

文章编号: 1007-5321(2008)06-0117-04

天线方向性对 MIMO 系统信道容量影响

李莉, 肖丽华, 王华芝

(北京邮电大学 电信工程学院, 北京 100876)

摘要: 探讨三维空间散射环境中, Kronecker 信道模型下天线方向性对空间衰落相关性和信噪比的影响, 仿真研究均匀圆阵、线阵、矩形阵的多输入多输出系统信道容量。综合性给出天线方向性对信道容量的影响, 即当定向天线主瓣对准来波时, 定向天线方向性引起的信噪比增加超过了其相关系数对容量的负面影响, 从而使信道容量整体优于全向天线。天线单元方向性越强, 信道容量越大。

关键词: 天线方向性; 空间衰落相关性; 信道容量; 多输入多输出

中图分类号: TN820; TN92

文献标识码: A

Effect of Antenna Directivity on the Channel Capacity of MIMO Systems

LI Li, XIAO Li-hua, WANG Hua-zhi

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The effect of antenna directivity on both spatial fading correlation and signal-to-noise ratio based on Kronecker channel model is investigated in three dimensional scattering environments. The channel capacity of multiple-in multiple-out system for uniform circular array, line array, and rectangle array is studied. The contribution of antenna directivity to channel capacity is concluded that, when the main lobe of directive antenna points at the coming wave, the improved signal to noise ratio (SNR) resulting from the antenna directivity will exceed the negative impact caused by increased spatial fading correlation, leading to a better channel capacity than that of isotropic antenna. The stronger antenna directivity is, the greater the channel capacity.

Key words: antenna directivity; spatial fading correlation; channel capacity; multiple-in multiple-out

多输入多输出(MIMO)技术的信道容量与空间衰落相关性(SFC, spatial fading correlation)和接收端信噪比密切相关。SFC和信噪比与天线阵周围散射环境以及天线物理结构有关。研究发射和接收端采用何种天线单元和阵列形式使SFC最小、信噪比最大,进而取得系统容量最大增益具有重要意义。可采用抽象散射模型、测量、统计分析模型等方法来讨论天线物理结构对MIMO系统性能的影响。由于基于统计的Kronecker信道模型^[1-2]直接探讨空间衰落相关性对系统性能的影响而被广泛使用。文

献[1]讨论了各种阵列情况下的SFC和容量,但只考虑了点源的情况,未探讨天线方向性对MIMO系统容量的贡献。文献[2]比较了矩形阵排布下全向天线和偶极子天线的SFC和容量,但却假定两者信噪比相同,只考虑了天线方向性对SFC的单一影响,未考虑其对信噪比的影响,这与实际情况不完全相符。

本文基于Kronecker信道模型同时比较了点源和偶极子在均匀圆阵、线阵、矩形阵下的空间衰落相关系数,首次对不同方向图下的接收信噪比进行修

收稿日期: 2008-05-01

作者简介: 李莉(1966—),女,副教授,硕士生导师;肖丽华(1982—),女,硕士生, E-mail: lihuaxiao1982@yahoo.com.cn.

正,在同时考虑天线方向性对信噪比和 SFC 影响下综合讨论信道容量. 对 MIMO 系统天线单元及阵列合理设计具有现实意义.

1 不同方向图下空间衰落相关特性

SFC 与阵列的空间响应矢量^[1]、天线场强归一化方向图及空间来波分布有关. 图 1 所示分别为圆阵(UCA)、线阵(ULA)、矩形阵(URA)排列方式与空间来波方向关系图. 为简化阵列分析,假设阵元之间不考虑耦合, L 为天线数目,天线间距相等且均为 d , φ 为入射在阵列上的水平达波角, θ 为垂直达波角.

