

一种基于随机散射簇的非平稳3D空间信道模型

张薇^{*①} 段京京^{①②} 王岩松^③

^①(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

^②(中兴通讯股份有限公司上海研究中心 上海 200120)

^③(国家无线电监测中心哈尔滨监测站 哈尔滨 150010)

摘要: 针对大规模MIMO信道的近场效应和非平稳特性, 该文提出适用大规模MIMO信道的一种基于随机散射簇的非平稳3D空间信道模型。采用抛物波前代替球面波前建模近场效应, 并分析抛物波前条件下该模型的信道容量。对于大规模MIMO信道的非平稳特性, 提出基于散射簇的有效概率确定收发天线阵元的有效散射簇集合, 从而建模散射簇沿天线阵列轴的随机演变来合理描述散射簇的出现和消失。仿真结果表明, 用抛物波前和有效散射簇的随机演变来建模大规模MIMO信道特征是很好的候选方法。

关键词: 大规模MIMO信道; 抛物波前; 非平稳特性; 有效散射簇

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2301-08

DOI: [10.11999/JEIT170929](https://doi.org/10.11999/JEIT170929)

A Non-stationary 3D Spatial Channel Model Based on Stochastic Scattering Cluster

ZHANG Wei^① DUAN Jingjing^{①②} WANG Yansong^③

^①(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

^②(ZTE Corporation Shanghai Research Center, Shanghai 200120, China)

^③(Harbin Monitoring Station, National Radio Monitoring Center, Harbin 150010, China)

Abstract: To describe the near field effect and the non-stationary characteristic of the Massive MIMO channel, a non-stationary 3D spatial channel model based on stochastic scattering clusters for Massive MIMO systems is proposed. The parabolic wave instead of the spherical wave is used to model the near field effect, and the channel capacity of the model is analyzed under parabolic wavefront condition. For non-stationary properties of massive MIMO channel, the effective scattering clusters set of transmitting and receiving antenna elements is determined based on the effective probability of scattering clusters, and the stochastic evolution of scattering clusters along the antenna array axis is modeled to describe properly the appearance and disappearance of scattering clusters. Simulation results demonstrate that parabolic wavefront and the stochastic evolution of effective scattering clusters are good candidates to model Massive MIMO channel characteristics.

Key words: Massive MIMO channel; Parabolic Wavefront; Non-stationary property; Effective scattering cluster

1 引言

随着物联网的兴起和移动互联网业务种类的日渐丰富, 人们对蜂窝移动通信数据传输速率以及服

务质量提出了更高的要求。为了满足用户持续增长的数据速率和业务需求, 未来第5代移动通信系统(5G)将实现更大的网络容量、更快的传输速率及更高的频谱利用率^[1]。传统MIMO技术已不能满足呈指数增长的无线数据需求, 一些学者提出了新一代增强型MIMO技术, 即大规模MIMO技术。大规模MIMO系统在基站端配有庞大数目的天线, 较传统MIMO系统中的4(或8)根天线数增加一个量级以上。理论上天线越多, 频谱效率和传输可靠性就会越高。大规模MIMO已引起了国内外的广泛关注, 并成为5G最有潜力的无线传输技术之一。

收稿日期: 2017-10-09; 改回日期: 2018-06-26; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 张薇 zhangwei@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671167), 黑龙江省自然科学基金(F2017003)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671167), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (F2017003)

信道建模是通过数学分析模型来表征传播环境的地理特征,进而准确刻画无线信号的传播机制,是评估无线技术的最有效手段之一。近年来,对大规模MIMO信道测量与建模已经开展起来^[2],相对于传统的MIMO信道,大规模MIMO信道呈现出一些全新的特征^[3]。文献^[4,5]中给出的测量结果表明散射体或用户可能位于大规模阵列的近场区域中,即存在近场效应,远场平面波前假设传播条件不再满足,需考虑球面波前建模;信道能量往往集中在有限的空间方向上,不同的阵列天线所对应的传播环境是变化的,这导致阵列轴的每一天线可能观测到不同的散射体,即大规模MIMO信道呈现非平稳特性。

关于大规模MIMO信道建模工作已经取得一些显著进展^[6]。目前为止,国内外学者提出的信道建模方法基本可以划分为两大类:基于生灭过程的建模方法^[7,8]和基于散射簇可视区域的建模方法^[5,9]。前者用生灭过程建模散射簇沿阵列轴方向的消失和出现,以此描述散射簇的非平稳特性,同时用球面波前建模近场效应;后者则定义了每一个散射簇在大规模天线阵列轴上对应的可视区域,其中一些散射簇的可视区域范围是整个阵列轴,而另外一些散射簇的可视区域范围则仅是阵列轴的一部分。

基于生灭过程的建模方法需要同时建模散射簇的出现和消失,每次信道更新都需要遍历整个阵列轴才能确定每个天线阵元的散射簇集合,而且直接应用球面波前也导致信道模型的计算复杂度进一步增加。基于散射簇可视区域信道模型则需要为每个散射簇确定可视区域的大小,而且初期研究仅限于2D平面,尚无法准确描述3D散射传播环境。对于准确度高、复杂度低的大规模MIMO信道模型仍处于探索之中。

