第 26 卷第 12 期
2004 年 12 月

电子与信息学报
Journal of Electronics & Information Technology

Vol.26No.12
Dec. 2004

基于 Schmidt 正交化的多天线选择复用 [1]

周 华　　马 敏　　杨大成

(北京邮电大学无线通信中心 北京 100876)

摘 要: 该文从提高信道传输有效性的角度，提出了一种新的多天线选择发送策略——贪婪搜索 (GS) 法，使用这种方法挑选出使容量最大化的发送天线组合作为传输信号的天线. 此法在结合注水 (waterfilling) 法进行天线功率分配的情况下，与理想的全天线注水法相比，可以减小发射机的复杂度，在独立信道下传输容量略有损失，在相关信道下可以提高传输容量，并且所付出的代价是仅需要对信道矩阵进行 Schmidt 正交化变换. 这种方法一般用于信道矩阵列不满秩，即发送端天线数大于接收端天线数，发送端已知信道矩阵的情况 (与注水法结合) 或者接收端已知信道矩阵的情况 (等功率分配) .

关键词: MIMO, 信道容量, Schmidt 正交化, 奇异值分解

中图分类号: TN92　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1009-5896(2004)12-1938-06

Selected Transmission of Multiple Antennas Based on Schmidt Orthogonalization

Zhou Hua　　Ma Min　　Yang Da-cheng

(*Telecomm. Eng. School, Beijing Univ. of Posts and Telecomm., Beijing* 100876, *China*)

Abstract A new selected transmission scheme of multiple antennas is proposed, named Greedy Search (GS) method. The transmit antennas selected from all antennas can be used as the active transmit antennas. When used with waterfilling power allocation, GS method can decrease the complexity of signal design on antennas, compared with Waterfilling power allocation on all Antennas (WA). The capacity loss over WA in independent fading channels is rather small, moreover, this method can get capacity gain over WA in spatial dependent fading channels. The cost of capacity gain of GS is the necessity of Schmidt orthogonalization on the channel matrix. GS can be used when the channel matrix is not column-full-rank, i.e., the number of transmit antennas is greater than that of receive antennas, and the transmitter can get the full channel matrix information (used with waterfilling power allocation); or; the receiver can get the full channel matrix information (used with equal power allocation).

Key words MIMO, Channel capacity, Schmidt orthogonalization, Singular value decomposition

1 引言

多输入多输出系统 (MIMO) 是目前无线通信研究最热门的技术之一，研究表明 [1,2] 在独立衰落信道下，MIMO 系统的容量随发送和接收天线的最小值线性增加。为了充分利用多天线提供的容量，人们开始寻找可以实现多天线传输的收发机结构，从目前的研究方向来看，一种方法是利用多天线达到空间和时间分集增益，从而提高传输质量，文献 [3, 4] 提出了用空间和时间维联合编码 (空时块码 (STBC)[3] 和空时格码 (STTC)[4]) 的方法达到最大的编码和分集增益，STTC 比 STBC 的性能要好得多，但是从实现复杂度来看，STBC 比 STTC 简单。另一种方法是利用多天线来进行空间复用，从而达到高速传输的目的，文献 [5, 6] 提出了对角分层和垂直分层联合发送的方法来达到高速传输，这两种技术分别称为 D-BLAST(Diagonal-Bell Laboratories

[1] 2003-06-15 收到，2003-12-19 改回

Layered Space-Time)[5] 和 V-BLAST(Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time)[6] . 通过仿真表明, V-BLAST 可以达到理论容量的 97% , 但是实现复杂; D-BLAST 只能达到理论容量的 72% , 但是实现简单 [6] . 前面方法 (STBC, STTC 等) 的传输质量比后面方法 (D-BLAST V-BLAST 等) 的高, 但是后者的传输效率比前者高.

在利用多天线进行空间复用时, 如果发送端知道信道信息, 发送端可以在所有的天线进行注水法功率分配 [1] , 这时系统容量要比各天线平均分配功率的容量大得多. 但是, 在所有天线上进行注水法功率分配的缺点是: 即使在信道矩阵条件数很大时也必须使用所有的天线, 这时只有部分天线对信道容量起到空间复用的作用, 而其他天线只是起到空间分集的作用. 众所周知, 空间复用使得容量随天线数增加呈线性增加, 而空间分集使得容量随天线数增加呈对数增加. 为了减小信号设计的复杂度, 同时, 最大限度地利用多天线提供的空间复用增益, 可以根据信道条件在发送端进行天线选择. 在文献 [7–9] 中考虑的天线选择问题, 都是为了减小误比特率, 提高信道传输可靠性. 本文从提高信道容量的角度提出了一种多天线选择发送策略——贪婪搜索 (GS) 法, 这种方法应用于信道矩阵列不满秩, 即发送天线数比接收天线数多, 并且发送端已知信道条件 (与注水法功率分配结合) 或者接收端已知信道条件 (与等功率分配结合) 的情况.

