

着系统使用了足够多的空间资源。

上述资源效率测度方法的特点是, 针对通信涉及的各种资源分别建立效率衡量指标, 各指标相互独立。这种资源效率测度方法简单而直观, 然而缺点也是明显的, 它不能解决以下问题。

1) 对 2 个资源需求各不相同的通信系统无法进行比较。例如, 具有相同信息传输速率的 2 个通信系统, 系统 A 占用较大的带宽, 为达到特定的 *BER* 要求需要较小的 *SNR*, 而系统 B 则相反, 占用较小的带宽, 为达到同样的 *BER* 要求, 需要较大的信噪比。这时, 不易确定哪个系统总体上资源效率更高。

2) 上述通信系统的比较问题, 在通信系统设计中往往表现为如下问题: 通信系统设计时往往涉及到某些指标间的折中, 这种折中的得益无法评价。例如, 欲提高通信系统的带宽效率, 总是以增加信噪比需求为代价。设计者自然希望以最小的信噪比增加为代价, 得到带宽效率的最大提高, 即达到最理想的折中, 但困难在于无法评价折中方案是否“划算”。

3) 将通信系统具体化为 MIMO 无线通信系统, 就其资源效率而言, 已有的结论为 MIMO 系统在不增加信道带宽的前提下成倍提高传输速率, 同时以“合理”的信噪比达到要求的传输错误率^[3, 4]。这里存在的问题是, 如何定量地描述所谓合理的信噪比。

文献[5~7]论述了 MIMO 系统检测性能的影响因素以及能量效率与带宽效率折中的问题, 实际上涉及到了该类系统总体资源效率评价问题, 但未能给出严格的和定量的表示。文献[8, 9]探讨通信新系统的性能和资源分配问题, 不可避免地涉及到上述问题, 应研究总体资源效率评价方法, 但采用的仍然是各种资源效率指标相互独立的评价方法。总体资源效率评价问题实质上涉及到实际通信系统与理想通信系统(实现了信道容量的系统)的差距问题。多目标优化方法虽广泛用于通信系统或通信网络的规划设计以使其达到 Pareto 最优^[10, 11], 但要将该方法用于实际通信系统与理想系统差距的评价, 还须对其可行性作进一步研究。文献[12]对数字调制的比较方法^[1]进行改进, 进而提出总体资源效率测度概念, 很好地解决了资源效率各自独立评价的问题, 但只针对数字调制以及基本加性白高斯噪声(AWGN, additive white Gaussian noise)信道

的特殊情况。本文以此为基础进行扩展研究, 提出基本 AWGN 信道下以及 MIMO 信道下通信系统的总体资源效率测度方法, 并着重讨论 MIMO 无线通信系统的情况, 给出其总体资源效率具体测度方法及若干结论。该方法首先定义通信系统的归一化带宽及归一化信噪比, 分别为信道带宽与信息传输速率的比值以及接收信噪比与信息传输速率的比值。以归一化信噪比为横轴, 归一化带宽为纵轴, 构建通信系统的资源需求平面, 并将通信系统的资源需求点与原点之间的距离定义为通信系统的均方根资源需求。在该平面上, 还可以表示出实际通信系统所对应的理想通信系统(达到信道容量极限)的均方根资源需求。最后, 将对应理想系统的均方根资源需求与实际通信系统的均方根资源需求的比值定义为该通信系统的总体资源效率。可以证明, 这一比值也等于通信系统实际信息传输速率与其信道容量之比。这一总体资源效率度量方法适用于基本 AWGN 信道及 MIMO 等类型信道下的通信系统。该测度方法定量地反映了通信系统的总体资源效率, 为通信系统的评价与比较提供了更有效的衡量标准, 对于实际应用中通信系统方案的选择以及新型通信系统方案的研究与构建均具有实际意义。

2 通信系统总体资源效率测度方法

2.1 基本 AWGN 信道与 MIMO 信道

通信系统必定使用特定的信道。为讨论通信系统的总体资源效率, 首先明确本文所涉及的 2 种典型信道模型。

1) 基本 AWGN 信道

著名的香农信道容量公式所描述的信道称为基本 AWGN 信道。该信道属于单输入单输出(SISO, single input single output)信道, 或称独立信道, 其信道系数(增益或衰减)是确定性的、非时变的, 信道存在 AWGN 干扰。基本 AWGN 信道是其他波形信道, 如 MIMO 信道的重要参照。

2) MIMO 信道

MIMO 信道具有以下特征。

①信道有多个输入, 多个输出, 因而包含多个并行(但相互串扰)的空间信道, 属于网络信道;

②信道系数矩阵各元素一般是随机取值的、时变的, 即存在衰落现象;

③信道各输出均存在 AWGN 干扰。

当信道输入和输出的数量均为 1, 且信道系数

取确定值（非随机取值）时，MIMO 信道便成为基本 AWGN 信道。

为简化分析，以下讨论只针对非频率选择性 MIMO 信道，而且其信道系数矩阵各元素是独立同分布的，各信道输出中的 AWGN 也是独立同分布的，同时，信道系数矩阵只在接收端是已知的，对于发送端，信道系数矩阵是未知的。