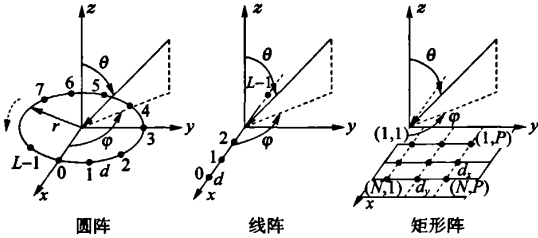


图1 阵列排列方式与空间来波方向关系图

1) 圆阵排列方式的天线响应矢量^[1]为

$$a(\theta, \varphi)_{UCA} = [e^{j\zeta \cos(\varphi - \Psi_0)}, e^{j\zeta \cos(\varphi - \Psi_1)}, \dots, e^{j\zeta \cos(\varphi - \Psi_{L-1})}]^T \quad (1)$$

其中, $\Psi_l = 2\pi l/L$, $l = 0, 1, \dots, L-1$ 为第 l 个天线阵元的方位角; $\zeta = k_w r \sin(\theta)$, k_w 为波数.

2) 线阵排列方式的天线响应矢量为

$$a(\theta, \varphi)_{ULA} = [1, e^{jk_w d \cos \varphi \sin \theta}, \dots, e^{jk_w d(L-1) \cos \varphi \sin \theta}]^T \quad (2)$$

3) 矩形阵排列方式的天线响应矢量为

$$a(\theta, \varphi)_{URA} = \text{vec}(a_N(u) a_P^T(v)) = [1, e^{ju}, \dots, e^{j(P-1)v}, e^{ju}, e^{j(u+v)}, \dots, e^{j[u+(P-1)v]}, \dots, e^{j(N-1)u}, \dots, e^{j[(N-1)u+(P-1)v]}]^T \quad (3)$$

N, P 分别为 x, y 方向的天线数目, 这里设

$$\begin{aligned} d_x &= d_y = d \\ a_N(u) &= [1, e^{ju}, \dots, e^{j(N-1)u}]^T, \\ u &= k_w d_x \cos \varphi \sin \theta \\ a_P(v) &= [1, e^{jv}, \dots, e^{j(P-1)v}]^T, \\ v &= k_w d_y \sin \varphi \sin \theta \end{aligned}$$

对于 3 种排列方式, 任意 2 根天线 m 和 n 间的 SFC 经数值积分为^[1-2]

$$\rho = \frac{\int_{\varphi_0 - \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} \int_{\theta_0 - \Delta\theta}^{\theta_0 + \Delta\theta} E_m(\theta, \varphi) E_n^*(\theta, \varphi) p(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}{\sqrt{\int_{\varphi_0 - \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} \int_{\theta_0 - \Delta\theta}^{\theta_0 + \Delta\theta} |E_m(\theta, \varphi)|^2 p(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi} \times \frac{1}{\sqrt{\int_{\varphi_0 - \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} \int_{\theta_0 - \Delta\theta}^{\theta_0 + \Delta\theta} |E_n(\theta, \varphi)|^2 p(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}} \quad (4)$$

其中, E 为天线归一化场强方向性函数与天线响应矢量的乘积. $p(\theta, \varphi)$ 为入射信号功率角谱概率密度函数, 并假设入射信号的角能量为均匀分布, $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\theta$ 分别为水平、垂直角度扩展. 由式(4)可得各天线阵列收发两端空间衰落相关矩阵.

2 天线信噪比修正

文献[2]未考虑天线方向性对信噪比的影响, 假定两者信噪比相同, 这与实际情况不完全相符.

设各天线处于相同的环境下, 均为垂直极化且极化匹配, 达波角在空间某个角域均匀分布, 则当波束从某个方向过来时, 天线在该方向接收的功率为 $P_r(\theta, \varphi) = S_e S$, 其中 S 为入射电磁波功率密度, S_e 为有效接收面积. S 与功率角谱的概率密度函数 $p(\theta, \varphi)$ 的关系为

$$S = \frac{p(\theta, \varphi)}{r^2} \quad (5)$$

S_e 与 (θ, φ) 方向的方向性系数有关

$$S_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} D(\theta, \varphi) \eta_A = \frac{\lambda^2}{4\pi} DF^2(\theta, \varphi) \eta_A \quad (6)$$