本文结构如下: 第 2 节简单介绍注水法功率分配的原理, 第 3 节引入 GS 法以及它与注水法和平均分配功率法结合的性能, 第 4 节给出结论.

2 注水法功率分配

假设 t 个发送天线, r 个接收天线的平坦慢衰落 MIMO 系统为

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{z} \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{H}$ 为 $r \times t$ 的信道矩阵, 假设 $\boldsymbol{H}$ 的各个元素是相互独立的同分布的复高斯随机变量, $\boldsymbol{x}$ 为发送在各个天线上的信号, 为 $t \times 1$ 的矢量, $\boldsymbol{y}$ 为接收天线上的 $r \times 1$ 的矢量信号, $\boldsymbol{z}$ 为接收天线上的噪声, 为 $r \times 1$ 的列矢量, 假设噪声方差矩阵为 $\boldsymbol{Z}$, 它是 $r \times r$ 的方阵, 不失一般性, 假设 $\boldsymbol{Z}$ 为 $r \times r$ 的单位阵, 同时假设发送天线上的总功率为 P .

在发送端未知信道矩阵的条件下, 最优的功率分配策略是在所有发送天线上进行等功率分配, 这时瞬时信道容量为 [1]

$$C = \log(|\boldsymbol{I}_r + (P/t)\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}|) \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}$ 表示 $\boldsymbol{H}$ 的共轭转置, $\boldsymbol{I}_r$ 为 $r \times r$ 的单位阵, $|\boldsymbol{A}|$ 表示求取方阵 $\boldsymbol{A}$ 的行列式. 容量的单位为 bit/(s·Hz) , 以下的容量均用这个单位.

如果发送端已知信道矩阵信息, 这时容量最大化问题为 [1,10]

$$\text{最大化} \ \log|\boldsymbol{H}\boldsymbol{S}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{I}_r|, \qquad \text{s.t.} \ \ \mathrm{tr}(\boldsymbol{S}) \le P, \quad \boldsymbol{S} \ge 0 \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{S} = E(\boldsymbol{x}\boldsymbol{x}^{\mathrm{H}})$ 为各个发送天线上输入信号的协方差矩阵, 为 $t \times t$ 的方阵, 并且为对称矩阵. $\mathrm{tr}(\boldsymbol{S})$ 表示方阵 $\boldsymbol{S}$ 的迹, $\boldsymbol{S} \ge 0$ 表示它必须为半正定矩阵.

设 $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{B}\boldsymbol{M}^{\mathrm{H}}$ 为 $\boldsymbol{H}$ 的奇异值分解, $\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{M}$ 分别为正交矩阵, $\boldsymbol{B}$ 为奇异值 $\{\sigma_1, \cdots, \sigma_s\}$ 对角矩阵, s 为 $\boldsymbol{H}$ 的秩. 考虑新的变量 $\hat{\boldsymbol{S}} = \boldsymbol{M}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{M}$, 则优化问题变成

$$\text{最大化} \ \log|\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{I}_r|, \qquad \text{s.t.} \ \ \mathrm{tr}(\hat{\boldsymbol{S}}) \le P, \quad \hat{\boldsymbol{S}} \ge 0 \tag{4}$$

显然, 由于 $\boldsymbol{M}$ 为正交矩阵, $\mathrm{tr}(\hat{\boldsymbol{S}}) = \mathrm{tr}(\boldsymbol{S})$. 由 Hadamard 不等式 [11], 得到最大容量为

$$C = \log|\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{I}_r| = \log\left(\prod_{i=1}^{s}(p_i\sigma_i^2 + 1)\right) \tag{5}$$

其中 $\hat{S}$ 为对角矩阵 $\mathrm{diag}\{p_1,\cdots,p_s\}$ 时等式成立，且

$$\left.\begin{array}{l} p_i+1/\sigma_i^2=K, \quad 1/\sigma_i^2<K \\ p_i=0, \quad 1/\sigma_i^2\ge K \\ \Sigma_i p_i=P \end{array}\right\} \tag{6}$$

这种功率分配策略称为注水法功率分配 [1,10]．从上面解的结构来看，为得到最大容量，发送的信号方向必须与信道矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的右奇异矢量方向对应，即 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{M}\hat{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{M}^{-1}$，另外，每个方向上的功率必须按注水法分配。