为叙述简便，本文后续的描述中若无特殊声明，基本 AWGN 信道下或 MIMO 信道下的通信系统均简称为通信系统。

2.2 归一化带宽和归一化信噪比

假设一个通信系统，其信息传输速率为 R_b ，使用特定的信道，信道占用一定的空间资源，信道带宽为 W 。定义

$$\mu = \frac{W}{R_b} \quad (1)$$

为该通信系统的归一化带宽需求。信息传输速率 R_b 为单位时间内所传输的信息量（对于二进制情况即为比特速率），若以 I 表示传输的信息量， T 表示该通信系统传输信息量 I 所需的时间，则 $R_b = I/T$ ，因此归一化带宽又可表示为

$$\mu = \frac{WT}{I} \quad (2)$$

可见通信系统的归一化带宽 μ 表示传输每比特信息所需的时间带宽积，反映了该通信系统时间资源和频谱资源需求的相对大小。

再假设该通信系统信道输出（接收机输入）的信号平均功率为 S ，AWGN 的双边功率谱密度为 $N_0/2$ 。定义

$$E_b = \frac{S}{R_b} = \frac{S}{I/T} = \frac{ST}{I} \quad (3)$$

为该通信系统的归一化功率需求，其实就是每比特能量需求。相应地，定义

$$\gamma = \frac{S/N_0}{R_b} = \frac{E_b}{N_0} \quad (4)$$

为该通信系统的归一化信噪比需求。可见，归一化信噪比 γ 反映了通信系统能量资源需求的相对大小。

一个特定的通信系统，其 BER 性能曲线总是确知的，表示为

$$P_b = f(\gamma) \quad (5)$$

其中， P_b 表示误比特率。这样，为达到一定的 P_b 指标，例如 $P_b = 10^{-5}$ ，该通信系统的归一化信噪比需求为

$$\gamma = f^{-1}(P_b) \quad (6)$$

2.3 实际通信系统所对应的理想系统

假设一通信系统 A，使用特定的信道，信道带宽为 W_A ，接收机输入信噪比为 S_A/N_0 ，以特定的误比特率 P_b 达到信息传输速率 R_{bA} ，所需归一化带宽为 $\mu_A = W_A/R_{bA}$ 、归一化信噪比为 $\gamma_A = (S_A/N_0)/R_{bA} = E_{bA}/N_0$ 。

假设有另一通信系统 A_0 ，使用同样的信道，信道带宽为 W_A ，信道输出信噪比为 S_A/N_0 ，以任意小的误比特率达到信息传输速率 C_A ， C_A 为信道容量，则称系统 A_0 为系统 A 所对应的理想系统。简言之，理想系统即实现了信道容量的通信系统。

按照上述归一化带宽和归一化信噪比的定义，系统 A_0 的归一化带宽为

$$\mu_{A_0} = \frac{W_A}{C_A} \quad (7)$$

归一化信噪比为

$$\gamma_{A_0} = \frac{S_A/N_0}{C_A} = \frac{E_{bA_0}}{N_0} \quad (8)$$

信道容量 C_A 必是 W_A 与 S_A/N_0 的函数，表示为

$$C_A = g(W_A, S_A/N_0) \quad (9)$$

例如，对于基本 AWGN 信道，有

$$C_A = W_A \text{lb} \left(1 + \frac{S_A}{W_A N_0} \right) \quad (10)$$

根据式 (7) 和式 (8)，对式 (9) 进行变量代换，则式 (9) 总可以变换为 μ_{A_0} 与 γ_{A_0} 之间的约束关系，记为

$$g_1(\mu_{A_0}, \gamma_{A_0}) = 0 \quad (11)$$

例如，式 (10) 可以写成

$$1 = \frac{W_A}{C_A} \text{lb} \left[1 + \frac{(S_A/N_0)/C_A}{W_A/C_A} \right]$$

代入式 (7) 和式 (8) 得到

$$\mu_{A_0} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{A_0}}{\mu_{A_0}} \right) - 1 = 0 \quad (12)$$

式 (11) 的意义在于，对于一种特定的信道，

理想通信系统所需的归一化带宽与归一化信噪比之间总是存在特定的约束关系, 即满足特定方程 $g_1(\mu, \gamma) = 0$ 。

2.4 通信系统的资源需求平面

以归一化信噪比 γ 为横轴, 归一化带宽 μ 为纵轴, 可构建通信系统的资源需求平面, 如图 1 所示。在资源需求平面上, 任何通信系统都对应着一个特定的点, 称为通信系统的资源需求点。

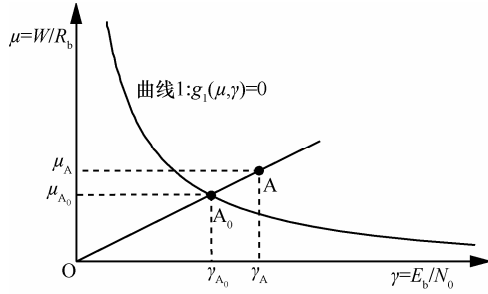


图 1 通信系统资源需求平面

图 1 中曲线 1 为式 (11) 的对应曲线, 即特定信道下理想系统的归一化带宽与归一化信噪比所满足的方程 $g_1(\mu, \gamma) = 0$ 。曲线 1 也可理解为特定信道下通信系统最小资源需求的理论极限, 实际通信系统的资源需求点总是落在曲线 1 的右上方区域。