其中 D 为天线在最大辐射方向的方向性系数; $F(\theta, \varphi)$ 为归一化场强方向性函数; η_A 为天线效率, 故有

$$P_r(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} DF^2(\theta, \varphi) \eta_A \frac{p(\theta, \varphi)}{r^2} \quad (7)$$

若点源接收信噪比为 $R_{sn,1}$, 定向天线信噪比为 $R_{sn,2}$, 则两者关系为

$$\frac{R_{sn,2}}{R_{sn,1}} = \frac{P_{r2}/n_2}{P_{r1}/n_1} \quad (8)$$

若点源和定向天线接收噪声、天线效率相同, 则

$$\frac{R_{sn,2}}{R_{sn,1}} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = DF^2(\theta, \varphi) \quad (9)$$

即入射电磁波功率密度相同时, 定向天线与全向天线信噪比比值取决于定向天线归一化场强方向性函数及方向性系数 D , 且当定向天线主瓣对准来波

时,定向天线与全向天线信噪比比值最大。

3 MIMO 系统模型

假设 MIMO 系统收发两端天线数目分别为 N_r, N_t , 信道为准静态平坦 Rayleigh 衰落信道, 接收端已知信道信息, 发射端未知。发射信号总功率与发射天线数无关。发射端采用等功率发射, 则 MIMO 系统的信道容量可表示为^[3]

$$C = \text{lb} \left(\det \left[I + \frac{\xi}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] \right) \quad (10)$$

其中, ξ 为接收端平均信噪比; $N = \min(N_r, N_t)$; \mathbf{H} 为信道矩阵, 根据 Kronecker 模型将信道矩阵 \mathbf{H} 分解, 且只考虑接收衰落相关, 有

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{U} \quad (11)$$

其中, \mathbf{R} 为 $N_r \times N_r$ 接收相关矩阵; \mathbf{U} 的元素是均值为 0、方差为 1 的独立复高斯随机变量, 则式(10)变为

$$C = \text{lb} \left(\det \left[I + \frac{\xi}{N} \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{U} \mathbf{U}^H (\mathbf{R}^{1/2})^H \right] \right) \quad (12)$$

由式(4)和式(9)分别得到空间衰落相关矩阵及信噪比后, 可得不同方向图下的容量。

4 仿真结果

收发两端天线阵元数为 4, 假设发射端天线为点源, 接收端为不同的全向或定向天线。

4.1 各阵列点源与偶极子空间相关系数比较

UCA 和 ULA 均选取天线 0 和天线 1, URA 选取天线(1,1)和(2,2)。由于边射、端射方向对 ULA 性能差异很大, 对 UCA 和 URA 无影响, 故设来波方向为端射, 即 $\theta_0 = 90^\circ$, $\varphi_0 = 90^\circ$ 。

图 2~图 4 所示分别为不同角度扩展下接收衰落相关系数与天线间距的关系。可见, SFC 随天线间距扩大而震荡减小。ULA 下的 SFC 具有多个零点(除图 2 所示情况外), 第 1 个零点在 0.5 波长稍右侧。UCA 和 URA 没有零点。由图 2 和图 3 可知, $\Delta\varphi$ 对 SFC 的影响比 $\Delta\theta$ 大, 在相同天线间距下图 3 所示的 SFC 明显比图 2 所示的 SFC 小。

$\Delta\theta \neq 0^\circ$ 时有偶极子 SFC 大于点源 SFC, 这归因于点源能接收到全空间不同方向的达波, 而偶极子只能吸收一定方向的达波, 故偶极子的 SFC 大。当 $\Delta\theta = 0^\circ$ 时, 偶极子点源相关系数重合, 这归因于水平面上偶极子与点源有相同的方向图。

