

文章编号: 1005-6122(2011)03-0056-05

三维粗糙面上的 MIMO 信道模型*

李 维 金亚秋

(复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室,上海 200433)

摘 要: 多天线构成的多输入多输出 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信道是 B3G/4G 系统的关键技术之一。文章建立下垫三维粗糙面的 MIMO 信道模型,用基尔霍夫(KA, Kirchhoff approximation)近似随机粗糙面散射的数值计算方法研究下垫粗糙面产生的随机多路径传输对 MIMO 信道矩阵的影响,并数值地讨论接收、发射天线阵列位置以及下垫粗糙面几何参数对 MIMO 系统信道容量的影响。结果表明,双站距离大、天线高度低时,下垫随机粗糙面对 MIMO 信道容量的影响显著。当天线阵元间距小时,下垫粗糙面将显著增大 MIMO 系统信道容量;当天线间距大时,粗糙面减小 MIMO 系统信道容量。

关键词: 多输入多输出,信道容量,粗糙面散射

Model of MIMO System above a Three-Dimensional Random Rough Surface

LI Wei, JIN Ya-qiu

(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (MoE), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Multiple input-multiple output (MIMO) system has become one of key techniques for developing B3G/4G systems. In this paper, a model of the MIMO system above a 3-D random rough surface is presented. Using Monte Carlo method, underlying random rough surface is realized. The Kirchhoff approximation (KA) is applied to numerical calculation of rough surface scattering for implementing multi-path propagation and the channel transfer matrix of MIMO system. It numerically shows the dependence of the MIMO system capacity upon physical parameters of the MIMO antenna arrays and underlying surface. It is found that when the inter-element separation of the antenna array is small, the underlying rough surface can significantly increase the MIMO capacity. However, when the separation is large, the MIMO capacity above the rough surface becomes lower.

Key words: MIMO, channel capacity, rough surface scattering

引 言

近年来,宽带多媒体和无线 Internet 通信业务需求不断增加,使得多输入输出(MIMO)成为当前无线通信技术的一个研究热点^[1-2]。MIMO 系统的容量与发射、接收端的最少天线个数近似呈正比。MIMO 系统大容量的实现和系统性能的提高,及其 MIMO 系统信号处理算法等性能都取决于 MIMO 系统本身的信道特性,即各个天线之间的相关特性。建立 MIMO 信道空间相关特性,进行系统级和链路级 MIMO 信道模型仿真,对于系统性能评估是十分

重要的^[3]。

目前 MIMO 信道模型可分为统计分析模型和物理信道模型两类。统计分析信道模型基于测量,建立天线阵列单元处信号的统计相关特性来描述 MIMO 系统的空间信道特性。该信道模型以测量数据为依据,反映了测试环境下真实的信道特性,但不易揭示传播的物理过程,结果受测试带宽、天线结构、天线方向图等测试设备的影响较大^[3]。

物理信道模型采用天线与波传播过程的物理参数建模来模拟与描述信道特征。该模型讨论电磁波散射绕射等波传播的物理过程,用于预测系统性能。

* 收稿日期: 2010-10-18; 修回日期: 2011-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41071219, 60971091)

但该类模型一般较为简化,可能不完全反映真实信道的特性,模型计算也比较复杂。

一些简化的物理信道模型:单环模型^[4]假设基站周围无散射体,移动台被散射体包围,基站和移动台之间无视距传播(NLOS),散射体均匀分布在半径为 R 的圆环上,所有到达接收阵列的射线都经过一次反射且有相同的功率。随后的双环模型^[5]假设基站和移动台均被散射体包围,此时,每条到达接收机的波传播射线都经过两次反射,复信道系数是两个单环模型复信道系数的乘积,不能完全用信道协方差矩阵来描述 MIMO 信道。文献[6]研究降雨天气条件下 MIMO 信道模型,考虑了雨强对信道容量的影响。

建立在地面上的 MIMO 系统不可避免地受到下垫陆地面的影响,如道路、墙壁、建筑物表面、海面、山谷等。Kyritsi 等曾讨论一光滑平表面上 MIMO 的信道容量^[7]; Xu 等讨论了 U 型山谷模型的二维粗糙面 MIMO 信道模型^[8],解析地讨论了左右两侧二维粗糙面对 MIMO 用户之间互相关性的影响。目前,随机粗糙海面的多路径数值模拟方法已经比较成熟^[9]。