本文在3GPP 3D MIMO模型研究基础上^[10],提出一种基于随机散射簇的非平稳3D空间信道模型。首先,引入有效散射簇和散射簇的有效概率两个概念,将收发天线对之间无线链路所经历的散射簇定义为该天线对的有效散射簇,同时定义散射簇能够被经历的概率为散射簇的有效概率,该概率由散射簇空间位置携带的信道信息决定。并以此为基础,通过建模有效散射簇沿阵列轴的随机演变来描述大规模MIMO信道的非平稳特性。其次,为进一步降低计算复杂度,在3D模型中引入球面波前的2阶近似——抛物波前^[11]来建模近场效应,并分析了抛物波前条件下的平均信道容量。最后,推导并仿真分析了该模型的统计特性,即信道的空间相关函数、多普勒频率标准差和阵列轴的信道强度。

2 基于随机散射簇的非平稳3D空间信道模型

一个大规模MIMO系统,由发送端 M_t 根天线和接收端 M_r 根天线组成,仅考虑发送端为阵元间距为 δ_t 均匀线性大规模天线阵列,接收端是一个天线阵元间隔为 δ_r 线性阵列。第 $u(u=1,2,\dots,M_r)$ 根接收天线与第 $s(s=1,2,\dots,M_t)$ 根发送天线组成一对收发无线通信链路,实际通信链路经历的无线传播空间描述为许多不同散射路径。3GPP 3D空间信道模型建立了3维传播场景,场景中天线阵元对应的散射簇数固定,不能表征大规模MIMO信道的非平稳特性。而本文以3维空间散射簇为研究基础,建立一个基于随机散射簇的非平稳3D信道模型结构,如图1所示。模型中设有 N 个散射簇,每个散射簇含有 M 条散射路径,图中发送端天线与接收端天线之间的实线是可视链路,虚线则表示不可视链路。如果散射簇在发射端和接收端都为可视链路,则称其为“严格可视”,实际上只有“严格可视”散射簇在信道系数的生成过程中才是“有效的”。散射簇 $n(n=1,2,\dots,N)$ 是指模型中的第 n 个散射簇。假设时刻 t 无线场景中可观测的散射簇集为 $G(t)$,则每一收发天线对的无线链路 (u,s) 所经历有效散射簇集为 $C_{us}(t) \subseteq G(t)$ 。需要注意的是 (x_G, y_G, z_G) 坐标轴建立的是全局坐标系,而计算3维空间中的天线方向场图时需要的是本地坐标系。表1列出了模型中参数含义。

2.1 信道的脉冲响应

理论宽带MIMO信道可以表示为一个 $M_r \times M_t$ 复矩阵 $\mathbf{H}(t, \tau) = [h_{us}(t, \tau)]_{M_r \times M_t}$,信道脉冲响应为

$$h_{us}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N h_{us,n}(t) \delta(\tau - \tau_n) \quad (1)$$

其中,时延 τ_n 与散射簇 n 中散射多径分量有关。

如果散射簇 n 不是天线对 (u,s) 经历的有效散射

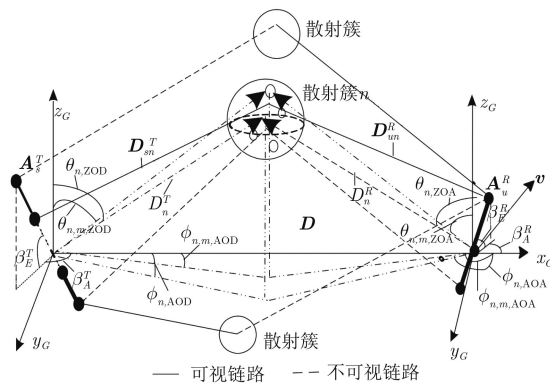


图1 基于随机散射簇的非平稳3D空间信道模型结构

表1 非平稳3D空间信道模型的主要几何参数定义

参数	定义
β_E^R, β_E^T	接收天线和发送天线的俯仰角
β_A^R, β_A^T	接收天线和发送天线的方位角
$\theta_{n,ZOA}, \phi_{n,AOA}$	散射簇 n 的俯仰和方位到达角
$\theta_{n,ZOD}, \phi_{n,AOD}$	散射簇 n 的俯仰和方位离开角
$\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}$	散射簇 n 经第 m 散射子径的俯仰和方位到达角
$\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}$	散射簇 n 经第 m 散射子径的俯仰和方位离开角
D_n^R, D_n^T	散射簇 n 和接收(发送)天线阵列轴中心的距离矢量
A_u^R, A_s^T	接收天线阵元 u 和发送天线阵元 s 的位置矢量
D_{un}^R, D_{sn}^T	散射簇 n 和接收天线阵元 u (发送天线阵元 s)的距离矢量
$D_{un,m}^R, D_{sn,m}^T$	散射簇 n 和接收天线阵元 u (发送天线阵元 s)经第 m 子径的距离矢量
$f_{un,m}$	散射簇 n 和接收天线阵元 u 之间经第 m 子径的多普勒频率
v	接收天线阵列的速度矢量