从阵列角度分析, $\Delta\varphi = 0^\circ$ 时, ULA 的 SFC 为 1, 远大于 UCA 和 URA 的 SFC, $\Delta\varphi \neq 0^\circ$, ULA 相关

系数最小。可见, 在窄巷、地铁、隧道等水平扩展较小的环境中不适宜使用线阵。

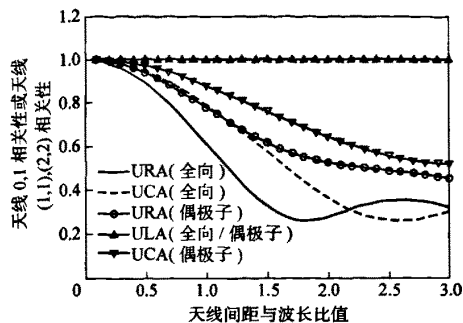


图 2 ULA/UCA/URA 的 SFC 在 $\Delta\varphi = 0^\circ$ 和 $\Delta\theta = 60^\circ$ 下随天线间距的变化曲线

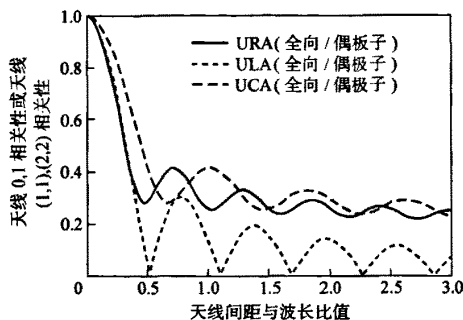


图 3 ULA/UCA/URA 的 SFC 在 $\Delta\varphi = 60^\circ$ 和 $\Delta\theta = 0^\circ$ 下随天线间距的变化曲线

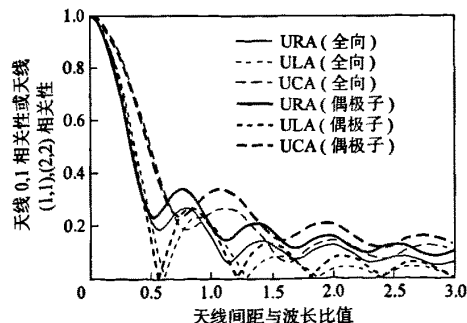


图 4 ULA/UCA/URA 的 SFC 在 $\Delta\varphi = 60^\circ$, $\Delta\theta = 60^\circ$ 下随天线间距变化曲线

4.2 信噪比修正后点源与偶极子容量比较

设不同天线接收的噪声相同, 点源信噪比为 20 dB, 其他的天线根据其方向性系数以及场强方向性函数对信噪比进行修正。这里设 $\Delta\varphi = 0^\circ$, $\Delta\theta = 45^\circ$ 。

