

多天线 OFDM 系统中的自适应子信道分配和天线选择^{*}

余官定, 张朝阳, 来萍, 储珊, 仇佩亮

(浙江大学信电系 信息与通信工程研究所 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对多用户 MIMO-OFDM 系统, 提出自适应子信道分配算法。首先将相邻的子载波分块成若干子信道, 在分配子信道的时候优先考虑平均信道容量小的用户, 并且将相对利用度大的子信道分配给该用户, 从而在频谱利用率和公平性上具有较好的性能。为了降低发送端的硬件复杂度以及非线性因素的影响, 将自适应信道分配和发送天线选择相结合, 提出联合自适应子信道分配和天线选择算法。仿真结果表明, 本文提出的联合算法具有较高的频谱效率和较低的中断概率。

关键词: MIMO-OFDM; 自适应调制; 天线选择; 子信道分配

中图分类号: TN925.5 **文献标识码:** A

1 引言

在下一代无线通信系统中, 普遍认为多天线技术是提高传输速率和可靠性的一种有效方法, 比如在发送端采用多天线 (MISO, multiple-input single-output) 或者收发两端同时采用多天线 (MIMO, multiple-input multiple-output) 进行传输; 另一方面, 正交频分复用 (OFDM) 是目前宽带无线通信系统中最为有效的调制技术之一, 在对付信道多径引起的频率选择性衰落上有良好的性能。因此, 将 MIMO 和 OFDM 技术相结合, 即 MIMO-OFDM, 是未来宽带无线传输系统的首选方案^[1]。

早期的链路自适应技术主要是在时域进行, MIMO-OFDM 的引入使得链路自适应技术能在空、时、频三个维度进行。文献[2]研究了自适应调制和编码技术在 MIMO 及 MIMO-OFDM 系统的应用; 文献[3,4]研究在子载波和空间两个维度进行功率和比特分配, 以达到优化系统容量和可靠性的资源分配策略。研究结果表明在 MIMO-OFDM 系统中采用链路自适应技术, 比单纯的多天线系统在系统容量和无线资源利用率上有较大提高, 对于未来无线通信系统的设计有很大的参考价值。

本文在链路自适应技术的基础上, 进一步研究多用户 MIMO-OFDM 系统的自适应子载波分配问题。在单用户 MIMO-OFDM 系统, 所有的子载波都被一个用户所用, 资源分配研究的重点是如何根据信道情况将总功率在子载波或者天线上分配; 而对于多用户系统而言, 基站同一时刻与多用户进行通信, 必须根据信道情况和业务需求动态地为各用户分配子载波, 并且确定具体的调制参数。文献[5,6]研究了 SISO-OFDM 系统的自适应子载波分配策略, 这些方法虽然有很好的性能, 但是算法复杂度过高, 较难在实际多天线系统中得到应用。为此, 首先利用分块 OFDM 的思想^[8], 将 MIMO-OFDM 系统中的相邻子载波组成子信道, 然后根据文献[7]中提出的快速子载波分配算法进行自适应子信道分配, 从而降低了分配算法的复杂度。

此外, 在 MIMO-OFDM 系统中, 用户的数据同时由多根天线发送, 这不仅使得发送端硬件复杂, 也会造成每根天线上由于子载波数目过多而引起的信号峰平比增大, 加剧系统非线性因素的影响。为此, 文献[9]提出了分簇 OFDM 系统的思想, 使每个子信道只能在若干天线上传输。文献[10]针对单用户 MIMO-OFDM 系统提出在发送端知道信道状态时的自适应发送天线选择策略。本文进一步针对多用户 MIMO-OFDM 系统, 将自适应子信道分配和天线选择相结合, 基站在分配子信道的同时选择该子信道的发送天线, 再根据信道状态自适应改变子信道上使用的调制方式。仿真结果表明, 本文提出的联合自适应子信道分配和天线选择算法具有较高的频谱效率和较低的中断概率。

* 收稿日期: 2004-12-13 修订日期: 2005-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60472079); 浙江省自然科学基金重点项目 (Z104252); 浙江省科技计划项目 (2005C21005)