簇, $h_{us,n}(t)=0$; 如果散射簇 n 是天线对 (u, s) 经历的有效散射簇, 则有

$$h_{us,n}(t) = \sqrt{\frac{P_n}{M}} \sum_{m=1}^M \exp(2\pi f_{un,m}t + \varphi_{us,n,m}) \quad (2)$$

其中, M 是散射簇 n 中不可分辨的散射路径数, N 是总散射簇数, P_n 是散射簇 n 的功率, $f_{un,m}$ 是散射簇 n 中子径 m 的多普勒频移, $\varphi_{us,n,m}$ 为每一子径的传播距离导致相位变化量, $f_{un,m}$ 和 $\varphi_{us,n,m}$ 计算为

$$f_{un,m} = \frac{f_{\max} \langle D_{un,m}^R, v \rangle}{\|D_{un,m}^R\| \|v\|} \quad (3)$$

$$\varphi_{us,n,m} = \varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} [\|D_{un,m}^R\| + \|D_{sn,m}^T\|] \quad (4)$$

其中, φ_0 为初始相位, λ 为载波波长。

表1中列出了主要的几何参数, 天线的位置矢量 A_u^R 和 A_s^T 可以表示为

$$A_u^R = \frac{M_r - 2u + 1}{2} \delta_r \begin{bmatrix} \sin \beta_E^R \cos \beta_A^R \\ \sin \beta_E^R \sin \beta_A^R \\ \cos \beta_E^R \end{bmatrix} + D \quad (5)$$

$$A_s^T = \frac{M_t - 2s + 1}{2} \delta_t \begin{bmatrix} \sin \beta_E^T \cos \beta_A^T \\ \sin \beta_E^T \sin \beta_A^T \\ \cos \beta_E^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $D=[D, 0, 0]$ 为收发天线间的直视距离矢量, 散射簇 n 的第 m 条散射路径到接收端天线和发送端天线中心距离矢量分别为

$$D_{n,m}^R = D_n^R \begin{bmatrix} \sin \theta_{n,m,ZOA} \cos \phi_{n,m,AOA} \\ \sin \theta_{n,m,ZOA} \sin \phi_{n,m,AOA} \\ \cos \theta_{n,m,ZOA} \end{bmatrix} + D \quad (7)$$

$$D_{n,m}^T = D_n^T \begin{bmatrix} \sin \theta_{n,m,ZOD} \cos \phi_{n,m,AOD} \\ \sin \theta_{n,m,ZOD} \sin \phi_{n,m,AOD} \\ \cos \theta_{n,m,ZOD} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 $D_n^T = \|D_n^T\|$, 和 $D_n^R = \|D_n^R\|$, D_n^T 和 D_n^R 分别是散射簇 n 到接收端天线和发送端天线中心距离矢量, 而 $D_{un,m}^R$ 和 $D_{sn,m}^T$ 可以计算为

$$D_{un,m}^R = D_{n,m}^R - A_u^R \quad (9)$$

$$D_{sn,m}^T = D_{n,m}^T - A_s^T \quad (10)$$

2.2 抛物波前

天线阵列的远场区和近场区以瑞利距离 $R = 2L^2/\lambda$ (其中 $L = (M - 1)\delta$ 是天线阵列的最大尺寸, λ 是载波波长)为界。随着天线数目 M 的增加, 瑞利距离增大, 天线阵列的近场范围也随之扩大, 散射体或用户可能位于大规模阵列的近场区域之中。近场效应会导致各接收阵元的到达角随天线阵元位置变化而发生偏移, 到达角偏移需要根据发射端, 接收端和散射簇之间的几何关系, 通过球面波前假设进行描述^[6], 因此近场效应也可以看作大规模MIMO信道非平稳特性的原因之一。

球面波前假设条件下对散射路径的计算十分繁琐。一种可行的方法是采用球面波前的2阶近似, 即抛物波前来简化散射簇与阵列天线端口的理论散射路径计算。其物理意义在于, 将阵列轴天线端的球面波前建模为曲面, 而不是平面^[12]。这种近似将导致散射路径角度沿阵列轴线性变化, 降低了球面波前的计算复杂性。散射簇 n 与第 s 根发送端阵列天线的空间距离由余弦定理得到

$$\|D_{sn}^T\|^2 = \|D_n^T\|^2 + (M_t - 2s + 1)^2 (\delta_t/2)^2 - (M_t - 2s + 1)\delta_t \|D_n^T\| \cos(\alpha_n) \quad (11)$$

