

# 自适应比特功率分配的 MIMO OFDM 系统性能<sup>1</sup>

黎海涛 张靖\* 陆建华

(清华大学电子工程系 北京 100084)

\*(中国电子科技集团公司电子科学研究院 北京 100041)

**摘要:** 该文首先分析了多天线发射和接收 (MIMO) 的 OFDM 系统模型。然后针对在多径衰落信道下, OFDM 中一些深度衰落的子载波降低了系统性能。该文把一般多载波系统中的自适应比特功率分配算法推广应用到多天线 OFDM 系统中。同时研究了自适应 MIMO OFDM 系统的频谱效率。仿真结果表明, 自适应比特功率分配提高了 MIMO OFDM 的误比特率性能和频谱效率。

**关键词:** OFDM, 多天线, 比特功率分配, 频谱效率

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)03-0416-05

## Study on the MIMO OFDM Systems with Adaptive Bit and Power Allocation

Li Hai-tao Zhang Jing\* Lu Jian-hua

(Department of Electronic Eng., Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\*(Academy of Electronics and Information Technology,

China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China)

**Abstract** The multiple antenna Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) system model is analyzed in this paper. Considering that Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) channel can be separated into parallel subchannels by means of the singular value decomposition, and deep faded subcarriers may degrade the OFDM system performance, the adaptive bit and power allocation for MIMO OFDM system are proposed. The analysis and simulation results show that the proposed adaptive MIMO OFDM improves bit error rate performance and spectral efficiency of the system.

**Key words** OFDM, Multiple antennas, Bit and power allocation, Spectral efficiency

## 1 引言

随着无线网络和 Internet 的逐渐融合, 人们对无线通信业务的类型和质量的要求越来越高。为满足无线多媒体和高速率数据传输的要求, 需要开发新一代无线通信系统。其中多天线输入和输出 (MIMO) 和正交频分复用 (OFDM) 相结合的 MIMO OFDM 技术受到广泛关注<sup>[1,2]</sup>。

OFDM 在频域把信道分成许多正交子信道, 各子信道的载波频谱相互重叠, 提高了频谱利用率。同时每个子信道信号带宽小于信道带宽, 即使整个信道是频率选择性的, 每个子信道也是相对平坦的, 大大减小了符号间干扰 (ISI)。由于 OFDM 具有抗多径能力强、频谱利用率高的优点, 适用于高速率无线传输。MIMO 是在发送和接收端使用多元天线阵列 (Multiple Element Array, MEA) 获得空分复用增益, 当接收天线大于或等于发送天线数时, Rayleigh 衰落下 MIMO 信道容量与发送天线数成线性关系, 在无需耗费额外功率和带宽的条件下大大增加了信道容量, 且能显著提高传输链路质量。

<sup>1</sup> 2002-10-22 收到, 2003-04-24 改回

国家自然科学基金重点项目资助课题 (资助号: 60132010)

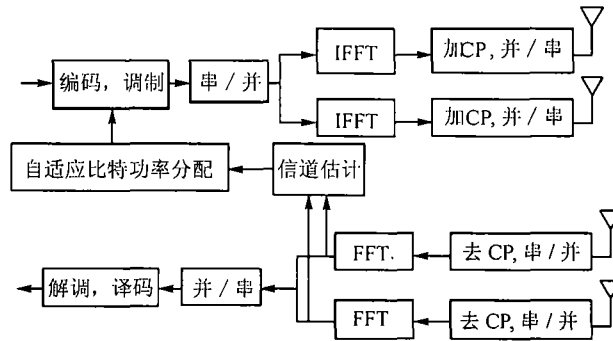


图 1 MIMO OFDM 系统模型

MIMO 和 OFDM 相结合的 MIMO OFDM 系统具有两者的优点, 它既通过 OFDM 调制把频率选择性 MIMO 衰落信道分解成一组并行平坦衰落信道, 又利用 MIMO 提高了信道容量。但在 OFDM 的所有载波中, 通常有 1% 的子载波的衰减低于平均载波 20dB, 0.1% 载波衰减低于平均载波 30dB。这些子载波上的严重衰落降低了系统性能。因此, 如果根据子载波信道增益对各个子载波进行自适应比特功率分配, 则可以优化系统性能。基于此, 本文研究了自适应比特功率分配对 MIMO OFDM 系统性能的影响。文中第 2 节介绍了 MIMO OFDM 系统模型, 第 3 节研究了自适应比特功率分配算法, 第 4 节分析了自适应 MIMO OFDM 的频谱效率, 最后给出了仿真结果。