2 系统和信号模型

研究无线通信系统的下行链路，有一个基站和 M 个用户构成，发射端和接收端分别有 N_r 和 N_t 根天线，天线之间距离大于半个波长，使得收发天线对之间的信道是相互独立的。子载波数目为 K ，子载波的带宽足够小，因此一个子载波上的信道衰落是平坦的，并且认为信道在一次传输时间内保持不变。

设 $\mathbf{H}^m(k) = \{h_{u,v}^m(k), 1 \leq u \leq N_r, 1 \leq v \leq N_t\} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 是用户 m 在子载波 k 上的信道矩阵， $h_{u,v}^m(k)$ 表示发送天线 v 到用户 m 的接收天线 u 之间子载波 k 上的信道响应。那么在子载波 k 上，用户 m 的第 u 根接收天线上的信号 $Y_u^m(k)$ 为：

$$Y_u^m(k) = \sum_{v=1}^{N_t} h_{u,v}^m(k) x_v(k) + n_u^m(k) \quad (1)$$

其中： $x_v(k)$ 为基站天线 v 在子载波 k 上的发射信号，信号功率 $P_v(k) = E\{x_v^H(k) \cdot x_v(k)\}$ ； $n_u^m(k)$ 为均值为 0，方差为 s^2 的高斯噪声。假设发射端每根天线上各子载波的平均信号功率均为 P ，定义 $r = P/s^2$ 为平均发射信噪比。（在以下的分析中，以 $N_r=2$ 和 $N_t=2$ 为例来说明本文的算法）

1) 单输入单输出 (SISO-OFDM) 系统：

对于 SISO-OFDM 系统，发送端和接收端均只有 1 根天线，此时用户 m 在子载波 k 上的接收信噪比为：

$$SNR_{SISO}^m(k) = |h_{11}^m(k)|^2 \cdot r \quad (2)$$

2) 多输入单输出 (MISO-OFDM) 系统：

考虑发射端有 2 根天线，接收端只有 1 根天线的情况。发送端采用 Alamouti 码^[12]，并且假设在每个子载波上单独编码，在这种编码结构下，用户 m 子载波 k 上的接收信噪比为：

$$SNR_{MISO}^m(k) = \left(|h_{11}^m(k)|^2 + |h_{12}^m(k)|^2 \right) \cdot r \quad (3)$$

3) 单输入多输出 (SIMO-OFDM) 系统：

发送端选择一根天线，而接收端两根天线用最大比合并方式，则用户 m 在子载波 k 上接收信噪比为：

$$SNR_{SIMO_i}^m(k) = \left(|h_{1i}^m(k)|^2 + |h_{2i}^m(k)|^2 \right) \cdot r, \quad i=1,2 \quad (4)$$

其中， i 表示发送端选择的天线序号。

4) 多输入多输出 (MIMO-OFDM) 系统：

进一步考虑收发两端各有 2 根天线的情况，此时发送端同样采用 Alamouti 码，而接收端 2 根天线同样用最大比合并方式，此时用户 m 在子载波 k 上接收信噪比为：

$$SNR_{MIMO}^m(k) = \|\mathbf{H}^m(k)\|_F^2 \cdot r \quad (5)$$

下标 F 表示矩阵的 Frobenius 范数。

3 自适应调制

自适应调制根据实际的信道特征和用户的 QoS 约束动态改变系统所使用的调制方式。对于多载波系统，可以在每个子载波上单独进行自适应调制，但是在宽带 MIMO-OFDM 系统中，一般子载波数目比较多，比如 IEEE 802.16d^[13] 标准中规定的子载波数目分别为 256 或 2048，如果在每个子载波上单独进行自适应调制和子载波分配，会使得算法复杂度和信令开销都很大，尤其对于多天线系统，复杂度会更大。因此，本文根据文[8]提出的分块 OFDM 概念，将相邻的 K/G 个子载波捆绑成子信道，子信道上使用的调制方式由该子信道中信道增益最差的子载波决定，然后再进行子信道分配。在实际情况中，当子信道中某子载波处于严重衰落时，同一个子信道上其它子载波上的调制方式也会降低，所以子载波分块会造成性能损失，但是可以通过选择合适的子信道大小，从而在复杂度和性能损失间进行折中^[8]。

假设用户 m 的误比特率要求为 BER_m ，那么可以确定用户 m 在子信道 g ($g = 0, 1, 2, \dots, G-1$) 上可以选

用的调制阶数为:

$$c^m(g) = \{n \mid n = \max\{f_n(SNR_x^m(g)) \leq BER_m \& n \in \mathcal{G}\}\} \quad (6)$$