图 1 中, 点 A (μ_A, γ_A) 为上述系统 A 的资源需求点。以下将说明, 系统 A 所对应的理想系统, 即系统 A₀, 其资源需求点 A₀ $(\mu_{A_0}, \gamma_{A_0})$ 必定是曲线 1 与直线 OA 的交点。

显然, 直线 OA 的方程为

$$\mu = \frac{\mu_A}{\gamma_A} \gamma = \frac{W_A/R_{bA}}{(S_A/N_0)/R_{bA}} \gamma = \frac{W_A}{S_A/N_0} \gamma \quad (13)$$

由式 (7) 和式 (8) 可知,

$$\mu_{A_0} = \frac{W_A}{S_A/N_0} \gamma_{A_0} \quad (14)$$

可见点 A₀ $(\mu_{A_0}, \gamma_{A_0})$ 满足式 (13), 即点 A₀ 必定在直线 OA 上。

又因 $(\mu_{A_0}, \gamma_{A_0})$ 满足式 (11), 所以点 A₀ 必定在曲线 1 即 $g_1(\mu, \gamma) = 0$ 上。

由以上分析可知, 系统 A₀ 的资源需求点 A₀ $(\mu_{A_0}, \gamma_{A_0})$ 必定是曲线 1 与直线 OA 的交点。

2.5 通信系统的总体资源效率

图 1 中线段 OA 的长度为

$$OA = \sqrt{\mu_A^2 + \gamma_A^2} \quad (15)$$

其物理意义是系统 A 的均方根资源需求。

同理, 线段 OA₀ 的长度为

$$OA_0 = \sqrt{\mu_{A_0}^2 + \gamma_{A_0}^2} \quad (16)$$

表示系统 A₀ 的均方根资源需求。

令 $\beta_A = OA_0/OA$, 由式 (1)、式 (4)、式 (7) 和式 (8) 可得

$$\begin{aligned} \beta_A &= \frac{OA_0}{OA} = \frac{\sqrt{\mu_{A_0}^2 + \gamma_{A_0}^2}}{\sqrt{\mu_A^2 + \gamma_A^2}} \\ &= \frac{\mu_{A_0}}{\mu_A} = \frac{\gamma_{A_0}}{\gamma_A} = \frac{R_{bA}}{C_A} \end{aligned} \quad (17)$$

应注意式 (17) 中 γ_A 是系统 A 达到误比特率 P_b 所需的信噪比, 即 $\gamma_A = f^{-1}(P_b)$ ($P_b = f(\gamma_A)$ 为系统 A 的 BER 性能曲线); 同时, R_{bA} 是系统 A 以特定的误比特率 P_b 达到的信息传输速率。

由式 (17) 可见, β_A 值是系统 A₀ 的资源需求与系统 A 的资源需求之比, 也是系统 A 的信息传输速率与其信道容量之比。 β_A 值反映了实际系统与它所对应的理想系统之间的差距。对于实际的通信系统, 只要 BER 要求 P_b 取值足够小, β_A 总是小于 1 的。对于实现了信道容量的理想系统, 则有 $\beta = 1$ 。

基于以上分析, 将 β_A 定义为系统 A 的总体资源效率是合理的。

将式 (9) 代入式 (17), 得

$$\beta_A = \frac{R_{bA}}{C_A} = \frac{R_{bA}}{g(W_A, S_A/N_0)} \quad (18)$$

由式 (18) 即可计算出系统 A 的总体资源效率。

用 $\mu_A = W_A/R_{bA}$ 、 $\gamma_A = (S_A/N_0)/R_{bA} = E_{bA}/N_0$ 对式 (18) 进行变量代换, 总可以得到通信系统总体资源效率的归一化资源表示, 记为

$$\beta_A = g_2(\mu_A, \gamma_A) \quad (19)$$

因此也可根据式 (19) 计算系统 A 的总体资源效率。

例如, 对于基本 AWGN 信道下的通信系统, 式 (18) 具体化为

$$\beta_A = \frac{R_{bA}}{W_A \text{lb}[1 + S_A/(W_A N_0)]} \quad (20)$$

式 (19) 具体化为

$$\beta_A = \frac{1}{\frac{W_A}{R_{bA}} \text{lb} \left[1 + \frac{(S_A/N_0)/R_{bA}}{W_A/R_{bA}} \right]} = \frac{1}{\mu_A \text{lb}(1 + \gamma_A/\mu_A)} \quad (21)$$

3 MIMO 系统总体资源效率测度方法

将上述通信系统总体资源效率测度方法应用于 MIMO 无线通信系统, 这时, 式 (17) 中的 R_{bA} 表示特定 MIMO 系统的信息传输速率, C_A 表示对应的 MIMO 信道容量。不同收、发天线数量亦即占用不同空间资源的 MIMO 系统, 式 (17) 中各参量将有所不同, 亦具有不同的信道容量, 需分别进行总体资源效率的测度。