本文建立下垫陆地面为三维随机粗糙面 MIMO 模型。首先用 Monte Carlo(MC)方法产生三维随机粗糙面,用离散剖分和基尔霍夫(KA)近似方法数值计算多输入天线在随机粗糙面上感应电流分布及其散射场,计算 MIMO 信道容量。多次 MC 实现,得到三维随机粗糙面对 MIMO 系统影响的平均结果,并讨论不同天线阵列与粗糙面的物理参数对 MIMO 系统信道容量的影响。

1 MIMO 系统的信道容量

M 根发射天线和 N 根接收天线的 MIMO 系统模型如图 1。每根发射天线发射功率为 P_x ,总发射功率 $P_r = MP_x$ 。

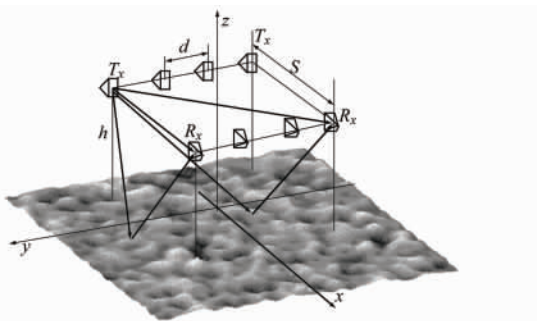


图 1 MIMO 系统模型

按文献[10-11],设接收端噪声为 Gauss 统计分布,则 Shannon 信道容量为

$$C = \log_2 \left[\det \left(\bar{I} + \frac{P_x}{\delta^2} \bar{T} \bar{T}^+ \right) \right] \quad (1)$$

其中 \bar{I} 是单位矩阵, \bar{T} 是信道矩阵 ($N \times M$ 维), δ^2 为噪声的平均功率, \bar{T}^+ 是 \bar{T} 的复数共轭转置。平均信道增益 G 定义为

$$G^2 = \langle |T_{nm}|^2 \rangle \quad (2)$$

其中 T_{nm} 是 \bar{T} 中第 n 行第 m 列元素。

归一化信道传输矩阵 \bar{H} ($\langle |H_{nm}|^2 \rangle = 1$) 定义为

$$\bar{T} = G\bar{H} \quad (3)$$

可以得到平均信噪比 ρ 为

$$\rho = \frac{P_r}{\sigma^2} G^2 \quad (4)$$

与单输入单输出的情况类似,公式(4)可写为

$$C = \log_2 \left[\det \left(\bar{I} + \frac{\rho}{M} \bar{H} \bar{H}^+ \right) \right] \quad (5)$$

2 三维粗糙面上 MIMO 信道矩阵

发射与接收信号分别为输入 V_i ($M \times 1$ 维) 和输出 V_r ($N \times 1$ 维)。在不考虑频率变化的平稳衰落信道中, V_i 与 V_r 由信道矩阵 \bar{T} 和噪声向量 n 写成:

$$V_r = \bar{T} \cdot V_i + n \quad (6)$$

信道矩阵 \bar{T} 的元素 T_{nm} 由第 m 根发射天线到第 n 根接收天线之间的信道增益为

$$T_{nm} = F_{rn} F_{lm} g_{nm} \quad (7)$$

其中 g_{nm} 是从第 m 根发射天线到第 n 根接收天线的信道增益,在自由空间中表示为

$$g_{nm} = \exp(jkR_{nm}) / (4\pi R_{nm})$$

F_{lm} 和 F_{rn} 是第 m 根发射天线和第 n 根接收天线的天线参数。

将非视距传播 NLOS 信号(即通过下垫粗糙面散射的信号)的信道增益表示为 g_{nm}^{NLOS} ; 视距传播 LOS 信号(即通过自由空间传播的信号)增益表示为 g_{nm}^{LOS} 。则整个系统的增益写为