式中: $SNR_x^m(g) = \min_k \{SNR_x^m(k) : g \cdot (K/G) \leq k < (g+1) \cdot (K/G)\}$ 是子信道 g 上的最低接收信噪比, $SNR_x^m(k)$ 分别由(2)~(5)式决定, x 可以是 SISO, MISO, SIMO 或者 MIMO; f_n 为 n 阶调制方式的误比特率函数; \mathcal{G} 是可以选用的调制方式集合, $\mathcal{G} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 分别表示不传输、采用 BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、32QAM、64QAM 和 128QAM 调制方式。

4 联合自适应子信道分配与天线选择算法

在多用户 MIMO-OFDM 系统中, 不仅要确定每个子信道上的调制方式, 而且要确定各用户所使用的子信道数目以及序号, 即子信道分配。自适应子信道分配 (ASA: adaptive subchannel allocation) 根据各用户在各子信道上的信道响应矩阵进行动态子信道分配, 比固定子信道分配 (FSA: fixed subchannel allocation) 在频谱效率和系统容量上都有一定的提高^[5~7]。一个好的子信道分配算法必须具有较高的频谱利用率, 在每个用户之间保证一定的公平性, 并且计算复杂度小。为此, 定义用户 m 的平均信道容量为 $c^m = \sum_{g=0}^{G-1} c^m(g)/G$, 定义子信道 g 对用户 m 的相对利用度为 $U^m(g) = c^m(g)/\sum_{j=1}^M c^j(g)$, 表

示用户 m 对子信道 g 的利用程度。在分配子信道的时候, 为了保证公平性, 优先考虑平均信道容量小的用户; 而为了提高频谱利用率, 将相对利用度大的子信道分配给该用户。文献[7]的仿真结果表明, 在 SISO-OFDM 系统中, 这种子信道分配算法在频谱利用率、公平性和计算复杂度上都有较好的性能。

在 MIMO-OFDM 中, 为了减少发送端的硬件复杂度, 可以进行发送天线选择^[11]。考虑收发两端各有 2 根天线, 发送端对于每个子信道都选择其中 1 根天线发送的情况, 设 $c_v(g)=1$ 表示子信道 g 选择在第 v 根发送天线, $c_v(g)=0$ 表示子信道 g 不在第 v 根天线上发送。文献[10]提出三种天线选择方法:

1) 固定天线选择, 即: $c_v(g) = \begin{cases} 1, & \text{if } g = v \pmod{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$

2) 自适应天线选择方案 1, 选择信道增益较大的天线, 当用户 m 使用子信道 g 时,

$$c_v(g) = \begin{cases} 1, & \text{if } v = \arg \max_{i=1,2} \left\{ \left| h_{1i}^m(g) \right|^2 + \left| h_{2i}^m(g) \right|^2 \right\} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

3) 自适应天线选择方案 2, 同样选择信道增益较大的天线, 但必须使得每根天线上子信道的数目一样。

在三种天线选择方法中, 自适应天线选择比固定天线选择具有较高的性能; 自适应选择方案 2 的性能相对于自适应选择方案 1 略差, 但是自适应选择方案 2 中每根天线上的平均信号功率相同, 对发送端放大器等系统非线性因素的影响最小。

文献[10]的天线选择方法是针对单用户 MIMO-OFDM 系统的, 本文考虑多用户 MIMO-OFDM 系统, 将自适应子信道分配与天线选择相结合, 提出联合自适应子信道分配与天线选择算法。下面就各种天线选择方法, 分别讨论联合算法。

1) 自适应子信道分配和固定天线选择:

当采用固定天线选择时, 对于每个用户, 其所有子信道将在哪个天线上发送都是可预知的, 因此在信道估计后, 根据(6)式可以确定子信道上的调制方式, 再进行自适应子信道分配。

2) 自适应子信道分配和自适应天线选择方案 1:

令 $h_{u,v}^m(g)$ 表示发送天线 v 到用户 m 的接收天线 u 之间子信道 g 内信道增益最差的子载波的信道响应, 此时用户 m 在子信道 g 上接收信号的最差信噪比为:

$$SNR_{MIMO-AS1}^m(g) = \max_{i=1,2} \left\{ \left| h_{1i}^m(g) \right|^2 + \left| h_{2i}^m(g) \right|^2 \right\} \cdot r \quad (7)$$