其中, 天线位置矢量与散射簇位置矢量的空间夹角为

$$\alpha_n = \arccos \left(\frac{\langle \mathbf{D}_n^T, \mathbf{A}_s^T \rangle}{\|\mathbf{D}_n^T\| \|\mathbf{A}_s^T\|} \right) \quad (12)$$

对于远场条件, 满足 $\|\mathbf{D}_n^T\| \gg (M_t - 1)\delta_t$, 球面波前可以看作平面波前, 式(11)近似表示为

$$\|\mathbf{D}_{sn}^T\| \approx \|\mathbf{D}_n^T\| - (M_t - 2s + 1)(\delta_t/2) \cos(\alpha_n) \quad (13)$$

在近场条件下, 上述近似就不合理了, 由此引入阵列附近的球面波前的2阶近似为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{D}_{sn}^T\| \approx & \|\mathbf{D}_n^T\| - (M_t - 2s + 1)(\delta_t/2) \cos(\alpha_n) \\ & + [(M_t - 2s + 1)(\delta_t/2)]^2 \frac{\sin^2(\alpha_n)}{2\|\mathbf{D}_n^T\|} \end{aligned} \quad (14)$$

可以看出, 式(14)中前两项与式(13)相同, 代表平面波近似; 而2次项代表球面波前的2阶近似, 即抛物波前, 当满足远场条件时此2次项将去掉。

2.3 有效散射簇沿阵列轴的随机演变

在2.1节所提模型中, 仅有效散射簇对信道才是有用的, 散射簇的有效概率与其空间位置有关。也就是说, 散射簇的空间位置携带的信道信息决定了散射簇有效概率的大小。假设3D信道模型中散射簇 n 的位置球坐标为 (r_n, θ_n, ϕ_n) , 分别考虑3维坐标对散射簇 n 有效概率影响。如果散射簇 n 的空间距离 r_n 、方位角 ϕ_n 和俯仰角 θ_n 3个变量相互独立, 那么有效概率可表示为

$$P_{n,\text{ef}} = g_1(\theta_n)g_2(\phi_n)g_3(r_n), \quad 0 \leq P_{n,\text{ef}} \leq 1 \quad (15)$$

其中, 散射簇的方位角取值范围 $\phi_n \in [0, 2\pi]$, 俯仰角为 $\theta_n \in [0, \pi]$ 。

散射路径功率角度分布描述了散射簇功率随角度的变化。一般信号功率主要集中在角度均值附近, 表示发送信号的主要传播方向。因为角度均值附近的散射路径对应的散射簇有效概率也会较大, 所以采用功率角度分布函数来计算散射簇关于角度参量的有效性。散射体功率角度分布一般有高斯分布、均匀分布、拉普拉斯分布及Von Mises分布^[12]。Von Mises分布被证明在描述非各向同性散射情况下的角度分布是成功的。参考这个分布函数, $g_1(\theta_n)$ 和 $g_2(\phi_n)$ 可以进一步表示为

$$\begin{aligned} g_1(\theta_n) = & \exp(\kappa_\theta \cos(\theta_n - \theta_0)) / [2\pi I_0(\kappa_\theta)], \\ & 0 \leq g_1(\theta_n) \leq 1 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \rho_{us,u's',n}(\delta_t, \delta_r; t) = & \exp[\kappa_\theta \cos(\theta_{n,\text{ZOD}} - \bar{\theta}) + \kappa_\phi \cos(\phi_{n,\text{AOD}} - \bar{\phi}) + k_r D_n^T / D] / [4\pi^2 I_0(\kappa_\theta) I_0(\kappa_\phi)] \\ & \cdot \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} e^{j\Phi_1} p_R(\theta_{n,\text{ZOA}}, \phi_{n,\text{AOA}}) p_T(\theta_{n,\text{ZOD}}, \phi_{n,\text{AOD}}) d\theta_{n,\text{ZOA}} d\phi_{n,\text{AOA}} d\theta_{n,\text{ZOD}} d\phi_{n,\text{AOD}} \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $\Phi_1 = 2\pi f_{u'n}t - 2\pi f_{un}t + \varphi_{u's',n} - \varphi_{us,n}$ 。

$$\begin{aligned} g_2(\phi_n) = & \exp(\kappa_\phi \cos(\phi_n - \phi_0)) / [2\pi I_0(\kappa_\phi)], \\ & 0 \leq g_2(\phi_n) \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

其中, κ_θ 和 κ_ϕ 分别是与俯仰角和方位角有关的独立环境参数, 用于衡量场景中散射簇在俯仰角和方位角均值附近的扩散程度。 θ_0 和 ϕ_0 分别是散射簇俯仰角和方位角的均值, $I_0(\cdot)$ 是修正贝塞尔函数。