$$g_{nm} = g_{nm}^{LOS} + g_{nm}^{NLOS} \quad (8)$$

天线的信道增益 g_{nm} 由接收天线方向上的电场强度除以发射电场强度,即

$$g_{nm} = E_n \cdot \hat{z} / |E_m| \quad (9)$$

其中 $|E_m|$ 为第 m 根发射天线的电场强度。第 n 根接收天线接收到的电场 E_n 为

$$E_n = E_n^{LOS} + E_n^{NLOS} \quad (10)$$

光滑平表面信道模型的 E_n^{LOS} 可由发射天线的辐射场得到,其 E_n^{NLOS} 可由镜像源得到^[12]。

这样,在纳入粗糙面非视距传播 NLOS 信号和

视距传播 LOS 信号的 MIMO 系统中 我们得到

$$g_{nm}^{LOS} = \exp(ikR_{nm}) / (4\pi R_{nm}) \quad (11)$$

$$g_{nm}^{NLOS} = F_{rn} F_{lm} E_{msf}(\mathbf{r}_n) \cdot (il \cdot \hat{\mathbf{z}}) / E_m \quad (12)$$

其中 l 为接收赫兹偶极子天线的长度, $\hat{\mathbf{z}}$ 为接收赫兹偶极子天线的方向, $E_{msf}(\mathbf{r}_n)$ 为第 m 根发射天线发射的电磁波经过粗糙面散射后到达第 n 根接受天线的电场。

本文粗糙面建模用 Monte Carlo (MC) 方法,按起伏方差和相关长度,产生一随机粗糙面^[13]。

粗糙面散射采用 KA 近似的数值计算。为进行数值计算,粗糙面进行离散剖分。KA 方法属于高频近似的物理光学方法,适用于大尺度随机起伏的粗糙面散射计算。

空间 \mathbf{r} 处的散射场写为:

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \iint_s d\mathbf{s} \{ \nabla' \times \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot [\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')] - j\omega\mu \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot [\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}(\mathbf{r}')] \} \cdot S(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i) \quad (13)$$

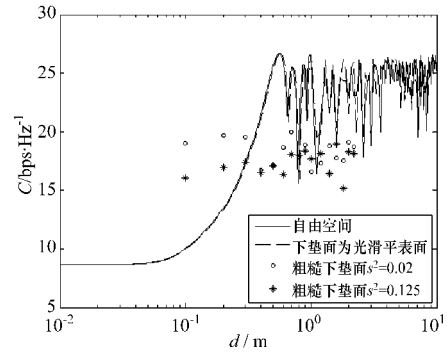
其中 $\mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}(\mathbf{r}')$ 与 $\mathbf{M} = \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')$ 分别为面感应电流和感应磁流, $S(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i)$ 为遮蔽函数^[14]。散射场数值计算方法按文献 [12]。

3 数值结果

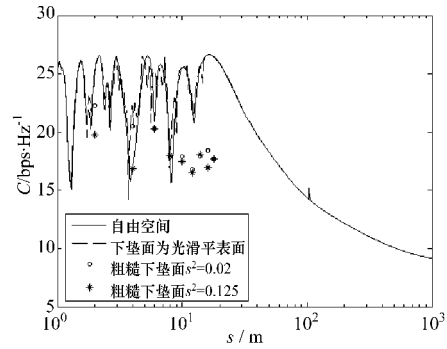
采用 4×4 MIMO 系统,即 $M=4, N=4$ 。发射天线为半波长偶极子天线,发射频率为 1.95 GHz,天线电流强度 $I=1A$ 。如图 1,发射天线与接收天线阵列的各天线元间距均为 d ,两天线阵列相距为 S ,天线放置高度为 h 。粗糙面长与宽选取为 $L_x = L_y = 60m$,剖分网格大小为 $0.025m$,小于 $\lambda/8$,粗糙面的均方高度为 σ ,平均坡度为 s 。

图 2 (a) ~ (d) 分别给出改变天线元间距 d 、两阵列间距 S 、粗糙面平均坡度 s 、下垫地表介电常数 ϵ_1 时, MIMO 系统信道容量的变化。图中天线高度 h 保持不变为 $2m$ 。图 2 (a) ~ (c) 下垫面为完全导体表面。粗糙面模型系统的信道容量值为用 20 次 MC 实现三维 Gauss 粗糙面样本的统计平均值。图 2 (d) 的下垫面介电常数为 ϵ_1 ,自由空间介电常数为 ϵ_0 ,改变下垫面介电常数 ϵ_1 从 ϵ_0 到 $100\epsilon_0$ 。