图 5、图 6 所示为不同来波方向相同角度扩展下平均容量与天线间距的关系。

图 5 中偶极子主瓣对准来波, 3 种阵列下均有

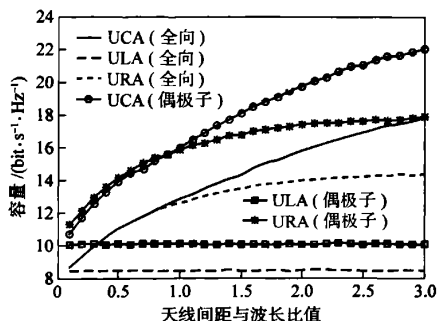


图 5 ULA/UCA/URA 的容量在 $\theta_0 = 90^\circ$ 、 $\varphi_0 = 90^\circ$ 下随天线间距的变化曲线

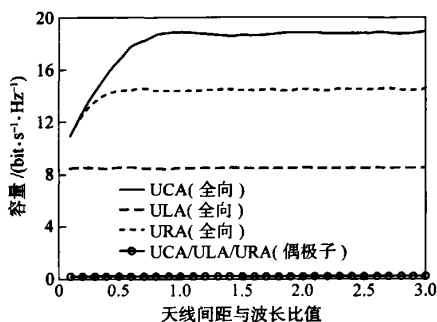


图 6 ULA/UCA/URA 的容量在 $\theta_0 = 10^\circ$ 、 $\varphi_0 = 90^\circ$ 下随天线间距的变化曲线

偶极子下容量大于点源下容量。图 6 中偶极子主瓣偏离来波,与图 5 相比较偶极子下容量明显下降,且远小于点源下容量。这是因为若天线效率及接收噪声相同,当偶极子主瓣对准来波时,由于天线方向性,使其接收的功率比点源接收的功率大,信噪比高,虽然其 SFC 大于点源的 SFC,但其信噪比对容量增大的贡献远远大于其相关系数对容量减小的贡献。

从阵列角度看,某方向图下,图 5、图 6 有容量排序 $\text{UCA} > \text{URA} > \text{ULA}$,由 4.1 节知 $\Delta\varphi = 0^\circ$ 时 ULA 的 SFC 为 1,而 SFC 越大,MIMO 系统容量越小,故这里线阵容量最小。在 $\Delta\varphi \neq 0^\circ$,端射方向下,由 4.1 节知有线阵 SFC 最小,经仿真有容量排序 $\text{ULA} > \text{UCA} > \text{URA}$,限于篇幅不再列出仿真图。

4.3 天线方向性对阵列容量的影响

假设点源信噪比为 20 dB,将点源、偶极子方向图、 $\sin^3\theta$ 方向图(理论假设)这 3 种方向图做比较。3 种方向图波束宽度依次减小,方向性系数依次增强。

图 7 所示为 $\theta_0 = 90^\circ$, $\varphi_0 = 90^\circ$, $\Delta\varphi = 0^\circ$, $\Delta\theta = 45^\circ$ 下 3 种方向图在各阵列形式下的容量比较。天线主瓣对准来波,对各阵列均有方向性越强,容量越

大的特性。

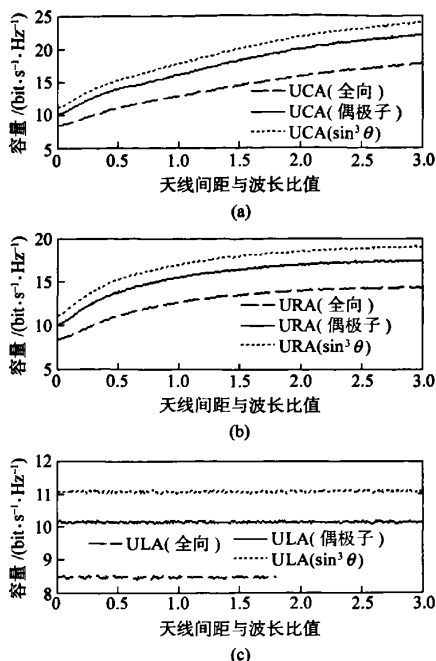


图 7 3 种方向图在各阵列形式下容量比较

5 结束语

结合天线阵列形式和方向图讨论了 MIMO 系统性能,在同时考虑天线方向性对信噪比和 SFC 的影响下讨论了各阵列下的信道容量。仿真结果表明,当定向天线主瓣对准来波时,定向天线方向性引起的信噪比超过其相关系数对容量的负面影响,从而使信道容量整体优于全向天线。天线单元方向性越强,信道容量越大。在端射方向、存在水平扩展的环境中,线阵容量大于圆阵容量或矩形阵容量。在无水平扩展时,圆阵、矩形阵、线阵容量依次递减。

参考文献:

- [1] Yong S K, Thompson J S. Three dimensional spatial fading correlation models for compact MIMO receivers[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2005, 4(6): 2856-2869.
- [2] Raj J S K, Prabu A S, Vikram N, et al. Spatial correlation and MIMO capacity of uniform rectangular dipole arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7): 97-100.
- [3] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communication, 1998, 6(3): 311-335.

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，一直致力和专注于微波、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>