## 2 系统模型

在基于 OFDM 的空分复用系统中, 输入比特经过编码、调制、串并变换后, 通过 IFFT 变换成 OFDM 符号, 再插入循环前缀 (CP) 后同时从每根天线发送出去。在接收端, 每根接收天线对接收到的 OFDM 符号先去掉 CP、由 FFT 变换到时域, 合并后得到输出符号。把输出符号并串变换、解调、译码后得到输出比特, 如图 1 所示。

设发射信号向量为  $\mathbf{X} = [x_1 \cdots x_{N_t}]^T$ , 则接收信号可表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{n} \tag{1}$$

式中  $\mathbf{Y} = [y_1 \cdots y_{N_r}]^T$  为接收信号向量,  $\mathbf{n} = [n_1 \cdots n_{N_r}]^T$  为白高斯噪声向量,  $T$  表示转

置,  $N_t$  是发射天线数,  $N_r$  是接收天线数, 信道矩阵  $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_r} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_t1} & h_{N_t2} & \cdots & h_{N_tN_r} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{H}$

中元素  $h_{ij}$  为发射天线  $i$  到接收天线  $j$  的信道衰落系数, 它可通过信道估计获得。

为方便分析, 作如下假设: 信道是准静态的; 收、发端已知信道矩阵; 从多根天线发射的信号是独立同分布的 (I.I.D)。这时通过特征值分解 (SVD) 可以把 MIMO 信道分解成并行独立的多个单输入单输出 (SISO) 信道

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V} \tag{2}$$

其中  $\mathbf{H}$  是  $N_r \times N_t$  归一化复信道矩阵,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  为正交矩阵, 分别表示发射预滤波  $\mathbf{U}$  和接收成形滤波  $\mathbf{V}$ , 满足  $\mathbf{U}\mathbf{U}^+ = \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{V}\mathbf{V}^+ = \mathbf{I}$ 。  $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\sigma_1 \ \sigma_2 \ \cdots \ \sigma_k)$ ,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \cdots > \sigma_k$  为  $\mathbf{H}$  的特征值。分解得到的并行子信道个数等于  $\mathbf{H}$  中非零特征值的个数  $K$ 。

### 3 自适应比特功率分配

如前所述, 在时变多径信道下, OFDM 符号中各个子载波信道增益不同, 可能是某些子载波的信道增益低, 导致大的误比特率 (BER)。解决这个问题的一种方法是采用 water filling 算法对功率进行最优自适应分配, 它可得到 Shannon 信道容量。但其计算量大, 故多采用易于实现的次优算法。

文中采用自适应比特和功率分配算法中, 假设每个 OFDM 符号发送给定的总比特数  $B$ , 并把这些比特分配到每个载波上, 对各个载波分配的比特数进行优化使发射功率最小, 问题描述如下:

$$\text{目标函数} \quad \min \sum_{k=1}^K e_k(b_k)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_{k=1}^K b_k = B, b_k \in Z, b_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K$$

$e_k(b_k)$  表示子载波  $k$  上传输  $b_k$  个比特所需要的发射功率, 且  $e_k(0) = 0$ 。

#### 3.1 初始化比特分配

利用单天线 (SISO) 多载波系统中的比特功率分配算法<sup>[3]</sup>进行初始化处理。

(1) 计算子载波信噪比  $\text{SNR}_k$ 。

(2) 根据

$$\hat{b}_k = \log_2(1 + \text{SNR}_k/\gamma) \quad (3)$$

计算第  $k$  个子载波分配的比特数, 并对  $\hat{b}_k$  取整得到  $b_k$ ,  $\gamma$  是可调参数。

(3) 把  $b_k$  限制在  $\{0, 1, 2, 4, 6, 8\}$  范围内, 对应  $[2, 4, 16, 64, 256]$  阶 QAM 调制。