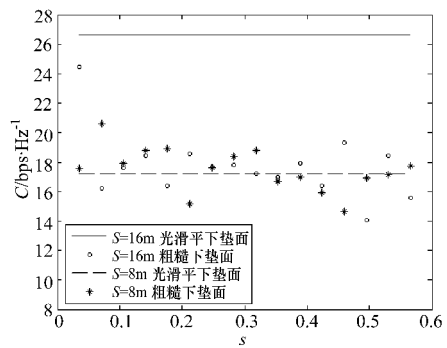
由图 2 (a),当天线元 d 非常小时 ($d=0.1m \approx 0.5\lambda$),下垫面为高斯粗糙面模型的信道容量明显高于下垫面为光滑表面信道模型和自由空间模型的信道容量。当 d 增加(如 $d=0.8m \approx 5\lambda$)后,粗糙面模型的信道容量略低于光滑表面和自由空间模型的信道容量。仿真结果表明,下垫面为粗糙面的 MIMO 信道模型在天线元间距小的情况下可显著增加系统信道容量。



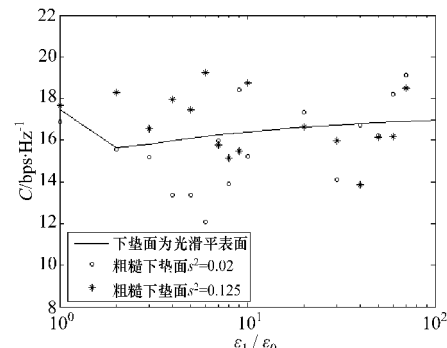
(a) 不同间距 d 的信道容量 ($S=8m$)



(b) 不同间距 S 的信道容量 ($d=0.8m$)



(c) 不同坡度 s 的信道容量 ($d=0.8m$)



(d) 不同介电常数 ϵ_1 的信道容量 ($S=8m, d=0.8m$)

图 2 自由空间、平表面、 $s^2 = 0.02$ 与 $s^2 = 0.125$ 粗糙面对 MIMO 系统信道容量的变化

随着接收发射天线间距离 S 增大,自由空间模型和下垫光滑平面模型的信道容量变化如图 2 (b) 所示。当双站距离近时,距离 S 强烈影响多天线接收的多径信号的相位差,多天线接收信号的互相关随距离上下波动,从而导致信道容量波动;当距离远时,多径信号相位差变化缓慢,信号随距离衰减成为

使信道容量递减的主导因素。下垫面为粗糙面的信道模型在双站距离远的情况下会显著减小系统信道容量, 双站距离近时几乎无影响。因为双站距离远时, 下垫面的入射角与散射角大, 下垫面的粗糙度对散射信号的影响大。

图 2 (c) 给出不同粗糙度(用粗糙面平均坡度 s 表征)的 MIMO 信道容量的变化。图中给出了双站距离为 8m 和 16m 的两组结果。当粗糙面坡度小, 即粗糙面接近水平表面时, 20 次 MC 的信道容量数值结果与直接镜像法计算光滑平面模型结果相同, 验证了粗糙面仿真模型的正确性。在天线间距大 ($d = 0.8\text{m}$), 双站距离大 ($S = 16\text{m}$) 时, 粗糙面会显著减小系统信道容量。而在双站距离小 ($S = 8\text{m}$) 时, 粗糙面对系统信道容量影响不大, 验证了图 2 (b) 的结果。

图 2 (d) 的粗糙面介电常数 ϵ_1 的变化对系统信道容量的影响并不显著。没有规律性的结论, 但下垫面介电常数不同, 粗糙面对系统信道容量的影响略有差异, 可在实际应用中具体分析。

图 3 为不同天线高度 h , 自由空间、光滑平表面和粗糙面模型 MIMO 系统信道容量的变化。图中, 下垫面均为完全导体表面, 粗糙面坡度 $s^2 = 0.02$ 。

