

几种多天线系统的信道容量比较

王 艺, 赵 明, 周世东, 姚 彦

(清华大学微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 分布式天线、智能天线和扇区天线是三种能大大提高无线通信系统容量的技术, 本文比较了这三种多天线系统的信道(Shannon)容量. 假设每个用户在所有接收天线上的总功率相等, 分析表明分布式天线和扇区天线的信道容量远大于智能天线的信道容量, 而传统的观点认为智能天线在抑制干扰时要比扇区天线的性能更好, 从而获得更大的系统容量. 另外我们分析了分布式天线在渐近条件下的信道容量, 即用户数 K 和载波数 M 都趋近无穷大, 而保证 K/M 一定. 分析表明在 K 较大时, 分布式天线与扇区天线的信道容量差趋近常数 0.44 比特/秒/维, 但是如果考虑分布式天线的分集增益, 那么分布式天线的信道容量要远大于扇区天线.

关键词: 分布式天线; 智能天线; 扇区天线; 信道容量

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0787-04

Channel Capacity Comparison of Several Multiple Antennas Systems

WANG Yi, ZHAO Ming, ZHOU Shi-dong, YAO Yan

(Key State Lab on Microwave & Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Distributed antenna, smart antenna and sector antenna are three techniques to improve the system capacity in wireless communication. In this paper, we compare the channel/Shannon capacity of multiple antennas in the three cases. Assuming the average received signal power in total antennas from each user is the same, we get that distributed antenna and sector antenna have much larger Shannon capacity than smart antenna. This is in contrast with that smart antenna has a better performance than sector antenna in suppressing interference, which results in an improvement in system capacity. We also analyze the capacity of distributed antenna in unlimited case, that is, with large number of users K and large number antennas M while keeping the number of users per dimension constant. Analysis show that in case of large K , $M \gg 1$, the capacity of distributed antenna approaches to that of sector antenna with a constant addition 0.44 bit/s/Hz/Dim. It should be noted that if diversity gain by distributed antenna is considered, its capacity is still much larger than that of sector antenna.

Key words: smart antenna; distributed antenna; sector antenna; channel capacity

1 引言

无线通信是目前国内外广泛研究的课题, 由于无线频谱资源有限, 因此如何提高频谱效率或者如何增加容量是当前研究的核心问题. 在过去二十多年的相关研究成果中^[1], 多天线是一项最为重要的技术.

在无线通信中多天线主要包括三类. 第一类是扇区天线, 即将空间固定划分为几个相等角度扇区, 每个扇区的信号互不干扰. 第二类是智能天线^[3], 它能实时地跟踪有效信号同时最大地抑制其它方向上的干扰, 要求天线阵元之间的距离小于半波长, 以便每个阵元上的信号完全相关. 以上两类多天线技术主要利用了信号在空间传播的方向性, 属于空间滤波的范畴, 业已证明智能天线比扇区天线能更好地抑制干扰.

第三类是分布式天线, 即天线阵元间隔很大, 每个阵元上

的接收信号可以认为是相互独立. 由于信道特性可以得到很大的改善^[2], 所以最初目的是为了高天线覆盖的范围. 另一种分布式天线的研究思路是基于多入多出(MIMO)的信道模型分析信道容量. 文献[4~7]分别研究了 Rayleigh 衰落信道下多天线收发的多用户信道容量, 而文献[8,9]给出了有干扰情况下空分多址的信道容量下界.

由于系统容量往往与具体的实现有关, 为了避免这些问题, 本文从信道容量的角度比较这三类多天线系统的容量.

2 信号模型

考虑有 M 个接收天线和 K 个用户同时接入的多天线系统, 不妨设信道为平坦 Rayleigh 衰落信道, 那么接收信号可以表示为

$$y = \sqrt{P}Hx + z \quad (1)$$

其中 $y = [y_1 \dots y_M]^T$ 是多天线上的接收信号矢量, $x = [x_1 \dots x_K]^T$ 是发送信号, 满足 $xx^H = I_K$, $H = [h_{m,k}]_{M \times K}$ 是复高斯信道矩阵, 且 $E\{h_{m,k}\} = 0$. 不妨设每个用户在所有天线上的接收功率和为一常数 P , $z = [z_1 \dots z_M]^T$ 是复高斯噪声, 满足 $E\{z\} = 0$, $\text{var}\{z\} = E\{zz^H\} = 2I_M$. 另外记 $\gamma = P/2$ 表示平均的接收信号干扰比 (SNR).

2.1 分布式天线

在分布式天线系统中, 每个阵元要求距离足够大以便各自的接收信号相互独立, 为了比较方便, 假设小区半径远远大于阵元之间的间隔, 以致于所有信道 $h_{m,k}$, $m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K$ 都服从相同的概率分布, 不妨设各信道服从以下复高斯分布

$$h_{m,k} \sim N(0, 1/\sqrt{2M}) + jN(0, 1/\sqrt{2M}) \quad (2)$$

其中 $N(0, 1)$ 表示零均值、单位功率的高斯分布.