3 GS 注水法

上述方法的缺点在于即使信道矩阵不是满秩时，由于 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{M}\hat{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{M}^{-1}$，实际每个发送天线仍然要分配功率。为了减小天线的这种低效使用，可以只利用信道矩阵中的部分矩阵，或者部分发送天线，这样可以减小输入天线上信号协方差矩阵的维数，从而减小信号设计的复杂度。

挑选子矩阵可以通过遍历所有可能的 s (信道矩阵的秩) 根天线组合 (称之为遍历搜索)，寻找达到最大容量的发送天线组，但是由于遍历的计算量随天线数的增加而成指数增加，所以必须寻找简单快速的选择方法．首先观察通过注水法得到的信道容量，得到如下命题．

命题 1 注水法得到的容量是信道矩阵奇异值 (非零值) 的平方 $\sigma_j^2, j=1,\cdots,s$ 的增函数．

证明 如果信道矩阵的秩为 s，则由上面的优化表达式 (5)，式 (6)，最大容量可以表示为

$$2^C=\prod_{i=1}^{s}(p_i\sigma_i^2+1)=\prod_{i=1}^{s}(K\sigma_i^2)=\prod_{i=1}^{s}\left\{\left[\left(P+\sum_{i}^{s}1/\sigma_i^2\right)\Big/ s\right]\sigma_i^2\right\} \tag{7}$$

任取 $j\in\{1,\cdots,s\}$，按注水功率分配分别考虑 $p_j\ne 0$ 和 $p_j=0$ 两种情况，若 $p_j\ne 0$，则式 (7) 对 σ_j^2 求导得到：

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial\sigma_j^2}\cdot 2^C\cdot\ln 2&=\left[\left(P+\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{\sigma_i^2}\right)\Big/ s\right]^s\prod_{i=1,i\ne j}^{s}\sigma_i^2+s\left[\left(P+\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{\sigma_i^2}\right)\Big/ s\right]^{s-1}\left(\frac{-1/\sigma_j^4}{s}\right)\prod_{i=1}^{s}\sigma_i^2\\&=\left[\left(P+\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{\sigma_i^2}\right)\Big/ s\right]^{s-1}\left(\prod_{i=1,i\ne j}^{s}\sigma_i^2\right)\left\{\left[\left(P+\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{\sigma_i^2}\right)\Big/ s\right]-\frac{1}{\sigma_j^2}\right\}\end{aligned}$$

从式 (6) 可得，$\left(P+\sum_{i=1}^{s}1/\sigma_i^2\right)/s=K$，并且 $K>1/\sigma_j^2$，所以上式中第 3 项始终大于 0；又由于所有的 σ_j^2 以及 P 大于 0，所以上式大于 0，则容量 C 是 σ_j^2 的增函数．若 $p_j=0$，则由式 (5)，σ_j^2 对容量没有影响．综上所述，容量 C 是信道矩阵奇异值的平方 $\sigma_j^2, j=1,\cdots,s$ 的增函数．

因此一种挑选子矩阵的规则是选择具有最大奇异值排列的子矩阵，即，如果按矩阵的奇异值从大往小排列，则优化规则是寻找奇异值排列具有最小字典序的子矩阵．

矩阵的奇异值有如下性质 [12]：

引理 1 设矩阵 $\boldsymbol{A}\in C^{m\times n}$, $\sigma_1\ge\sigma_2\ge\cdots\ge\sigma_n$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的有序奇异值，则对于 $k=1,\cdots,\min\{m,n\}$，有如下表达式成立：

$$\sigma_k=\min_{\dim\boldsymbol{S}=k-1}\ \max_{x\perp\boldsymbol{S},\|x\|_2=1}\|\boldsymbol{A}x\|_2$$

由这个引理可知，矩阵的最大奇异值必定是通过取 2 范数最大的列得到的，因此，在所有有相同维数的子矩阵中，最大的奇异值必定从包含有 2 范数最大列的矩阵中取得．类似地，在给定

前 $k-1$ 独立矢量的前提下，第 k 个奇异值 (有序的) 是从包含 2 范数最大列 (在这前 $k-1$ 个独立矢量的补空间中正交投影) 的矩阵中取得的，实际上这种正交投影过程就是 Schmidt 正交化过程。因此，根据引理 1 和命题 1，可以设计如下贪心 Schmidt 正交化算法寻找具有最小奇异值字典序的子矩阵。