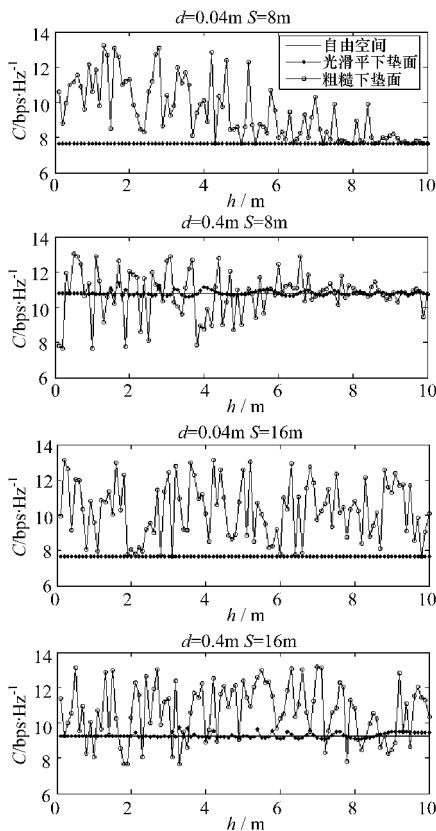


图 3 不同高度 h 的自由空间、平表面与 $s^2 = 0.02$ 粗糙面模型的信道容量的变化

可以看出, 当 $S = 8\text{m}$ 时, 高度 h 增加使 MIMO

天线远离地面, 下垫粗糙面对系统信道容量的影响减小。天线元间距 d 小时, 与图 2 (a) 相似, MIMO 信道容量可能大于光滑表面和自由空间模型。但当天线元间距 d 大时, 粗糙面模型的信道容量随高度变化有明显起伏。当增大 $S = 16\text{m}$ 时, 即使高度很高, 粗糙面依然对信道容量产生影响。

粗糙面上的 MIMO 信道矩阵受到随机多路径传播的影响。接收点场强是不同传输路径上场的叠加, 只要路径上时延稍有变化, 合成信号的电平就会有明显起伏衰落变化, 导致信道矩阵的变化, 影响系统信道容量。

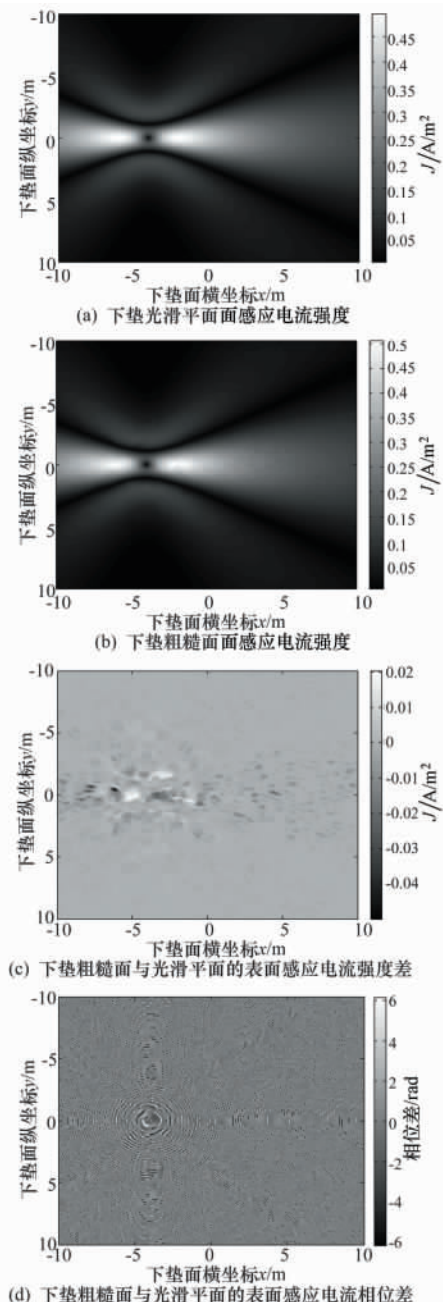


图 4 表面感应电流分布

粗糙面信道模型中影响多路径传输变化来自于粗糙面上感应电流及其产生的散射场。图4(a)~(d)给出下垫面感应电流分布,天线阵列参数和粗糙面几何参数为 $d=0.04\text{m}$, $S=8\text{m}$, $h=2\text{m}$, $\rho^2=0.02$ 。图5(a)~(d)为表面感应电流 $d=0.4\text{m}$, $S=8\text{m}$, $h=2\text{m}$, $\rho^2=0.02$ 。