按照式 (17) 的定义, 并按照式 (18)、式 (19) 计算 MIMO 系统的总体资源效率, 须解决以下关键问题: 1) 得到 MIMO 信道容量表达式; 2) 定义 MIMO 系统的归一化带宽 μ 和归一化信噪比 γ 。

3.1 MIMO 信道容量

关于 MIMO 信道容量, 已有大量研究给出明确结论。文献[13,14]的开创性工作预见 MIMO 信道容量潜力。文献[15]定义并推导了确定性及遍历 MIMO 信道容量, 给出较系统的结论。文献[16]对各种 MIMO 信道的容量限进行概括性总结。然而, 这些推导方法及结论的表达是以单位带宽上的极限信息传输速率为基础的, 且系统接收信噪比的定义也不同于总体资源效率测度所需的归一化信噪比 $\gamma_b = E_b/N_0$ 。下面将给出适于总体资源效率测度的 MIMO 信道容量表达。

1) 非频率选择性确定性 MIMO 信道容量

确定性 MIMO 信道是指其信道系数矩阵各元素取值是确定的、不随时间变化的, 它是随机性 MIMO 信道研究的基础。

假设 MIMO 系统有 N 副发送天线和 M 副接收天线, 对于非频率选择性确定性 MIMO 信道, 假设信道信息在接收端为已知而在发送端为未知, 文献[15]给出的信道容量公式为

$$C' = \text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{E_s}{NN_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz}) \quad (22)$$

其中, $\mathbf{H} \in C^{M \times N}$ 为复信道系数矩阵, 这里 \mathbf{H} 是确定的常数矩阵; \mathbf{I}_M 为 M 阶单位矩阵; E_s 为 N 副发送天线发送信号的总能量; N_0 为每接收天线接收信

号中 AWGN 的单边功率谱密度; $\text{det}(\cdot)$ 表示矩阵的行列式。

但是, 式 (22) 所表示的信道容量是以单位带宽为基础的。要对 MIMO 系统进行总体资源效率测度, 须得到任意信道带宽 W 下的 MIMO 信道容量。

设 MIMO 信道带宽为 W , 每发送天线发送信号的平均功率为 S (N 副发送天线发送的平均功率的总和为 NS), MIMO 信道容量为 C bit/s。分析文献[15]的推导过程可知, 式 (22) 中, C' 表示单位带宽上的信道容量, 而 E_s 其实是单位带宽上 N 副发送天线发送的平均功率的总和, 因此有

$$C' = \frac{C}{W} \quad (23)$$

$$E_s = \frac{NS}{W} \quad (24)$$

将式 (23) 和式 (24) 代入式 (22), 可得信道带宽为 W 的确定性 MIMO 信道的信道容量为

$$C = W \text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{S}{WN_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (25)$$

若 MIMO 系统只有 1 副发送天线和 1 副接收天线, 即 $N = M = 1$, 且信道矩阵 $\mathbf{H} = 1$, 则 MIMO 信道变成基本 AWGN 信道, 式 (25) 变成 $C = W \text{lb} [1 + S/(WN_0)]$ 。这正是式 (10) (香农信道容量公式)。

2) 非频率选择性遍历随机 MIMO 信道容量

非频率选择性遍历随机 MIMO 信道的信道矩阵 \mathbf{H} 中各元素为随机量 (同分布), 因而信道容量也是随机量。这时只要对式 (25) 表示的信道容量针对 \mathbf{H} 求统计平均, 就得到遍历随机 MIMO 信道容量, 即

$$\bar{C} = E \left[W \text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{S}{WN_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \quad (26)$$

遍历信道容量 \bar{C} 的具体表达式涉及到矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的奇异值分解, 已由文献[17]给出, 这里从略。

3.2 MIMO 系统的归一化资源需求

MIMO 系统归一化带宽 μ 即按照式 (1) 的定义。众所周知, MIMO 系统在不增加带宽的前提下实现多天线并行传输, 因而其归一化带宽需求相对很小。

MIMO 系统归一化信噪比定义为每接收天线每比特平均能量 E_b 与每接收天线 AWGN 的功率谱

密度 N_0 之比。

假设 MIMO 系统, 记为系统 A, 有 N 副发送天线, M 副接收天线, 复信道矩阵 \mathbf{H} 为遍历随机矩阵, 信道带宽为 W_A , 每发送天线发送信号平均功率为 S_A , 以特定的误比特率 P_b 达到信息传输速率 R_{bA} , 归一化带宽为 $\mu_A = W_A/R_{bA}$ 。根据上述 MIMO 系统归一化信噪比的定义, 得

$$\gamma_A = \frac{E_{bA}}{N_0} = \frac{NS_A\sigma_h^2}{R_{bA}N_0} \quad (27)$$

其中, σ_h^2 为信道矩阵 \mathbf{H} 中各元素的方差。

3.3 理想 MIMO 系统的归一化资源需求

上述 MIMO 系统 A 所对应的理想系统, 记为系统 A_0 , 其归一化带宽需求为 $\mu_{A_0} = W_{A_0}/\bar{C}_A$, \bar{C}_A 为遍历信道容量; 其归一化信噪比需求为

$$\gamma_{A_0} = \frac{E_{bA_0}}{N_0} = \frac{NS_A\sigma_h^2}{\bar{C}_AN_0} \quad (28)$$