由上式以及式(6)可以确定各子信道上的调制方式, 然后再进行自适应子信道分配。

3) 自适应子信道分配和自适应天线选择方案 2:

自适应方案 2 相比自适应方案 1, 增加了一个约束, 即每根天线上的子信道数目相等, 在这个约束下的自适应子信道分配和天线选择可以按照以下方法进行。首先, 根据自适应子信道分配和自适应天线选择方案 1 进行初始分配, 分配之后如果发现哪根天线上的子信道数目过多, 那么让选择该天线的所有子信道中的若干子信道改变发送天线, 并使得由此引起的频谱利用率下降最小。具体步骤如下:

1) 初始分配后, 令 $m(g) \in \{1, 2, \dots, M\}$, $v(g) = \{1, 2\}$ 分别表示子信道 g 被用户 $m(g)$ 使用, 并选择在天线 $v(g)$ 上发送。不妨设 $\sum_{g=0}^{G-1} I\{v(g)=1\} > \frac{G}{2}$, 即天线 1 上的子信道数目过多, 对于天线 2, 可以有同样的算法。其中 $I\{\bullet\}$ 为示性函数, 括号内条件成立时为 1, 否则为 0。

2) 令 $G' = \{g \mid v(g) = 1\}$, $SNR_i^{m(g)}(g) = \left(|h_{1i}^{m(g)}|^2 + |h_{2i}^{m(g)}|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, 分别表示选择天线 1 的子信道以及该子信道在不同天线上发送时的接收信噪比。根据(6)式计算 $c_i^{m(g)}(g) = \{n \mid n = \max \{f_n(SNR_i^{m(g)}(g)) \leq BER_m \& n \in G\}\}$ 。

3) 设 $g' = \arg \min_{g \in G'} \{c_1^{m(g)}(g) - c_2^{m(g)}(g)\}$ 是改变发送天线后容量损失最小的子信道的序号, 将其发送天线改变, 即 $v(g') = 2$, 并令 $G' = G' - \{g'\}$ 。

4) 重复步骤 3, 直到两根天线上的子信道数目相等, 即 $\sum_{g=0}^{G-1} I\{v(g)=1\} = \frac{G}{2}$ 。

以上算法给出了 2 根发送天线的情况, 对于多根发送天线, 也是一样的, 所不同的是需要把所有超过平均信道数的天线上的子信道重新分配到那些不足平均信道数的天线。

算法有三个部分组成, 一是调制方式选择, 对于每个用户都要确定各个子信道上的调制方式, 复杂度是 $O(M \cdot G)$; 二是子信道预分配, 每次分配一个子信道要对用户的相对利用度进行排序, 复杂度是 $O(M \cdot G)$; 三是天线重新分配, 复杂度是 $O(G \times \text{需要交换的子信道数})$ 。如果不进行子载波分块, 复杂度将是 $O(M \cdot K)$, 所以子载波分块可以使复杂度降低 K/G 倍。

5 性能仿真

本节给出联合自适应子信道分配和天线选择算法的性能仿真结果。仿真中采用瑞利衰落模型, 每根天线对之间的路径数目为 3, 系统带宽为 10MHz, 子载波数目 $K=1024$, 子信道数目 $G=16$, 考虑收发各有两根天线的 MIMO 系统。用户数目为 16, 系统给每个用户分配一个子信道。用户的目标误比特率要求为 10^{-2} , 这个误比特率是根据语音业务设计的, 如果目标误比特率更低, 那么频谱效率会下降, 本文以 10^{-2} 误比特率为例进行仿真, 来说明本文算法所带来的性能提高。

图 1 给出各种系统中在不同平均信噪比下自适应子信道分配方法和固定子信道分配方法的频谱效

率比较。可以看出, 采用自适应子信道分配之后, 频谱效率得到明显提高。在平均信噪比大于 15dB 时, MIMO 和 MISO 系统每子载波携带比特数大约提高了 0.5, 而 SISO 系统则有 1 比特左右的增益。这是因为自适应子信道分配实际上隐含了多用户分集思想, 系统给每个子信道选择增益较大的用户, 因而具有较高的接收信噪比和频谱效率。