2.2 智能天线

智能天线与分布式天线最根本的差别是前者要求间距不大于半波长, 各阵元的接收信号除了相位差以外完全相同, 因此用户 k 到天线 m 的信道可以表示为

$$h_{m,k} = e^{j f_m(\theta_k)} \quad (3)$$

其中 θ_k 是用户 k 的信号到达方向, $f_m(\theta_k)$ 是信号到达阵元 m 时产生的相位差, θ_k 是零均值复高斯随机变量, 方差为 $1/M$. 注意不同的天线形状会得到不同的 $f_m(\theta_k)$ ^[3]. 记 $F = [e^{j f_m(\theta_k)}]_{m=1:M, k=1:K}$, $w = \text{diag}(1, \dots, K)$, 那么信道矩阵 H 可以写成

$$H = FW \quad (4)$$

其中 θ_k 服从 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布.

2.3 扇区天线

扇区天线将空间划分为 M 个独立空间, 每个扇区的角度等于 $2\pi/M$, 各扇区间的接收信号相互独立. 为分析方便, 不妨设各扇区的用户数为 K/M , 这样我们就只需要考虑某一个扇区的平均信道容量, 信道矩阵可以表示为

$$h = [h_1 \dots h_{K/M}]^T \quad (5)$$

其中 h_i 是零均值、单位功率的复高斯随机变量. 由于在扇区天线系统中各扇区独立接收, 因此信道变成了多入单出 (MISO) 模型, 接收信号也变为 $y = h^T x + z$, 其中 y, z 是一个标量.

3 信道容量

对于一个通用的 MIMO 信道模型, 如式 (1), 信道容量受以下条件约束^[5,6]限制:

$$\begin{aligned} R_k &\leq I(x_k; y | (x_i), i = 1, \dots, k) \\ R_i + R_j &\leq I((x_i, x_j); Y | (x_k), k = 1, \dots, j) \\ &\dots \\ \sum_{i=1}^K R_i &\leq I((x_1, \dots, x_K); y) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $I(x; y)$ 表示 x 与 y 之间的互信息, $I(x; y | z)$ 表示已知 z 的条件下 x 与 y 之间的互信息. 本文假设信道信息完全已知, 那么式 (1) 的信道容量为^[4]

$$C = \frac{1}{M} \log \det [I_M + \gamma H H^H] \quad (7)$$

其中 $\det [A]$ 表示矩阵 A 的行列式, 对数的省略下标为 2. 所以信道容量单位为 bit/s/Hz/Dim, 一根天线表示一维. 由于 H 是随机变量矩阵, 因此平均的信道容量应当是 $\bar{C} = E_H\{C\}$, 即在 H 上做统计平均. 根据以上结果, 那么分布式天线和智能天线的平均信道容量可以分别表示为

$$\bar{C}_{DA} = \frac{1}{M} E_H \log \det [I_M + \gamma H H^H] \quad (8)$$

$$\bar{C}_{SMA} = \frac{1}{M} E_H E_w \log \det [I_M + \gamma F W W^H F^H] \quad (9)$$

由于扇区天线的信道变成了 MISO 模型, 因此平均信道容量变成了

$$\bar{C}_{SEA} = E_h \log \left(1 + \sum_{k=1}^{K/M} \gamma |h_k|^2 \right) \quad (10)$$

由于式 (8) ~ (10) 很难求出显式解, 因此我们将在下节通过计算机仿真得到.

4 仿真结果

为了得到信道容量与各参数的关系, 我们在做 1000 次计算, 然后统计平均, 智能天线采用线阵结构, 因为这是最经典的结构之一.

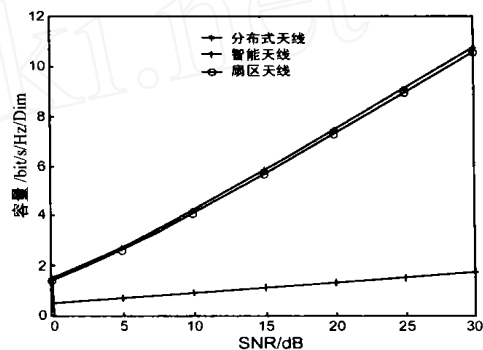


图 1 信道容量与 SNR 的关系

考虑信道容量与 SNR 的关系, 设 $M = 8, K = 16$, 图 1 给出了相应的曲线. 结果表明平均信道容量与 SNR 几乎成线性关系, 但是分布式天线和扇区天线的斜率要大于智能天线的斜率, 也就是说, SNR 越大, 那么分布式天线与智能天线之间的容量差越大. 而扇区天线的信道容量接近分布式天线, 其差别较小.