因此

$$\frac{S_A}{N_0} = \frac{\gamma_{A_0}\bar{C}_A}{N\sigma_h^2} \quad (29)$$

由式 (26) 和式 (29) 得

$$\begin{aligned} \bar{C}_A &= E \left[W_A \text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{S_A}{W_A N_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \\ &= W_A E \left[\text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{\gamma_{A_0}}{\mu_{A_0} N \sigma_h^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

由式 (30) 可以得到 MIMO 理想系统的归一化带宽 μ_{A_0} 与归一化信噪比 γ_{A_0} 之间的约束关系为

$$\mu_{A_0} E \left[\text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{\gamma_{A_0}}{\mu_{A_0} N \sigma_h^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] - 1 = 0 \quad (31)$$

3.4 MIMO 系统的总体资源效率

根据式 (17) 通信系统总体资源效率定义, MIMO 系统总体资源效率为 $\beta_A = R_{bA}/\bar{C}_A$ 。注意到 $\mu_A = W_A/R_{bA}$, 并由式 (26) 和式 (27) 得

$$\begin{aligned} \beta_A &= \frac{R_{bA}}{E \left[W_A \text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{S_A}{W_A N_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right]} \\ &= \frac{1}{\mu_A E \left[\text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{\gamma_A}{\mu_A N \sigma_h^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right]} \end{aligned} \quad (32)$$

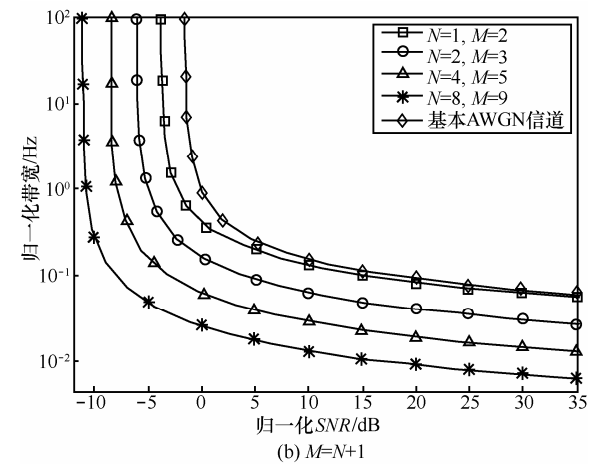
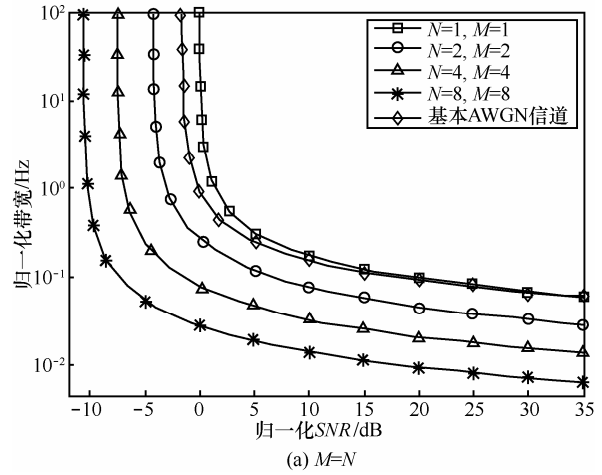


图 2 理想 MIMO 系统归一化资源需求

4 MIMO 系统总体资源效率测度结果

以下对几种具体的 MIMO 系统进行数值试验, 首先对理想 MIMO 系统的归一化资源需求进行比较, 然后给出实际 MIMO 系统的总体资源效率测度结果。

4.1 理想 MIMO 系统的归一化资源需求比较

根据式 (31), 图 2 给出了几种理想 MIMO 系统的归一化资源需求曲线。为便于比较, 图中也给出了基本 AWGN 信道下理想系统的归一化资源需求曲线。由图 2 可以得出以下结论。

1) 对于实现了信道容量的理想 MIMO 系统, 占用的空间资源越多 (收发天线数量大), 其信道容量越大, 因而归一化带宽需求以及归一化信噪比需求越小, 即空间资源与其他资源之间存在着互换关系。由图 2 (a) 可知, 当收发天线数量相等即 $M = N$ 时, 随着 N 值增大, 归一化资源曲线向左下方移动, 说明归一化资源需求减小。

2) 增加接收天线数量, 使 $M = N + 1$, 由图 2(b)

可知,理想MIMO系统的归一化资源需求进一步减小。

3) 基本 AWGN 信道下理想系统的资源需求曲线介于 $N=1, M=1$ 和 $N=1, M=2$ 所对应的曲线之间。这说明,在绝对资源(带宽和信噪比)需求相同的情况下,单入单出($N=1, M=1$)衰落信道的容量稍小于基本 AWGN 信道的容量;但是,增加一副接收天线,单入双出($N=1, M=2$)衰落信道的容量则大于基本 AWGN 信道的容量;其余收发天线数量更大的 MIMO 信道容量都大于基本 AWGN 信道的容量。这一结论的意义在于,以基本 AWGN 信道为参照,给出了关于 MIMO 信道容量的量的概念。