远离发送端的散射簇更容易被离发送端近的散射簇阻挡而无法产生反射路径, 因此模型中散射簇随距离发送端远近不同而以不同的概率产生反射路径, 且一个有效散射簇产生一条反射路径, 由此定义 $g_3(r_n)$ 为

$$g_3(r_n) = \exp(k_r(r_n/D)) \quad (18)$$

其中, k_r 为距离有关的环境参数且取值小于零, D 为收发天线间的直视距离。

最终, 基于所有散射簇的有效概率, 每一对收发天线阵元将随机获得自己的一组有效散射簇集合。有效散射簇沿阵列轴的随机变化描述了大规模MIMO信道的非平稳特性。需要指出的是, 所提建模方法中假设散射簇有效概率对天线阵列中所有阵元来说是相同的, 每对收发阵元获得有效散射簇的数量均值也是相同的。

3 大规模MIMO理论信道模型的统计特性及信道容量

3.1 空间交叉相关函数

这里根据文献[13]定义 $h_{us,n}(t)$ 和 $h_{u's',n}(t)$ 信道系数之间的空时相关函数为

$$\begin{aligned} \rho_{us,u's',n}(\delta_T, \delta_R, \tau; t) = & E \left[\frac{h_{us,n}^*(t) h_{u's',n}(t+\tau)}{|h_{us,n}^*(t)| |h_{u's',n}(t+\tau)|} \right] \\ = & E \left[\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{j\Phi_0} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\Phi_0 = 2\pi f_{u'n,m}(t+\tau) - 2\pi f_{un,m}t + \varphi_{u's',n,m} - \varphi_{us,n,m}$ 。

设置 $\tau = 0$, 空时相关函数就可以表示为空间交叉函数(spatial Cross-Correlation Function, CCF) $\rho_{us,u's',n}(\delta_t, \delta_r; t)$, 当局部散射体数趋于无穷时, 离散散射分量的角度分布将是一个连续随机变量, 从 $h_{us,n}(t)$ 到 $h_{u's',n}(t)$ 演变过程中散射簇 n 有效的概率为 $\exp[\kappa_\theta \cos(\theta_{n,\text{ZOD}} - \bar{\theta}) + \kappa_\phi \cos(\phi_{n,\text{AOD}} - \bar{\phi}) + k_r D_n^T / D] / [4\pi^2 I_0(\kappa_\theta) I_0(\kappa_\phi)]$, CCF可以写为

3.2 天线阵列轴的多普勒频率标准差

本小节利用阵列轴多普勒频率标准差来解释近场效应。传统MIMO信道模型在平面波前条件下,在整个阵列轴多普勒频率是一个常数。而所提模型在抛物波前条件下,阵列轴上不同阵元的多普勒频率是不同的。用 \bar{f}_{un} 表示第 u 根接收天线的平均多普勒频率,即

$$\bar{f}_{un} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} p(\phi_{n,\text{AOA}}, \theta_{n,\text{ZOA}}) \cdot f_{un}(\theta_{n,\text{ZOA}}, \phi_{n,\text{AOA}}) d\theta_{n,\text{ZOA}} d\phi_{n,\text{AOA}} \quad (21)$$

则阵列轴的平均多普勒频率 $\mu_{\bar{f}_{un}}$ 为

$$\mu_{\bar{f}_{un}} = E[\bar{f}_{un}] = \sum_{u=1}^{M_r} \bar{f}_{un} / M_r \quad (22)$$

而阵列轴的多普勒频率标准差 $\sigma_{\bar{f}_{un}}$ 为

$$\sigma_{\bar{f}_{un}} = \sqrt{\sum_{u=1}^{M_r} (\bar{f}_{un} - \mu_{\bar{f}_{un}})^2 / M_r} \quad (23)$$

传统MIMO信道模型中,在整个阵列轴天线的多普勒频率是定值,即 $\sigma_{\bar{f}_{un}} = 0$ 。而大规模MIMO信道模型中, $\sigma_{\bar{f}_{un}}$ 不为0,由于近场效应随天线数目增加而更加显著,标准差 $\sigma_{\bar{f}_{un}}$ 也随之增加。

3.3 阵列轴信道强度

在3D MIMO模型中,根据单斜率指数时延分布计算散射簇功率,将其建模为时延和场景的函数:

$$P_n' = \exp\left(-\tau_n \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \sigma_\tau}\right) \times 10^{\frac{-X_n}{10}} \quad (24)$$

其中, X_n 表示服从独立同分布的高斯随机变量,标准差 $\zeta=3$ dB,均值为0,表示每一散射簇的随机阴影效应。 r_τ 是时延分布比例因子, σ_τ 是时延的标准差。归一化散射簇的功率为

$$P_n = \frac{P_n'}{\sum_{n=1}^N P_n'} \quad (25)$$

阵列轴天线的信道强度 Q_{su} 为无线链路 (s, u) 中所有有效散射簇归一化功率的和,即 $Q_{su} = \sum_{n=1}^N P_n$,其中当散射簇 n 是无效时,记 $P_n = 0$ 。