5 渐近条件下的信道容量

我们从式 (8) 开始推导渐近条件下的信道容量, 设 $\lambda_i, i = 1, \dots, M$ 是矩阵 $G = H H^H$ 的特征值, 那么式 (8) 可以改写为

$$\bar{C}_{DA} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E \{ \log(1 + \gamma \lambda_m) \} \quad (11)$$

记 $\rho = K/M$ 表示每个天线上的平均用户数, 如果 $K < M \Leftrightarrow \rho < 1$, 那么系统称作欠饱和状态; 当 $K = M$ 时, 称为饱和状态; 当 $K > M \Leftrightarrow \rho > 1$ 时, 称为过饱和状态. 在不同状态下的信道累积容量可以写成^[8,9]

$$C_{\text{sum}} = \begin{cases} M \cdot Q(1/\rho, \gamma), & \geq 1, \text{过饱和状态} \\ K \cdot Q(\rho, \gamma), & > 1, \text{欠饱和状态} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{其中 } Q(\nu, \gamma) = \log w + \frac{1}{2} \log \left(\frac{1}{1-\nu} \right) - \frac{\nu}{2} \quad (13)$$

$$w = w(\nu, \gamma) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\gamma} + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)^2 - 4} \right] \quad (14)$$

$$\nu = \nu(\nu, \gamma) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\gamma} - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)^2 - 4} \right] \quad (15)$$

在以上的推导结果中,用到了以下约束条件

$$\text{过饱和状态: } \sum_{k=1}^K E |h_{m,k}|^2 = 1 \quad (16a)$$

$$\text{欠饱和状态: } \sum_{m=1}^M E |h_{m,k}|^2 = 1 \quad (16b)$$

这等效于对 $\frac{1}{K} H_0 H_0^H$ 或者 $\frac{1}{M} H_0 H_0^H$ 的功率进行归一化, H_0 的每个元素是零均值单位功率随机变量,显然以上的结果不便于与其它多天线容量的比较.不过利用以上结论,并用 ν 替换式(12)中的 γ ,可以得到分布式天线在渐近条件下的平均信道容量

$$C_{DIA} = \begin{cases} Q(1/\nu, \gamma), & \gamma \geq 1, \text{过饱和状态} \\ Q(\nu, \gamma), & \gamma < 1, \text{欠饱和状态} \end{cases} \quad (17)$$

进一步,考虑高信噪比的情况,即 $\gamma \gg 1$,忽略其中的最小项那么上式可以简化为

$$C_{DIA} \begin{cases} \log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) + (1-\nu) \log \frac{1}{1-\nu}, & \gamma < 1 \\ \log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) + (1-\nu) \log \frac{1}{1-\nu} - 1, & \gamma \geq 1 \end{cases} \quad (18)$$

如果过载比较严重,即 $\gamma \gg 1$,那么上式还可以简化为

$$C_{DIA} = \log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) + 0.44, \quad \gamma \gg 1, \quad \gamma \gg 1 \quad (19)$$

其中用到了以下等式

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (x-1) \log \frac{x}{x-1} = \log e$$

由式(19)可以看出,分布式天线的渐近信道容量基本与 $\log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)$ 的对数成线性关系.

下面考虑扇区天线的渐近信道容量,由于 $h_i, i=1, \dots, K$ 服从相同的概率分布,当 $\gamma \gg 1$ 时,容易得到

$$\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \bar{C}_{SEA} = \log(1 + \frac{1}{\gamma}) \quad (20)$$

比较式(19)和(20),可以看到在渐近条件下分布式天线总是比扇区天线的容量大,在高信噪比、严重过饱和状态下,两者的差别趋近一个常数 $0.44 \text{ bit/s/Hz/Dim}$.

图 2 给出了分布式天线和扇区天线的渐近信道容量,图中曲线是根据式(17)和(20)得到的.由图可以看出,随着 γ 增大分布式天线和扇区天线的渐近信道容量差别越来越接近常数 $0.44 \text{ bit/s/Hz/Dim}$,说明了式(20)的有效性,即两者的容量在过饱和情况下基本上与 $\log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)$ 的对数成线性关系.虽然以上的分析表明分布式天线与扇区天线的信道容量差别不大,但是值得注意的是我们没有考虑分布式天线有分集功率,也就是说实际情况中,分布式天线要有 M 倍的分集增益,而这是扇区天线所没有的.如果考虑信道特性的改善等,那么分布式天线的信道容量将远大于扇区天线.

由于智能天线的渐近信道容量很难用显式表达出来,我们通过加大 M 和 K 值进行计算机仿真.图 3 给出了智能天线和分布式天线的渐近信道容量,同样分布式天线的容量由式(17)给出.