(4) 基于初始分配比特数, 利用 (4) 式计算分配给第  $k$  个载波的功率。

$$e_k(b_k) = \frac{2^{b_k} - 1}{\text{SNR}_k/\gamma} \quad (4)$$

(5) 对每个子载波, 形成功率增量表。如第  $k$  个子载波的功率增量为

$$\Delta e_k(b) = e_k(b) - e_k(b-1) = \frac{2^{b-1}}{\text{SNR}_k/\gamma} \quad (5)$$

功率增量表将给出每个子载波发射比特数从 0bit 增加到 1bit, 从 1bit 增加到 2bit, 从 2bit 增加到 3bit 等递增的功率要求。

#### 3.2 优化算法

在满足目标函数和约束条件下, 利用 B-Tighten 算法<sup>[4]</sup>实现比特功率分配的优化。设

输入: 初始分配比特数  $b_k$ ; 初始分配能量  $e_k$ ; 总的比特数  $B$ 。

输出:  $b$  —— 最优分配比特数。  $e$  —— 最优分配能量。

```

0 → B'
for k = 1 to K
  B' + b_k → B'
  while B' ≠ B
    if B' > B
      i = arg max_{1 ≤ j ≤ K} Δe_j(b_j); B - 1 → B; b_i - 1 → b
    else
      i = arg min_{1 ≤ j ≤ K} Δe_j(b_j + 1); B + 1 → B; b_i + 1 → b
    end
  end
end
end

```

综上所述, 可实现多天线 OFDM 系统的自适应比特功率的分配。注意到在 SISO OFDM 中, 并行子信道数等于子载波数, 而在 MIMO OFDM 中, 并行子信道数等于信道矩阵中非零

特征值数  $K$ 。可见, MIMO OFDM 的自适应比特功率问题分解成  $K$  个子载波上的比特功率分配问题。

#### 4 频谱效率

自适应比特功率分配是应用于多载波通信系统的一种自适应调制方式, 自适应调制可以提高系统的频谱效率。下面研究自适应 QAM 调制方式下, MIMO OFDM 系统在满足一定误比特率 (BER) 条件下的频谱效率。在 MQAM 调制方式下, 第  $n$  个 OFDM 符号的第  $k$  个子载波的瞬时 BER 为<sup>[7]</sup>

$$P_e[n, k] = c_1 \exp \left\{ -\frac{c_2(E_s/N_0)|H(n, k)|^2}{2^{\beta[n, k]} - 1} \right\} \quad (6)$$

式中  $c_1 = 0.2$ ,  $c_2 = 1.6$ ,  $E_s$  为发射符号能量,  $N_0/2$  为噪声方差,  $H[n, k]$  为信道频率响应,  $\beta[n, k]$  定义为第  $n$  个 OFDM 符号的第  $k$  个子载波的发送的比特数。在非自适应比特功率分配的 MIMO OFDM 系统中,  $\beta[n, k] = \beta$  为一常数, 平均 BER 为

$$P_e = E\{P_e[n, k]\} = \frac{c_1}{(c_2 E_s/N_0)/(2^\beta - 1) + 1} \quad (7)$$

若  $P$  为系统的目标 BER, 由 (7) 式得到在满足 BER 条件下的最大发射比特数为

$$\beta = \log_2 \left[ \frac{c_2 E_s/N_0}{(c_1/P) - 1} + 1 \right] \quad (8)$$

这时,  $\beta(\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}))$  即为在给定 BER 时的系统频谱效率。

对自适应比特功率分配的多天线 OFDM 系统, 根据各个子载波增益不同采用了不同调制技术,  $\beta$  不再为常数, 由 (6) 式得到

$$\beta[n, k] = \log_2 \left[ \frac{c_2 E_s/N_0 |H[n, k]|^2}{\ln(c_1/P)} + 1 \right] \quad (9)$$

故系统频谱效率为

$$\bar{\beta} = E\{\beta[n, k]\} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \beta[n, k] \quad (10)$$