3.4 信道容量

MIMO信道是随机变化的,因此MIMO信道容量也是随机时变的。假设随机信道是一个遍历过程,则一个 M_t 根发送天线和 M_r 根接收天线组成的MIMO系统($M_t > M_r$),其信道容量可以通过时间平均给出

$$\begin{aligned} \bar{C} &= E\{C(\mathbf{H})\} \\ &= E\left\{\log_2 \det\left(\mathbf{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H\right)\right\} \end{aligned} \quad (26)$$

其中, \bar{C} 通常称为遍历信道容量,矩阵 \mathbf{H} 为信道传输增益矩阵, ρ 是每一信道的信噪比, \mathbf{I}_{M_r} 为单位阵。

4 仿真分析

本节将利用计算机仿真,对上一节所推导的信道统计特性进行仿真分析,进一步验证所提模型理论分析的合理性。同时,利用仿真结果,进一步认识所提信道模型的建模过程。

4.1 仿真条件

对3维信道建模时,对于一个散射簇中散射子径的描述,散射子径的方位角和俯仰角一般是相关的,我们使用Von Mises Fisher(VMF)分布^[14]描述散射簇 n 角度的概率密度分布函数 $p(\theta_n, \phi_n)$ 为

$$p(\theta_n, \phi_n) = C_p(\kappa_n) \sin \theta_n \exp\left\{\kappa_n [\sin \bar{\theta}_n \sin \theta_n \cdot \cos(\phi_n - \bar{\phi}_n) + \cos \bar{\phi}_n \cos \phi_n]\right\} \quad (27)$$

其中, $\bar{\theta}_n$ 和 $\bar{\phi}_n$ 分别表示散射簇中所有散射体的俯仰角和方位角平均值。 κ_n 表示聚焦参数, $C_p(\kappa_n) = \kappa_n / (4\pi \sinh \kappa_n)$ 。

设置仿真参数 $M_t = 64$, $D = 200$ m, $\beta_E^R = \pi/4$, $\beta_E^T = \pi/6$, $\beta_A^R = \pi/2$, $\beta_A^T = \pi/2$, $f_{\max} = 33.33$ Hz, $\lambda = 0.15$ m, $\alpha_v = \pi/6$, $\vartheta_v = 0$, $r_\tau = 2.3$, $\sigma_\tau = 0.39$, $t = 0$ s, 散射簇的所有角度参数服从卷绕高斯(Wrapped Gauss)分布: $\mu_{\text{AOD}} = 1.41$, $\varepsilon_{\text{AOD}} = 0.28$, $\mu_{\text{AOA}} = 1.87$, $\varepsilon_{\text{AOA}} = 0.11$, $\mu_{\text{ZOD}} = \mu_{\text{ZOA}} = 1.26$, $\varepsilon_{\text{ZOD}} = \varepsilon_{\text{ZOA}} = 0.16$, 设置随机分布函数参数 $\kappa_\theta = 8.62$, $\kappa_\phi = 5$, $k_r = -0.52$, D_n^T 服从均值为116.6,标准差为2.56的指数分布,随机生成的散射簇1参数 $\bar{\theta}_{1,\text{ZOD}} = 1.28$, $\bar{\phi}_{1,\text{AOD}} = 1.04$, $\bar{\theta}_{1,\text{ZOA}} = 1.40$, $\bar{\phi}_{1,\text{AOA}} = 2.72$, $D_1^T = 115.5$ m, $\kappa_1 = 3.6$, NLOS场景。

4.2 仿真结果与分析

图2为抛物波前条件下,空间CCF绝对值 $|\rho_{11,22,1}(\delta_t, \delta_r; t)|$ 随发送端和接收端天线阵元间距变化示意图,可以看出CCF值随天线间距增加呈递减的趋势。散射簇1的有效性演变导致天线间距在0处的CCF值小于1,说明信道空间非平稳性降低了信道之间的空间相关性。与传统MIMO不同,在一定天线间距条件下大规模MIMO子信道之间趋于正交。

图3给出了抛物波前条件下基站端大规模阵列在不同位置阵元间的相关性比较。在不考虑散射簇演变的条件下,可以看出 $|s - s'| = 1$ 时不同天线对

(s, s') 的空间CCF绝对值 $|\rho_{1s,1s',1}(\delta_t, 0; t)|$ 是不同的, 即空间相关函数与 s, s' 的取值有关。这也证明了大规模MIMO信道在阵列轴上的非平稳特性。

图4中仿真了抛物波前条件下大规模天线阵列轴的多普勒频率变化。传统MIMO模型中阵列轴多普勒是相同的, 多普勒标准差为0。所提模型中阵列轴多普勒频率标准差随天线数目增加而增加, 表明随着天线数目增大阵列轴近场效应变强, 传统模型的平面波前假设不再合适。

图5是关于散射簇沿大规模天线阵列轴随机演变的事例。图5(a)中仿真了阵列轴信道强度的变化。可以看出, 由于散射簇的演变导致了整个阵列信道强度有较大变化, 不再是平稳的。图5(b)中根据随机分布函数仿真了有效散射簇在大规模天线阵