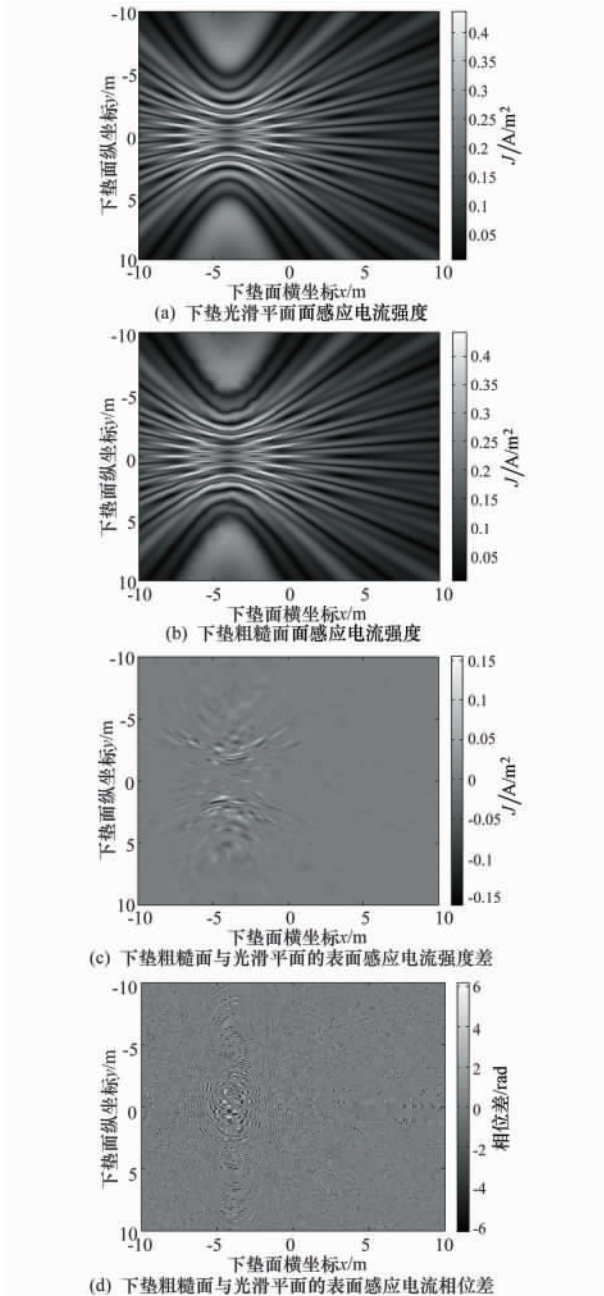


图5 表面感应电流

由图4和图5看出,当天线元间距 d 小时,粗糙面的影响主要集中在天线中心的条形带,多径效应的改变主要在中心条形带产生。这里的感应电流变化增强了系统信道容量。当天线元间距增大时,多径效应变化产生在发射天线下的蝶形区域比较分

散,感应电流的这种分布减小了系统信道容量。

4 结论

本文建立三维下垫粗糙面的MIMO信道模型,对天线元、接收发射天线位置、粗糙面粗糙度、介电常数等不同参数条件下MIMO系统信道容量进行数值计算。

MIMO接收天线不但收到发射天线的视距(LOS)信号,还收到不同路径传播的非视距(NLOS)信号。下垫粗糙面产生波传播的多路径散射效应,它们具有不同的强度与时延相位,影响了接收信号增益和相位,从而影响多天线接收信号之间的互相关,导致信道容量的变化。在下垫面为粗糙面的MIMO信道模型中,双站间距越大、接收和发射天线距地面越近,粗糙面对模型信道容量的影响越显著。当接收和发射天线阵元间距小时,粗糙面增加系统信道容量;当阵元间距大时,粗糙面减小系统信道容量。

参 考 文 献

- (1) Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environment when using multi-element antennas[J]. Bell Labs Tech. J., 1996, 1(2): 41-59
- (2) Raleigh G G, Cioffi J M. Spatio-temporal coding for wireless communication[J]. IEEE Trans. Commun., 1998, 46(2): 357-366
- (3) Yu K, Ottersten B. Models for MIMO propagation channels: a review[J]. Wirel. Commun. Mob. Comput. 2002, 2: 653-666
- (4) Jakes W C. Microwave mobile communications[M]. New York: Wiley, 1974. 60-65
- (5) Shiu D S. Wireless communication using dual antenna arrays[M]. MA: Norwell, Kluwer Academic Pub, 2000
- (6) Ishimaru A, James A R, Kuga Y. A MIMO propagation channel model in a random medium[J]. IEEE Trans. Ant. Propag. 2010, 58(1): 178-186
- (7) Kyritsi P. Capacity of multiple antenna systems in free space and above perfect ground[J]. IEEE Communication Letters, 2002, 6(8): 325-327
- (8) Xu W, Zekavat S A, Hui T. A novel spatially correlated multiuser MIMO channel modeling: Impact of surface roughness, antennas and propagation[J]. IEEE Transactions on, 2009, 57(8): 2429-2438
- (9) 李彦佐, 金亚秋. 随机粗糙海面的多路径海杂波频谱数值模拟[J]. 微波学报, 2005, 21(4): 6-11
- (10) Loyka S L. Channel capacity of MIMO architecture using the exponential correlation matrix[J]. IEEE Communication Letters, 2001, 5(9): 369-371 (下转第87页)