算法 1

(1) 求出 $\boldsymbol{H}$ 的秩 s。

(2) 令 $\boldsymbol{S}$ 为零空间，把 $\boldsymbol{H}$ 的所有列标记为未处理。

(3) 把所有未处理的列投影到 $\boldsymbol{S}$ 的补空间。

(4) 从所有投影中选择具有最大 2 范数的列。

(5) 把它加入到 $\boldsymbol{S}$ 中，标记这一列已经处理。

(6) 令 $\boldsymbol{S}$ 为所有已处理的列所张的线性空间。

(7) 循环 (3)~(6)，直到解出 s 列，这 s 列表示挑选出来的天线组合。

(8) 然后在选出的 s 根发送天线上进行注水法功率分配。

这种方法称为 GS 注水法。实际上，(1)~(7) 步就是带排序的 Schmidt 正交化过程。显然，GS 注水法比遍历注水法算法简单得多，计算量较小。

从上面的描述可以看出，GS 注水算法的应用前提为发射天线数大于接收天线数 (即信道矩阵列不满秩)，同时需要发送端知道信道矩阵信息，以便进行天线选择和注水法功率分配。对于应用的物理环境，无论是空间独立信道还是相关信道，该算法均可采用。

为了说明 GS 注水法的优越性，首先比较在空间独立信道下的性能，用数值仿真的方法计算了独立信道的 4 发 3 收的 MIMO 系统的各个方案下的容量，得到如图 1 所示的结果。这里假设信道模型为单径平坦瑞利衰落模型，即信道矩阵的各个元素为独立的零均值、方差为 1/2 的复高斯随机变量，信噪比 (SNR) 从 1 dB 到 10 dB，以 0.5 dB 的步长依次增加。对于每个 SNR 值，分别用式 (2) 和式 (5) 计算对应各种方案的信道容量，然后每个点计算 10000 次 (每次的信道矩阵独立产生)，最后各自取平均得到平均容量。图中的遍历搜索法，是通过列出所有发射天线组合 (天线数为信道矩阵秩)，与注水法功率分配结合从中选出信道容量最大的组合。图中的容量为平均容量 (比特 /(秒 · 赫))，表示瞬时容量按信道矩阵取统计平均后可以达到的容量，其他图中的容量均指平均容量。

从图 1 可以看出，由于减少了发射天线数，GS 注水法的信道容量比全天线注水法略小一些，在小 SNR 时差别较小，在 SNR 为 4 dB 时，与全天线注水法的容量相比损失 0.2 bit/(s·Hz)。另外，与遍历搜索注水法相比，GS 注水法带来的容量损失很小，即使是在 SNR 为 10 dB 时，容量损失也仅为 0.1 bit/(s·Hz)。与全天线等功率分配法比较，容量增益很大，在 SNR 为 4 dB 时，前者的容量比后者多 1.8 bit/(s·Hz)。