列轴的随机演变, 可以看到阵列轴的阵元不能利用到所有散射簇, 散射簇在阵列轴上存在出现和消失现象。仿真结果验证了在阵列轴上观测到的散射簇非平稳特性。

图6给出了不同条件下所提模型遍历信道容量的比较。为保证球面波前条件下各无线链路子信道之间的正交性^[15], 需满足 $\delta_t > 10\lambda, \delta_r > 10\lambda$, 这里设 $\delta_t = 12\lambda, \delta_r = 12\lambda$ 。图6(a)中抛物波前条件下所提模型信道容量明显高于平面波前条件, 随着天线数目增多, 抛物波前条件相对平面波前的信道容量增加明显, 意味着大规模天线场景中平面波前条件不再合适; 而图6(b)中球面波前与抛物波前条件的信道容量相近, 说明抛物波前可以很好替代球面波前来简化所提信道模型的复杂度。

5 结束语

本文提出了一种基于随机散射簇的非平稳3D空间信道模型, 所提模型中引入有效散射簇和散射簇的有效概率两个概念, 以散射簇的空间位置信息为参量来定义散射簇的有效概率。每对收发天线阵元基于散射簇的有效概率随机生成自己的有效散射簇集合, 从而建模散射簇沿阵列轴的动力学特性, 即非平稳特性。此外, 文中首次在3D模型结构中采

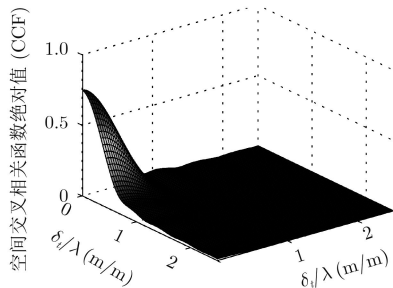


图2 所提信道模型空间CCF绝对值 $|\rho_{11,22,1}(\delta_t, \delta_r; t)|$

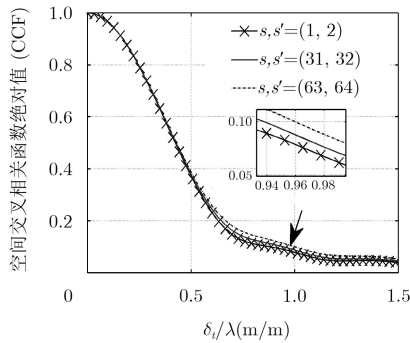


图3 不同位置天线对 (s, s') 的空间CCF绝对值 $|\rho_{1s,1s',1}(\delta_t, 0; t)|$

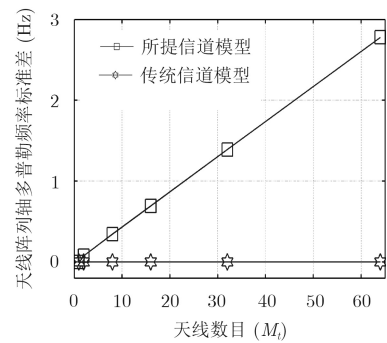
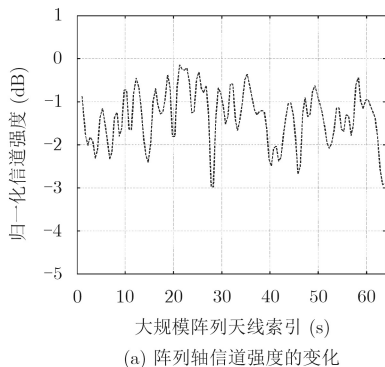
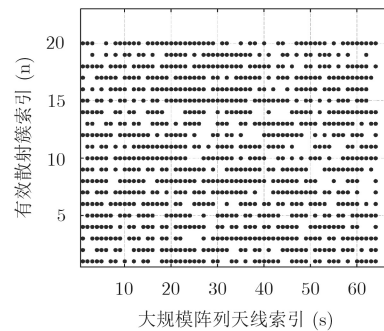