4.2 MIMO 系统的总体资源效率测度

图 3 和表 1 给出几种实际 MIMO 系统的归一化资源需求,根据式(32),进一步给出总体资源效率测度结果。为便于比较,也给出了基本 AWGN 信道下对应系统的情况。各系统都采用最佳检测,即最大似然(ML, maximum likelihood)检测或相干检测。各系统在 $P_b=10^{-5}$ 的 BER 要求下所需的归一化信噪比由系统仿真得到。所有信道带宽均取已调信号的第一零点带宽。MIMO 系统的 ML 检测性能由文献[18]提供的方法经仿真获得。

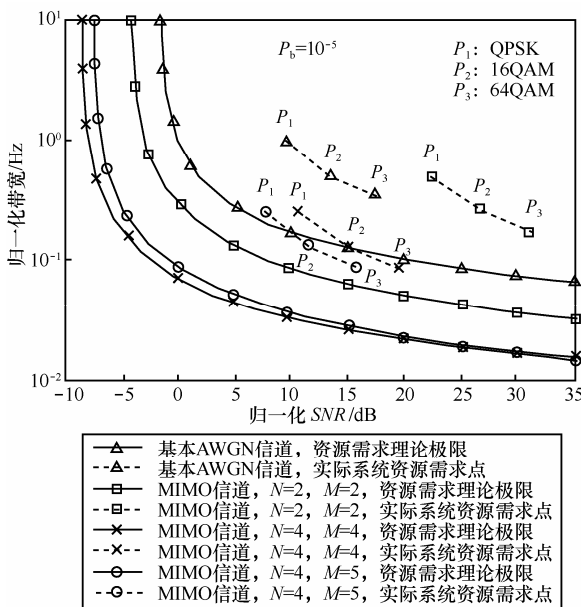


图 3 MIMO 空间复用系统的总体资源效率

由图 3 和表 1 可得出以下结论。

1) 对于收发天线数量相同的 MIMO 系统,每发送天线采用的 QAM 调制的星座规模越大,系统的总体资源效率越高。

表 1 MIMO 空间复用系统的资源需求和总体资源效率

序号	通信系统类型	μ	γ/dB	β	P_b
1	MIMO 系统 $N \times M=2 \times 2$, QPSK, ML 检测	1/2	22.3	0.12	
2	MIMO 系统 $N \times M=2 \times 2$, 16QAM, ML 检测	1/4	26.9	0.18	
3	MIMO 系统 $N \times M=2 \times 2$, 64QAM, ML 检测	1/6	31.3	0.23	
4	MIMO 系统 $N \times M=4 \times 4$, QPSK, ML 检测	1/4	10.5	0.16	
5	MIMO 系统 $N \times M=4 \times 4$, 16QAM, ML 检测	1/8	15.2	0.23	
6	MIMO 系统 $N \times M=4 \times 4$, 64QAM, ML 检测	1/12	19.6	0.28	10^{-5}
7	MIMO 系统 $N \times M=4 \times 5$, QPSK, ML 检测	1/4	7.6	0.16	
8	MIMO 系统 $N \times M=4 \times 5$, 16QAM, ML 检测	1/8	11.8	0.24	
9	MIMO 系统 $N \times M=4 \times 5$, 64QAM, ML 检测	1/12	16.2	0.29	
10	基本 AWGN 信道, QPSK, 相干检测	1	9.6	0.30	
11	基本 AWGN 信道, 16QAM, 相干检测	1/2	13.4	0.36	
12	基本 AWGN 信道, 64QAM, 相干检测	1/3	17.8	0.40	

2) 对于采用相同调制方式的 MIMO 系统,收发天线数量越大,系统的总体资源效率越高。

3) MIMO 系统与采用相同调制方式的基本 AWGN 信道下的通信系统相比,其总体资源效率是较低的。

以上总体资源效率测度中, MIMO 系统均采用 ML 检测,而实际中,ML 检测器由于复杂度过高而往往无法实现。实际应用中一般采用较低复杂度但检测性能逊于 ML 检测的次最佳检测方案,例如迫零(ZF, zero forcing)检测、最小均方误差(MMSE, minimum mean-square error)检测、干扰依序逐次消除(OSIC, ordered successive interference cancellation)检测等^[4],这样, MIMO 系统的总体资源效率还将进一步降低。

4.3 结果分析

以上 MIMO 系统总体资源效率测度的 3 个结论,若采用以往各种资源效率独立评价的方法是不能得出的,这体现了引入总体资源效率测度方法的必要性和意义。

4.3.1 调制方式的影响

当天线数量相同时,不同调制方式的 MIMO 系统呈现不同性能。以 $N \times M=2 \times 2$ 为例,由表 1, QPSK、16QAM 和 64QAM 的归一化带宽 μ 分别为