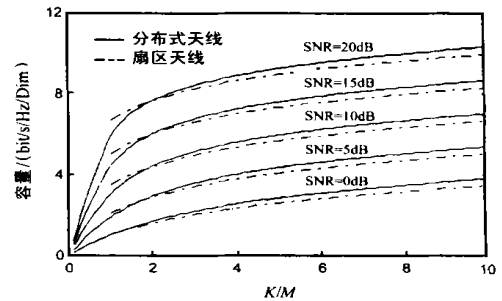


图 2 分布式天线和扇区天线的渐近信道容量

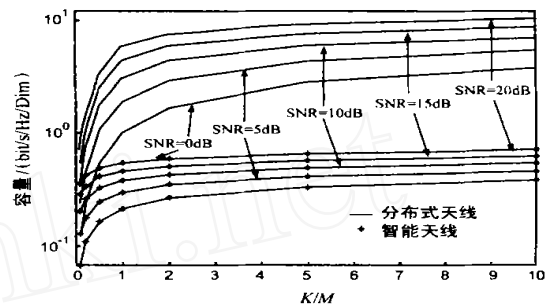


图 3 分布式天线和扇区天线的渐近容量

由图可以看出,在不同的 SNR 条件下智能天线的渐近信道容量都远小于分布式天线,几乎相差一个数量级,而且在 $\gamma \gg 1$ 时智能天线容量的斜率几乎为零,增长速率很小,说明智能天线不是增加信道容量的有效方法.

6 结论

本文从信息论的角度研究了分布式天线、扇区天线和智能天线的平均信道容量,假设信道为平坦 Rayleigh 信道,每个用户到达所有接收天线的信号功率总和一定,分析和仿真表明分布式天线的信道容量最大,扇区天线的容量略小于分布式天线,但是远远大于智能天线的信道容量.我们还分析了在渐近条件下三者的信道容量,结果表明当 $\gamma \gg 1$ 时,分布式天线与扇区天线的容量差接近常数 $0.44 \text{ bit/s/Hz/Dim}$,而且与 $\log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)$ 的对数成线性关系.另外,分布式天线与智能天线的渐近容量几乎相差一个数量级,因此智能天线并不是一种能有效增加信道容量的技术.如果考虑天线的分集增益等其它因素,那么扇区天线的信道容量也远小于分布式天线.因此分布式天线是最佳的提高信道容量的技术.

参考文献:

[1] Proakis J. G. Digital Communications, 3rd Edition [M]. New York:McGrawHill, 1995.
 [2] Saleh A M, Rustako A J Jr, Roman R S. Distributed antennas for indoor radio communications [J]. IEEE Trans on Commun, 1987, COM-35 (12):1245 - 1251.

- [3] Special issue on smart antennas [J]. IEEE Personal Commun. 1998, 5 (1) :1 - 98.
- [4] Foschini GJ, Gans MJ. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(2) :311 - 335.
- [5] Hanly S V, Whiting P A. Information-theoretic capacity of multi-receiver networks [J]. Telecomm Systems, 1993, 1(1) :1 - 42.
- [6] Hanly S V. Capacity and power control in spread spectrum macrodiversity radio networks [J]. IEEE Trans on Commun, 1996, 44(2) :247 - 256.
- [7] Telatar E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channel [R]. AT&T Bell Labs Tech Memo, 1995.
- [8] Rapajic P B, Popescu D. Information capacity of a random signature multiple-input multiple-output channel [J]. IEEE Trans on Commun, 2000, 48(8) :1245 - 1248.
- [9] Rapajic P B. Information capacity of the space division multiple access mobile communication system [J]. Wireless Personal Communications, 1999, 11(1) :131 - 159.

作者简介:



王 艺 男, 1973 年 10 月出生于湖北荆州, 1994 年在北京航空航天大学获学士学位, 1997 年和 2000 年在北京邮电大学分别获得硕士学位和博士学位, 现为清华大学微波与数字通信重点实验室博士后, 目前主要研究新一代无线通信系统、多天线、多用户检测、现代信号处理。



赵 明 男, 1971 年 10 月出生于甘肃兰州, 1993 年在清华大学获得学士学位, 1998 年在清华大学电子工程系获得博士学位, 现为清华大学电子工程系讲师, 专业特长为无线个人通信系统的理论与技术, 已经发表论文 20 多篇, 目前的主要研究方向为: 新一代无线通信系统、软件无线电、无线及个人通信技术。



周世东 男, 1969 年 12 月出生于江苏南京, 清华大学电子工程系副教授, 1991 年毕业于东南大学, 1994 年在东南大学和硕士学位, 1997 年在清华大学获博士学位, 在国内外发表多篇论文, 目前的主要研究领域为移动通信、扩频通信、编码与调制及接收算法。

WWW.CNKI.NET