4 结论

针对当前主要应用的自适应预失真结构皆不利于对 Hammerstein 预失真器进行更新的问题, 本文以间接学习结构为基础设计出一种改进的自适应结构, 利用该结构可以直接应用高效的最小二乘算法对 Hammerstein 预失真器中性性子系统的参数进行更新。仿真和实验证明了利用本文提出的改进的自适应结构, Hammerstein 预失真器可以快速高效地补偿带记忆效应功率放大器非线性引起的带内和带外失真。

参 考 文 献

- (1) He Zhi-yong, Ge Jian-hua, Geng Shu-jian, et al. An improved look-up table predistortion technique for HPA with memory effects in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2006, 52(1): 87-91
 - (2) Hammi O, Ghannouchi F M, Vassilakis B. A compact envelope-memory polynomial for RF transmitters modeling with application to baseband and RF-digital predistortion [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letter, 2008, 18(5): 359-361
 - (3) 幸波, 蒋伟, 王晶奇, 朱晓维. 线性功放中数字预失真方法的实验研究 [J]. 微波学报, 2009, 25(3): 47-50
 - (4) Mkadem F, Boumaiza S. Extended Hammerstein behavioral model using artificial neural networks [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(4): 745-751
 - (5) Sungho Choi, Eui-Rim Jeong, Yong H Lee. Adaptive predistortion with direct learning based on piecewise linear approximation of amplifier nonlinearity [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(3): 397-404
 - (6) 曹新容, 黄联芬, 赵毅峰. 一种基于 Hammerstein 模型的非线性预失真算法 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2009, 48(1): 47-50
 - (7) Emad Adb-elrady, Li Gan, Adaptive predistortion of Hammerstein systems based on indirect learning architecture and prediction error method [A], ICSES'08 [C], 2008, 9. 389-392
 - (8) Martin Schetzen. The Volterra and Wiener theories of nonlinear system [M]. New York: Siley and Sons, 1980. 200
 - (9) 钱业青. 一种高效的用于 RF 功率放大器线性化的自适应预失真结构 [J]. 通信学报, 2006, 27(5): 35-40, 46
 - (10) Bai Er-Wei. An optimal two-stage identification algorithm for Hammerstein-Wiener nonlinear systems [J]. Automatica, 1998, 34(3): 333-338
 - (11) Raviv Raich. Nonlinear system identification and analysis with applications to power amplifier modeling and power amplifier predistortion [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2004
- 侣秀杰 女, 1978 年生, 博士生。研究方向为功率放大器的线性化技术。
E-mail: sixiuje98@126.com
- 金明录 男, 1958 年生, 教授。主要研究方向为信号与通信系统基础理论和技术。
nas Propag, 1969, 17(5): 577-585
- 李 维 女, 1987 年生, 硕士研究生。主要研究方向: MIMO 信道物理模型电磁学仿真计算、MIMO 雷达三维成像重构算法。
E-mail: leeweifudan@gmail.com
- 金亚秋 教授, 博士生导师。研究方向: 电磁场与微波, 空间微波遥感。
E-mail: yqjin@fudan.edu.cn

(上接第 60 页)

- (11) Loyka S L, Tsoulos G. Estimating MIMO system performance using the correlation matrix approach [J]. IEEE Communication Letters, 2002, 6(1): 19-21
- (12) Tsang L, Kong J A. Theories and applications [M]. New York: John Wiley, 2001. 407-416
- (13) 金亚秋, 刘鹏, 叶红霞. 随机粗糙面与目标复合散射数值模拟理论和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2008
- (14) Sancer M L. Shadow corrected electromagnetic scattering from a randomly rough surface [J]. IEEE Trans. Anten-