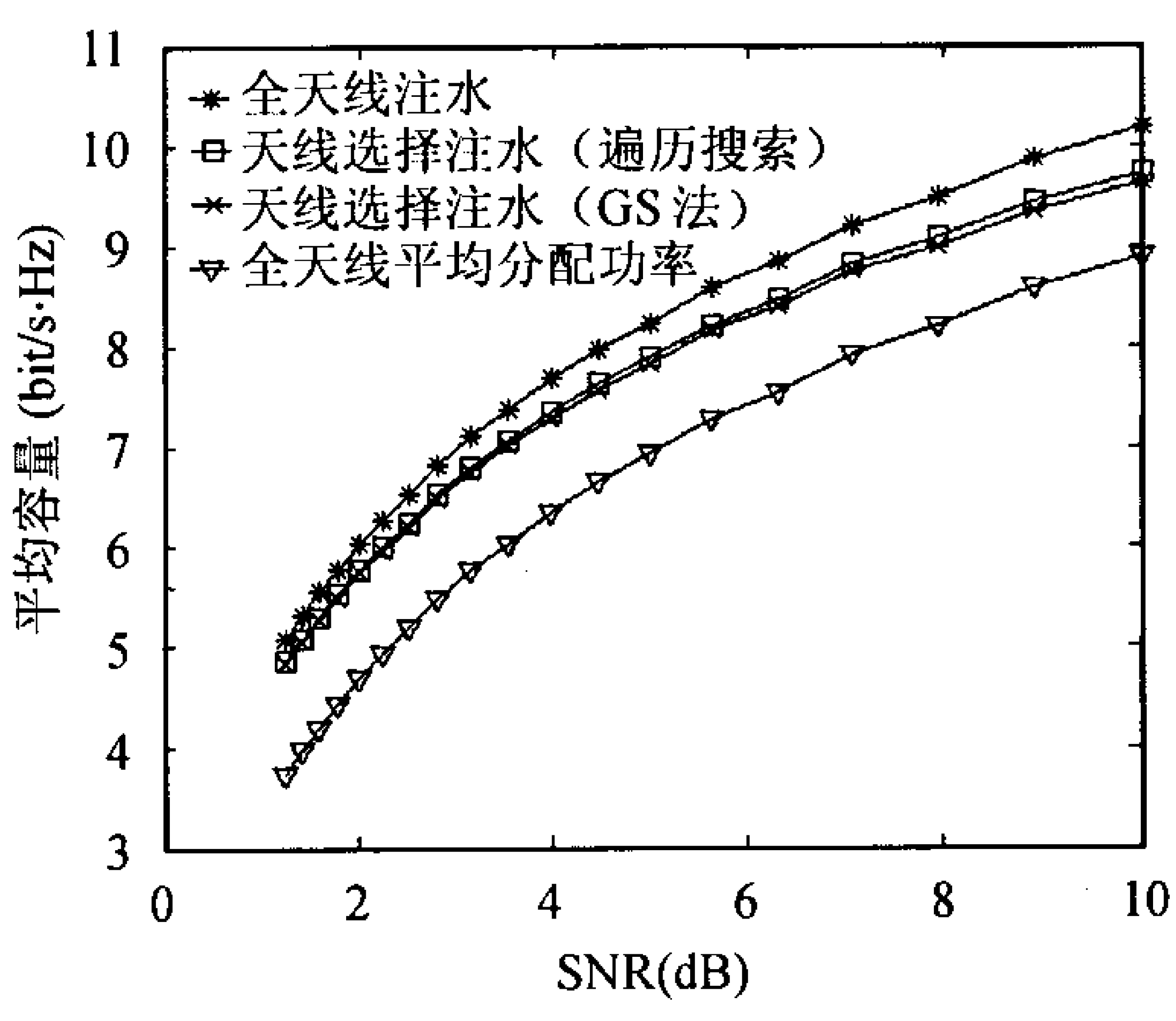

图 1　4 发 3 收的各种发送方式的容量比较 (空间独立信道)

GS 注水法的容量比全天线注水法的容量小的原因是，因为部分矩阵的奇异值与原始矩阵的奇异值有如下关系 [12]:

引理 2 设 $\boldsymbol{A} \in C^{m\times n}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的有序奇异值，用 $\boldsymbol{A}_r$ 表示从 $\boldsymbol{A}$ 中删去 r 列而得到的子矩阵，并用 $\hat{\sigma}_1 \geq \hat{\sigma}_2 \geq \cdots$ 表示 $\boldsymbol{A}_r$ 的奇异值，则

$$\sigma_k \geq \hat{\sigma}_k \geq \sigma_{k+r}, \quad k = 1, \cdots, \min\{m, n\}$$

即子矩阵的每个奇异值不大于对应的原始矩阵的奇异值，又因为矩阵的 2 范数等于该矩阵的所有非零奇异值的平方和的正平方根 [13]，且子矩阵的 2 范数小于原始矩阵的 2 范数，所以子矩阵的奇异值不会都等于原始矩阵的对应的奇异值，则由命题 1 可知 GS 注水法的容量比全天线注水法的容量小。

由于注水法功率分配需要发射端已知信道信息，这是非常困难的，所以大多数实际方案采用等功率分配策略。下面分析 GS 法在这种情况下的性能。利用所有天线的容量见式 (2)；考虑选择发送的情况，如果信道矩阵的秩为 s，从所有发送天线中选择 s 个天线，使得信道容量最大的方法可以是最优的遍历法 (计算所有发射天线组合的信道容量，然后取最大的组合)，也可以采用次优的 GS 法 (采用前面给出的 GS 算法时，因为第 (8) 步是进行注水处理，所以只需执行算法 1 的 (1)~(7) 步，然后在选出来的天线上按式 (2) 计算信道容量)。显然，遍历搜索的计算量太大，随天线数的增加成指数增长； GS 法运算量较小。通过比较独立信道 4 发 3 收的系统得到图 2(容量仿真方法与图 1 相同)。从图 2 可以看出，在小 SNR 时， GS 等功率分配法与全天线等功率分配法的信道容量差别不大，在 SNR 为 4 dB 时，前者比后者的容量高 0.1 bit/(s·Hz)；在 SNR 为 10 dB 时，前者比后者的容量高 0.3 bit/(s·Hz)。并且采用次优的 GS 法与最优的遍历法的结果差别不大，在 SNR 为 10 dB 时，前者相对于后者的容量损失仅为 0.2 bit/(s·Hz)，说明了 GS 法同样适用于等功率分配的情况。