图4 不同天线数目阵列轴多普勒频率标准差



(a) 阵列轴信道强度的变化



(b) 阵列轴有效散射簇的随机演变

图5 阵列轴信道强度变化和有效散射簇随机演变

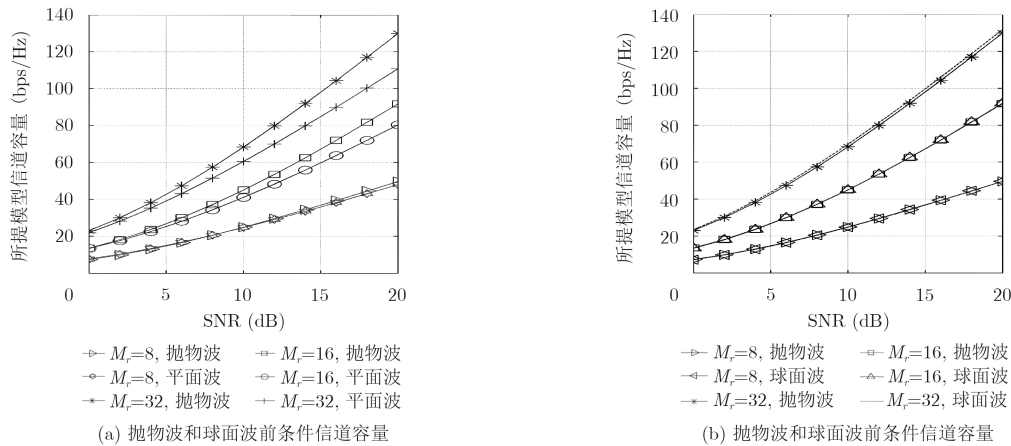


图6 所提模型在不同条件下的遍历信道容量

用抛物波前代替球面波前建模近场效应，降低模型计算复杂度的同时可以获得与球面波前假设相近的信道容量。最后，通过对所提信道模型统计特性的理论推导和仿真分析，验证了所提模型的合理性。

参 考 文 献

- [1] DONG Lei, ZHAO Hongyi, CHEN Yan, *et al.* Introduction on IMT-2020 5G trials in China[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(8): 1849–1866. doi: [10.1109/JSAC.2017.2710678](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2710678).
- [2] WANG Chengxiang, WU Shangbin, BAI Lu, *et al.* Recent advances and future challenges on massive MIMO channel measurements and models[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(2): 21301–21302. doi: [10.1007/s11432-015-5517-1](https://doi.org/10.1007/s11432-015-5517-1).
- [3] 刘留, 陶成, 卢艳萍, 等. 大规模多天线无线信道及容量特性研究[J]. *北京交通大学学报*, 2015, 39(2): 69–79. doi: [10.11860/j.issn.1673-0291](https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291).
LIU Liu, TAO Cheng, LU Yanping, *et al.* Research on the propagation condition and channel capacity for Massive MIMO[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(2): 69–79. doi: [10.11860/j.issn.1673-0291](https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291).
- [4] GAO Xiang, TUFVESSON F, and EDFORS O. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz[C]. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC)*, Pacific Grove, USA, 2012: 295–299.
- [5] GAO Xiang, TUFVESSON F, and EDFORS O. Massive MIMO channels-measurements and models models[C]. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC)*, Pacific Grove, USA, 2013: 280–284.
- [6] ZHANG Ping, CHEN Jianqiao, and TANG Tian. An overview of non-stationary property for massive MIMO channel modeling[J]. *ZTE Communications*, 2017, 15(1): 3–7. doi: [10.3969/j.issn.1673-5188.2017.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5188.2017.01.001).
- [7] WU Shangbin, WANG Chengxiang, AGGOUNE M, *et al.* A non-stationary wideband channel model for massive MIMO communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(3): 1434–1446. doi: [10.1109/TWC.2014.2366153](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2366153).
- [8] WU Shangbin, WANG Chengxiang, AGGOUNE M, *et al.* A non-stationary 3-D wideband twin-cluster model for 5G massive MIMO channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1207–1218. doi: [10.1109/JSAC.2014.2328131](https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328131).
- [9] LI X, ZHOU S, BJORNSON E, *et al.* Capacity analysis for spatially non-wide sense stationary uplink massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(12): 7044–7056. doi: [10.1109/TWC.2015.2464219](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2464219).
- [10] ADEMAJ F, TARANETZ M, and RUPP M. 3GPP 3D MIMO channel model: A holistic implementation guideline for open source simulation tools[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016(1): 55–67. doi: [10.1186/s13638-016-0549-9](https://doi.org/10.1186/s13638-016-0549-9).
- [11] LOPEZ F, WANG Chengxiang, and FENG Rui. A novel 2D non-stationary wideband massive MIMO channel model[C]. *Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Toronto, Canada, 2016: 2378–2382.
- [12] ABDI A and KAVEH M. A versatile spatio-temporal

- correlation function for mobile fading channels with non-isotropic scattering[C]. Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal Array Processing, Pocono Manor, USA, 2000: 58–62.
- [13] PATZOLD M. Mobile Radio Channels[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2012: 369–375.
- [14] MAMMASIS K, STEWART W R, PFANN E, *et al.* Three-dimensional channel modelling using spherical statistics for multiple-input multiple-output systems[J]. *IET Communications*, 2008, 3(1): 48–56. doi: [10.1049/iet-com:20070518](https://doi.org/10.1049/iet-com:20070518).
- [15] LIU Liu, MATOLAK D W, TAO Cheng, *et al.* Channel capacity investigation of a linear massive MIMO system using spherical wave model in LOS scenarios[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(2): 1–15. doi: [10.1007/s11432-015-5512-6](https://doi.org/10.1007/s11432-015-5512-6).
- 张 薇: 女, 1972年生, 副教授, 研究方向为5G新波形技术、大规模 MIMO技术.
- 段京京: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为大规模 MIMO信道建模.
- 王岩松: 男, 1970年生, 高级工程师, 研究方向为无线电监测.