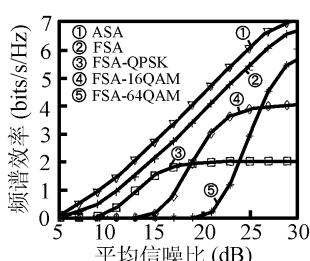


图 2 自适应调制与固定调制方式性能比较

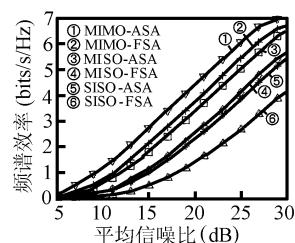


图 1 自适应子信道分配和固定子信道分配性能比较

图 2 比较了采用自适应调制和固定调制方式下 MIMO-OFDM 系统的频谱效率, 发送天线和接收天线均为 2 根, 分别比较了采用固定子信道分配时 QPSK、16QAM、64QAM 系统的频谱效率。可以看出, 将自适应调制技术引入 MIMO-OFDM 系统, 可带来频谱效率的提高。另一方面, 将自适应子信道分配和自适应调制

相结合, 频谱效率的提高更加明显。

图3比较了自适应子信道分配和固定子信道分配方式的中断概率。所谓中断概率指的是用户得到的传输容量小于给定中断门限 a 的概率。从图3可以看出, MIMO和MISO系统由于在发送端采用了发送分集, 接收端的信噪比相对SISO系统大, 可以采用更高阶的调制方式, 因此中断概率低。尤其对于MIMO系统, 接收端采用了接收分集, 中断概率更低。另一方面, 对于MIMO、MISO和SISO系统, 自适应子信道分配方法比固定子信道分配方法具有较低的中断概率, 这是由于自适应子信道分配方法给每个用户分配信道衰落

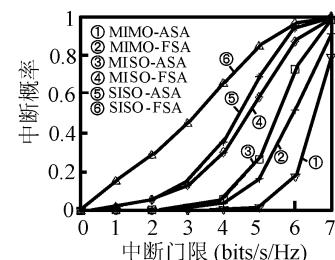


图3 自适应子信道分配和固定子信道分配的中断概率(平均信噪比: 25dB)

较小的子信道, 因此用户具有较高的信道容量。

以上仿真都假设发送端没有进行发送天线选择。图4给出联合自适应子信道分配和天线选择算法性能比较, 发送端对每个子信道在两根发送天线中选择一根进行发送。虽然相对于两根天线发送的系统, 天线选择降低了频谱效率, 但是同时硬件复杂度得以降低, 比如D/A, 放大器等射频单元少了将近一半; 另一方面, 自适应天线选择比固定天线选择方式具有较高的频谱效率。相比于自适应天线选择方案1, 自适应天线选择方案2的频谱效率略低, 但是如果考虑发送端放大器等的非线性因素,

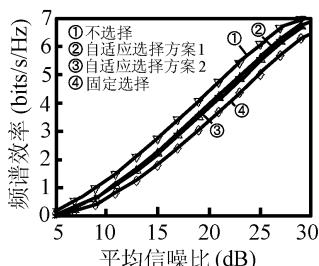


图4 联合自适应子信道分配和天线选择算法性能比较

比如, 某根天线上子载波数目太多使得信号峰平比过大, 那么方案2受到的系统非线性影响比方案1要小。图5给出联合自适应子信道分配和天线选择算法的中断概率比较。从图中可以看出, 两种自适应天线选择方案的中断概率都比固定天线选择低。因此, 自适应天线选择算法可以降低系统复杂度, 同时在频谱效率和中断概率上具有较好的性能。

6 结论

本文研究了多用户MIMO-OFDM系统的自适应调制、自适应子信道分配和天线选择, 提出联合自适应子信道分配和天线选择算法, 并针对三种天线选择方法进行了讨论。仿真结果表明, 本文提出的自适应子信道分配和天线选择算法具有较高的频谱效率和较低的中断概率。

参考文献:

- [1] Gordon L, John R, Steve W, et al. Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(2): 271-294.
- [2] Catreux S, Erceg V, Gesbert D. Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(6): 108-115.
- [3] Zhang Y J, Letaief K B. Optimizing Power and Resource Management for Multiuser MIMO/OFDM Systems [A]. *Proceeding IEEE Globecom'2003* [C]. San Francisco, IEEE. 2003-12. 179-183.
- [4] Pascual-Iserte A, Perez-Neira A I, Lagunas M A. On power allocation strategies for maximum signal to noise and interference ratio in an OFDM-MIMO system [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(3): 808-820.
- [5] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [6] Pietrzyk S, Janssen G J M. Multiuser subcarrier allocation for QoS provision in the OFDMA systems [A]. *Proceeding IEEE VTC'02 Volume 2* [C]. Vancouver: IEEE, 2002. 1077-1081.
- [7] 余官定, 张朝阳, 仇佩亮. 一种自适应正交频分复用系统的子载波分配算法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(9): 1112-1116.
- [8] Teng Y, Nagaosa T, Mori K, et al. Proposal of grouping adaptive modulation method for burst mode OFDM transmission system [J]. *IEICE (Japan) Trans. on Communications*, 2003, E86-B(1): 257-265.
- [9] Cimini L J, Babak D, Sollenberger N R. Clustered OFDM with transmitter diversity and coding [A]. *Proceeding IEEE Globecom'96* [C]. London: IEEE, 1996-11. 703-707.

- [10] Hui S, Katayama M, Yamazato T, et al. An adaptive antenna selection scheme for transmit diversity in OFDM systems [A]. **Proceeding IEEE VTC' 2001 Fall** [C]. Atlantic City; IEEE, 2001-10. 2168-2172.
- [11] Molisch A F, Win M Z. MIMO systems with antenna selection [J]. **IEEE Microwave Magazine**, 2004, 5(1): 46-56.
- [12] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. **IEEE J. Select. Areas Commun.**, 1998, (10): 1451-1458.
- [13] Draft IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S]. **IEEE P802.16-REVd/D5**. 2004-05.

作者简介: 余官定 (1980-), 男, 浙江乐清人, 博士生, 主要研究方向为无线网络中的资源优化分配; 张朝阳 (1973-), 男, 湖北蕲春人, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线通信、宽带接入、无线网络; 来萍 (1981-), 女, 浙江杭州人, 硕士生, 主要研究方向为 MIMO、宽带无线接入; 储珊 (1981-), 女, 浙江杭州人, 硕士生, 主要研究方向为 OFDM、多天线技术; 仇佩亮 (1944-), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为多用户信息论、无线通信等。

Adaptive subchannel allocation and antenna selection in MIMO-OFDM system

YU Guan-ding, ZHANG Zhao-yang, LAI Ping, CHU Shan, QIU Pei-liang

(Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel adaptive subchannel allocation algorithm is proposed for multi-user MIMO-OFDM system. All subcarriers are divided into several subchannels. Then, priority is given to users with lower average channel capacity and subchannel with the highest utilization efficiency is allocated to this user. Thus, a high spectral efficiency is achieved as well as the performance on fairness. In order to deduce the transmitter complexity and the impact caused by non-linearity, we introduce antenna selection into the subchannel allocation algorithm and propose a joint adaptive subchannel allocation and antenna selection algorithm. Simulation results show that the spectral efficiency is improved and the outage probability is decreased in the proposed joint algorithm.

Key words: MIMO-OFDM; adaptive modulation; antenna selection; subchannel allocation

(续第 62 页) (from page 62)

Wiener interpolation methods based on integer wavelet transform

LU Liang, LOU Jian, YU Lu, DONG Jie

(Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on different models, several image interpolating algorithms such as bilinear interpolation, spline interpolation, etc. have been developed. Moreover, due to the property of the similarity between high and low resolution image sub-bands in wavelet domain, it is possible to bring forward a new image interpolating method based on wavelet transform. In this paper, by considering the characteristic of digital image signals and analyzing each sub-band signal in wavelet domain, a Wiener interpolation method based on integer wavelet transform was introduced. We use adaptive filters to train a group of coefficients for interpolating and an integer bi-orthonormal wavelet base to do the inverse transform with interpolated sub-band signals, which can be compatible with image attributes and also reduce the computational complexity. As the experiment results, our method has a higher PSNR and a better subjective quality. Comparing to common used interpolation methods, the average PSNR gain of our method is 2.4dB.

Key words: integer wavelet transform; Wiener filter; image interpolation

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>