在实际的传输环境中，各个天线间信道不一定满足空间独立，大多数情况下都有一定的相关性。对于空间相关信道，采用文献 [14, 15] 中的空间相关模型，信道矩阵等效为 $\tilde{\boldsymbol{H}} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{a}$，其中 $\tilde{\boldsymbol{H}} = [h_{11}\ \ h_{21}\ \cdots\ h_{N1}\ \ h_{12}\ \ h_{22}\ \cdots\ h_n]^{\mathrm{T}}_{rt\times 1}$，$\boldsymbol{C}$ 是 $rt \times rt$ 的空间相关矩阵，由发送端相关矩阵 $\boldsymbol{R}^{Tx}$ 和接收端相关矩阵 $\boldsymbol{R}^{Rx}$ 的 Kronecker 积做 Cholesky 分解得到，即 $\boldsymbol{R}^{Tx} \otimes \boldsymbol{R}^{Rx} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}$，其中 $\otimes$ 表示 Kronecker 积。$\boldsymbol{R}^{Rx}$ 与接收端到达角 (AOA) 的角度扩展、接收天线阵列的间隔等有关，$\boldsymbol{R}^{Tx}$ 与发送端离开角 (AOD) 的角度扩展、发送天线阵列的间隔等有关。$\boldsymbol{a} = [a_1\ \ a_2\ \cdots\ a_n]^{\mathrm{T}}_{rt\times 1}$ 中的每一个 a_i 都是独立同分布的瑞利衰落。图 3 仿真了相关信道下的全天线注水法和 GS 注水法的性能，这里假设了发送端 AOD 的角度扩展为 5°，发送天线间隔为 5 个波长，接收端 AOA 的角度扩展为 30°，接收天线间隔为 0.5 个波长，空间相关信道矩阵按上述要求产生，同时矩阵的各个元素为零矩阵、方差为 1/2 的复高斯随机变量，采用单径平坦衰落信道模型，其他计