#### 5 仿真结果

模拟参数如下: 发射、接收天线数为  $N_t = N_r = 2$ , OFDM 符号子载波数  $N = 64$ , 循环前缀 CP=16, 每个 OFDM 符号分配的比特数  $B = 64$ ; 采用自适应 QAM 调制, 调制阶数  $M = \{2, 4, 16, 64, 256\}$ ; 信道模型为四径 Rayleigh 衰落信道, 功率时延分布呈指数衰减为  $\{1, \exp(-1), \exp(-2), \exp(-3)\}$ , 噪声方差  $\sigma = 1 \times 10^{-3}$ 。图 2 示出了自适应 MIMO OFDM, 非自适应 MIMO OFDM 的误比特率 (BER) 性能。从图 2 可以看到, 自适应 MIMO OFDM 的 BER 性能大大优于非自适应的 MIMO OFDM。在满足  $\text{BER} < 10^{-3}$  时, 系统频谱效率如图 3, 可见自适应比特功率分配大大提高了频谱效率。

仿真结果表明, 自适应的速率和功率优化能进一步提高多天线 OFDM 系统性能。在多天线多载波系统中采用自适应比特功率分配是一项非常有潜力的技术。

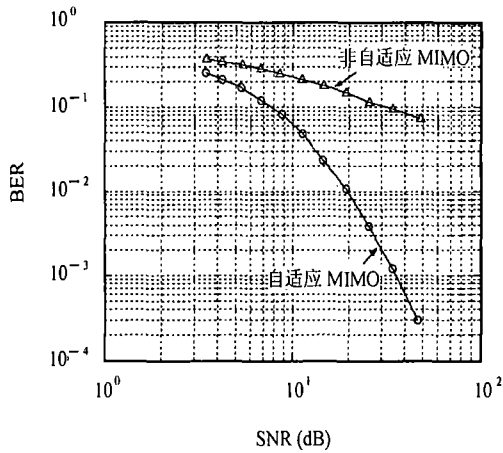


图2 MIMO OFDM 误比特率

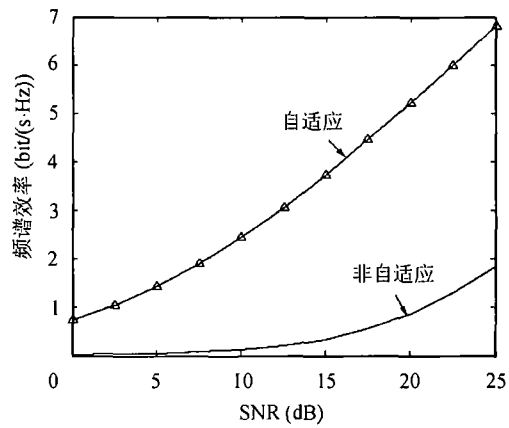


图3 频谱效率

## 参 考 文 献

- [1] Raleigh G G, Cioffi J M. Space-temporal coding for wireless communications. In Proc. of Globecom, London, 1996: 1809-1814.
- [2] Ye Li, Chuang J C, Sollenberger N R. Transmitter diversity for OFDM systems and its impact on high rate data wireless networks. *IEEE Trans. J. on SAC*, 1999, 17(7): 1233-1243.
- [3] Chow P, et al. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels. *IEEE Trans. Comm.*, 1995, COM-43(2): 773-775.
- [4] Campello J. Optimal discrete bit loading for multicarrier modulation systems. In Proc. of ISIT, Cambridge, USA, 1998: 193.
- [5] Campello J. Discrete bit loading for multicarrier modulation systems. [Ph.D Thesis], Stanford University, 1999.
- [6] Wong K, Lai S, Cheng R S, Letaief K B, Murch R D. Adaptive spatial-subcarrier trellis coded MQAM and power optimization for OFDM transmission. In Proc. of VTC, Boston, USA, 2000: 2049-2053.
- [7] Chung S T, Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view. *IEEE Trans. on Comm.*, 2001, COM-49(9): 1561-1571.

黎海涛: 男, 1972年生, 博士, 从事多天线、多载波及超宽带无线传输技术研究, 已发表论文30余篇。

张 靖: 女, 1975年生, 博士, 从事自适应信号处理、电子系统工程等方面的研究。

陆建华: 男, 1963年生, 博士, 教授, 研究方向为无线多媒体通信, 已在IEEE Trans.等期刊和国际会议发表论文60余篇。