1/2、1/4 和 1/6, 为递减趋势, 而归一化信噪比 γ 分别为 22.3、26.9 和 31.3 dB, 为递增趋势。 μ 与 γ 的数值体现了各种资源效率的独立评价, 根据其数值变化只能了解调制星座规模的增大造成 μ 与 γ 需求的互换, μ 的减小以 γ 的增加为代价, 但不能断定互换是否划算。

QPSK、16QAM 和 64QAM 的总体资源效率 β 分别为 0.12、0.18 和 0.23, 这就清楚的表明, 对于天线数量相同的 MIMO 系统, 调制星座规模大的系统总体资源效率更高, 与系统潜在能力的差距更小。实际应用中应尽可能采用较大星座规模的调制方式。

从式 (32) 看, 当调制方式星座规模增大时, 例如由 QPSK 变为 16QAM, μ 的减小可致 β 增大, 而 γ 的增大又使 β 减小。但综合的效果是 β 值增加了。实际上, μ 减小一倍, 意味着相同带宽下信息传输速率 R_b 提高一倍, 这是很吸引人的。为维持同样的 BER 性能 (由相邻星座间的距离决定), 须提高信噪比 γ , 但 β 值的计算表明, γ 值的提高量是相对较小的, 付出的代价是很划算的。

4.3.2 天线数量的影响

对于调制方式相同的 MIMO 系统, 天线数量对系统总体资源效率有一定影响。以 64QAM 调制方式为例, 由表 1, 当天线数量分别为 $N \times M = 2 \times 2$ 、 4×4 和 4×5 时, 系统归一化带宽 μ 分别为 1/6、1/12 和 1/12, 而归一化信噪比 γ 分别为 31.3、19.6 和 16.2 dB, 系统总体资源效率 β 分别为 0.23、0.28、0.29。对此作如下分析。

系统带宽一定, 发送天线数量 N 越大, 并行传输符号越多, 信道容量及实际信息传输速率越大, 系统归一化带宽需求 μ 越小。这体现了系统所用空间资源的增加, 可以换取其他资源需求的减少。

发送天线数量的增加, 虽然使 μ 减小, 但系统所需归一化信噪比需求 γ 并不增加, 反而减小。这是因为系统采用 ML 最佳检测的缘故。对于 ML 检测, 其检测依据是接收信号向量与可能发送信号向量之间的欧氏距离。其分集阶数等于接收天线的数量^[4] $M (M \geq N)$, 即所有接收天线都对增大不同接收信号向量间的欧氏距离有所贡献。较大的分集阶数必定意味着检测性能的改善, 因此 N 越大, M 相应越大, 检测性能越好, 为达到一定 BER 所需的 γ 越小。另一方面, 若系统采用 ZF 等线性检测方案, 其分集阶数仅为 $M - N + 1$ ^[4], 表现为发送天线数量越大, 天线间干扰越大, 检测性能越差。所以, 如

何以低复杂度逼近以至实现 ML 检测一直是本领域的研究目标之一。

发送天线数量 N 一定, 增加接收天线数量 M , 显然不改变 μ , 但增加了分集阶数, 使 ML 检测性能改善, 因此归一化信噪比需求 γ 进一步减小。

随着收发天线数量 M 、 N 的增加, 系统的总体资源效率 β 有所增加, 但不十分显著。这可以解释为天线数量的增加使系统实际信息传输速率 R_b 及对应信道容量 \bar{C} 同时增加, 因此各系统的 $\beta = R_b / \bar{C}$ 数值上近似。但是, 天线数量的增加使 ML 检测的分集阶数增加, 检测性能改善的幅度更显著些, 或者说 γ 需求的减小更显著些, 最终表现为 β 值有所增加。这说明实际应用中尽可能采用天线数量大的 MIMO 系统, 对增加系统的总体资源效率更为有利。

4.3.3 MIMO 通信系统与基本 AWGN 信道下通信系统比较

由表 1 看出, 当采用 QPSK 调制时, 对于基本 AWGN 信道下通信系统, 其总体资源效率 $\beta = 0.30$ 。而对于 MIMO 系统, $N \times M = 2 \times 2$ 、 4×4 和 4×5 时, β 分别为 0.12、0.16 和 0.16。结合其他调制方式下 2 类通信系统的数值对比可知, MIMO 系统虽具有很大潜力, 但就目前实现的 MIMO 系统而言, 若与基本 AWGN 信道下的对应系统相比, 其总体资源效率更低, 与系统的潜在能力有更大的差距。

造成 MIMO 系统总体资源效率相对较低的内在原因尚需进一步深入研究。据初步分析, 可能的原因之一是 MIMO 信道是时变的衰落信道, 其信道容量是随机变化的, 但实际系统的信息传输速率等参数却是恒定的; 当 MIMO 信道条件较好, 即信道容量变得较大时, 允许系统以较高的信息速率、较小的带宽或信噪比进行信息传输, 但系统参数却不变, 这意味着资源的浪费。反之, 当 MIMO 信道条件恶劣, 信道容量变得较小时, 系统仍以既定的信息传输速率等参数强行传输, 致使检测性能恶化, 系统仿真试验表明, 传输错误绝大部分在此时发生。这样, 总的来看, MIMO 系统需要较高的信噪比以达到规定的 BER 性能要求。