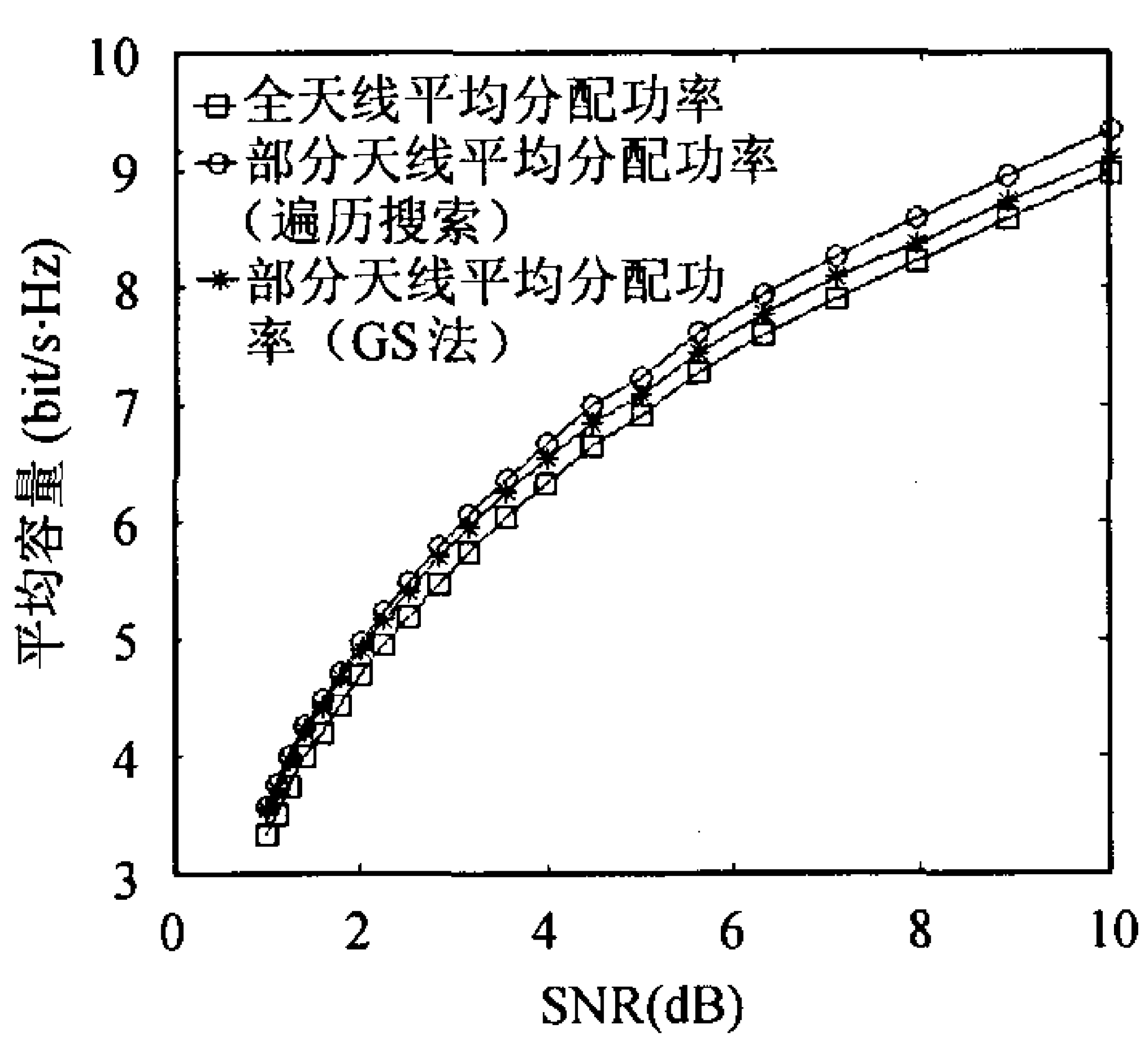

图 2 平均分配功率与选择天线平均分配功率(遍历搜索和 GS 搜索) 的比较 (空间独立信道)

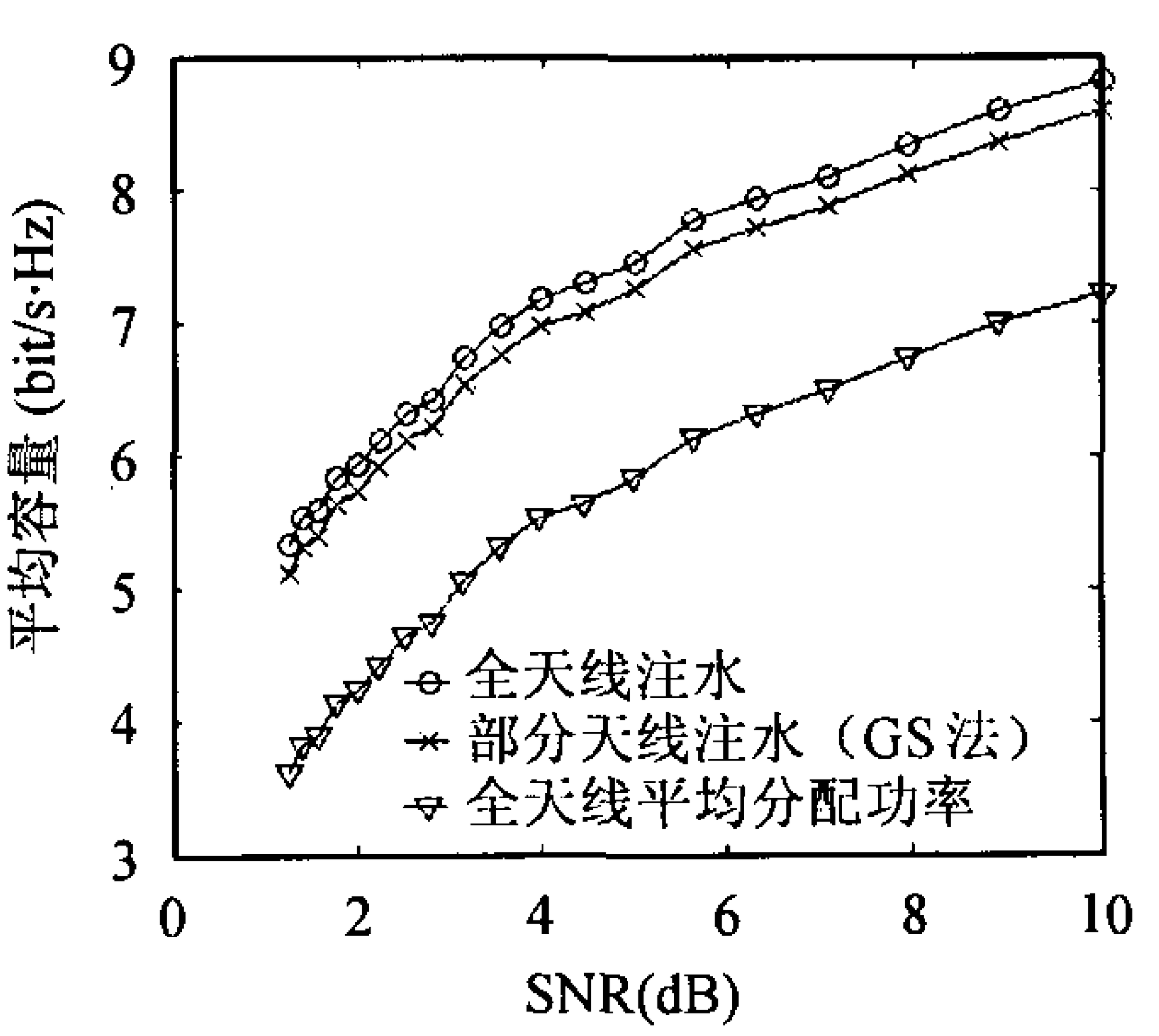

图 3 4 发 3 收的各种发送方式的容量比较(空间相关信道)

算方法同图 1 。从图中可以看出，采用 GS 注水法相比全天线注水法的容量损失不大，在 SNR 为 4 dB 时容量损失为 0.2 bit/(s·Hz) 。另外，与图 1 中的独立信道相比，相关信道下全天线等功率分配法的容量比全天线注水法的容量要小更多，这充分说明在信道具有相关性的情况下采用注水法的必要性。

4 结论

本文从提高信道传输有效性的角度，提出了一种新的多天线选择发送策略— GS 法，挑选出使容量最大化的部分发送天线组合作为传送天线。此法在结合注水法 (waterfilling) 进行天线功率分配的情况下，与理想的全天线注水法相比，可以减小发射机的复杂度，所付出的代价是需要对信道矩阵进行 Schmidt 正交变换的计算。此法一般用于信道矩阵列不满秩，即发送天线数大于接收天线数，且发送端能够确知当前信道条件的情况。如果不结合注水法功率分配，可以应用在发送端未知信道矩阵的情况，这时接收端需要已知信道矩阵，然后按 GS 把挑选结果反馈给基站。

参　考　文　献

[1] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. Tech. Rep., AT&T Bell Laboratories Internal Technical Memorandum 1995, published in the European Transactions on Telecommunications, Nov/Dec 1999.

[2] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311–335.

[3] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1998, IT-44(2): 744–765.

[4] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time block code from orthogonal designs. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1999, IT-45(4): 1456–1467.

[5] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Tech. J.*, 1996, 1(2): 41–59.

[6] Foschini G J, Golden G, Valenzuela R, Wolniansky P. Simplified processing for high spectral efficiency wireless communcation employing multi-element arrays. *IEEE Journal on Selected Areas in Communcations*, 1999, 17(11): 1841–1852.

[7] Gore D, Heath R, Paulraj A. Statistical antenna selection for spatial multiplexing systems. ICC 2002, 04/28/2002–05/02/2002, New York, USA, 2002, vol.1: 450–454.

[8] Gore D A, Heath R W, Paulraj A J. Transmit selection in spatial multiplexing systems. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(11): 491–493.

[9] Heath R W, Sandhu Jr, Paulraj A. Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers. *IEEE Communications Letters*, 2001, 5(4): 142–144.

[10] Wei Yu, Wonjong Rhee, Stephen Boyd, Cioffi John M. Iterative waterfilling for Gaussian vector multiple access channels. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2003, IT-22(5): 937–948.

[11] Cover Th M, Thomas J A. Elements of Information Theory, New York, John Wiley& Sons, Inc. 1991: 502–503.

[12] 陈景良，陈向晖．特殊矩阵．北京：清华大学出版社， 2000: 328–335.

[13] 张贤达．信号处理中的线性代数．北京：科学出版社， 1997: 166–167.

[14] Stege M, Jelitto J, Stege M, *et al.*. A multiple input-multiple output channel model for simulation of TX-and RX-diversity wireless system. IEEE VTC2000'fall, USA, 2000: 833–839.

[15] Pedersen K I, Andersen J B. A stochastic multiple-input-multiple-output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms. IEEE VTC2000'fall, USA, 2000: 8933–897.

周　华：　男， 1973 年生，博士生，研究兴趣： MIMO 、多用户信息论、目前研究矢量广播信道的容量以及资源分配算法．

马　敏：　女， 1979 年生，硕士生，研究兴趣： MIMO(Blast, Space-Time Coding), 目前研究 Turbo 码和 Blast 的结合算法．

杨大成：　男， 1951 年生，教授，博士生导师，北京邮电大学电信学院无线中心主任，研究方向： 3G 及 4G 通信中的关键技术．