基于以上分析, 可以设想, 提高 MIMO 系统总体资源效率、挖掘系统潜在能力的一种可能途径是构造衰落信道自适应的 MIMO 通信系统, 使系统信息传输速率或其他参数随信道条件的改变作实时的变化。当然, 系统须具有双向信道, 接收端须计

算得到表征信道条件的参数, 并通过反向信道实时传送给发送端。

发送端已知信道全部信息的 MIMO 系统早已提出, 其特征是接收端将信道系数矩阵通过反向信道实时地传送给发送端。发送端通过预编码的方法降低过高的发送功率以及接收端信号检测的复杂度。该类系统对于提高 MIMO 系统的总体资源效率无疑是有益的, 但缺点是反向信道实时地传送信道系数矩阵造成的开销过大, 尤其是在信道变化速度很快时。而上述衰落信道自适应 MIMO 系统方案, 接收端只需向发送端传送信道条件参数, 反向信道开销很小。

MIMO 技术与其他高效的传输技术或编码技术相结合也是提高系统总体资源效率的有效方法, 例如与正交频分复用 (OFDM)、空时码 (STC)、低密度奇偶校验码 (LDPC) 等技术相结合。

5 结束语

本文提出了一种通信系统总体资源效率测度的一般模型, 并以此为基础给出了 MIMO 无线通信系统总体资源效率测度的具体方法。定量的分析及测度结果表明, 虽然 MIMO 系统由于充分利用空间资源, 其归一化带宽与归一化信噪比需求相对较小; 但是, 就目前实现的 MIMO 系统而言, 若与基本 AWGN 信道下通信系统相比, 其总体资源效率相对更低, 与系统潜在能力的差距更大。本文所述 MIMO 系统总体资源效率测度方法可推广应用于其他类型的 MIMO 系统, 例如发送端已知信道信息的 MIMO 系统、MIMO-OFDM 系统等。

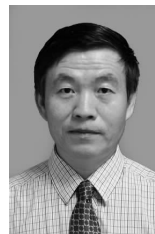
参考文献:

- [1] PROAKIS J G. Digital Communications, 5th Ed[M]. McGraw-Hill Companies, 2007.
- [2] FOSCHINI G J. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environments when using multi-element antennas[J]. Bell Laboratories Technical Journal, 1996, 1(2):41-59.
- [3] WOLNIANSKY P W, FOSCHINI G J, GOLDEN G D, *et al.* V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich scattering wireless channel[A]. Proceedings of International Symposium on Signals, Systems, and Electronics[C]. 1998.295-300.
- [4] GOLDSMITH A. Wireless Communications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [5] OHNO S, DONNY TEO K A. Universal BER performance ordering of MIMO systems over flat channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(10):3678-3687.
- [6] CATREUX S, GREENSTEIN L J, ERCEG V. Some results and in-

sights on the performance gains of MIMO systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(6):839-847.

- [7] HELIOT F, IMRAN M, TAFAZOLLI R. On the energy efficiency-spectral efficiency trade-off over the MIMO rayleigh fading channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(5): 1345-1356.
- [8] DRIOUCH E, AJIB W. Downlink scheduling and resource allocation for cognitive radio MIMO networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(8): 3875-3885.
- [9] ELNASHAR A, EL-SAIDNY M A. Looking at LTE in practice: a performance analysis of the LTE system based on field test results[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2013, 8(3):81-92.
- [10] ELMUSRATI M, EL-SALLABI H, KOIVO H. Applications of multi-objective optimization techniques in radio resource scheduling of cellular communication systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(1): 343-353.
- [11] LEE K D, YUM T S P. On pareto-efficiency between profit and utility in OFDM resource allocation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(11): 3277-3285.
- [12] LIU J Z, SHEN L F. Overall resource efficiency measure of digital modulation methods[J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, E92-B (9): 2948-2950.
- [13] WINTERS J. On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1987, 5(6):871-878.
- [14] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications: Kluwer Academic Press, 1998, 6(3): 311-335.
- [15] TELATAR E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. Europe Transactions on Telecommunications, 1999, 10(6): 585-596.
- [16] GOLDSMITH A, JAFAR S A, JINDAL N, *et al.* Capacity limits of MIMO channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(5): 684-702.
- [17] YULINO A M, VERDU S. Random matrix theory and wireless communications[J]. Foundations and Trends TM in Communications and Information Theory 2004, 1(1): 1-182.
- [18] MURUGAN A D, GAMAL H E, DAMEN M O, *et al.* A unified framework for tree search decoding: Rediscovering the sequential decoder[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(3): 933-953.

作者简介:



刘金铸 (1963-), 男, 湖南汨罗人, 东南大学博士生, 主要研究方向为宽带无线通信网络、多输入多输出 (MIMO) 通信系统信号检测技术等。



沈连丰[通信作者] (1952-), 男, 江苏邳州人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动互联网、移动自组织网络、短距离无线通信与泛在网络等。
E-mail: lfshen@seu.edu.cn。