

空时信道建模与智能天线系统性能仿真

戎 璐, 谢剑英, 支小莉
(上海交通大学 电子信息学院, 上海 200030)



摘 要: 性能仿真对于作为第三代移动通信关键技术之一的智能天线技术的研究具有十分重要的意义。本文以 Matlab / Simulink 为平台, 介绍了智能天线性能仿真的基本方法。首先建立了智能天线性能仿真所需的空-时信道模型, 说明了该模型在仿真中的实现方法, 然后讨论了空-时二维信号处理系统结构和智能天线算法, 给出了智能天线性能仿真的软件构架和流程, 最后结合对一些智能天线新技术的具体研究, 说明了多种仿真中常用的智能天线性能评估方法。

关键词: 智能天线; 空-时信道模型; 蒙特卡洛仿真; 移动通信

文章编号: 1004-731X (2004) 06-1231-04

中图分类号: TN 929.533

文献标识码: A

Spatial-Temporal Channel Model and Smart Antenna System Performance Simulation

RONG Lu, XIE Jian-ying, ZHI Xiao-li

(School of Electronics & Information Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Performance simulation is very important to the research of smart antenna technology, which is one of the key technologies in third generation mobile communications. This paper introduces smart antenna system simulation methods based on Matlab/Simulink platform. First, a spatial-temporal channel model for the simulation is established together with its realization method in simulation. Then, spatial-temporal signal processing architectures and smart antenna algorithms are discussed and a general simulation flow chart is provided. Finally, several useful methods for smart antenna performance evaluation are described with examples in the research on new smart antenna techniques.

Keywords: Smart antennas; spatial-temporal channel model; Monte Carlo simulation; mobile communications

引 言

由于码分多址(CDMA)移动通信系统是干扰受限系统, 而智能天线具有较好的抗多址干扰和抗多径衰落能力, 所以智能天线技术日益受到普遍关注, 已经成为以宽带 CDMA 为基础的第三代移动通信(3G)的关键技术之一^[1]。通过采用智能天线技术, 可以取得提高系统容量, 改善服务质量, 扩大小区覆盖范围等诸多好处。

在近年来智能天线领域所开展的广泛而深入的研究中, 各种新的智能天线结构和算法层出不穷。对现有各种智能天线技术的性能比较分析和对新方法的评估和改进, 都需要依赖于大量的仿真实验。因此, 性能仿真实验在智能天线技术的研究中, 具有十分重要的地位。仿真内容的针对性、结果的准确性和计算的效率, 都会对智能天线研究工作产生很大的影响。

由于一些现有的功能强大的通信系统仿真商业软件, 如 Synopsys 公司的 COSSAP、Cadence 公司的 SPW 和 Elanix 公司的 SystemView 等, 售价相当昂贵, 而功能限制较多, 使用不够灵活, 所以利用 Matlab 自己编写仿真程序, 建立更具针对性、运行效率更高的智能天线性能仿真平台, 有助于各种新智能天线技术研究的顺利展开。Matlab 的通信工具箱中已经提供了大量的实用函数和仿真模块, 使新功能的开发

更加方便^[2]。

智能天线系统仿真中的首要问题是空-时信道建模。信号的空间分布特征将直接影响到智能天线系统的性能。因此, 一个有效的空-时信道模型是智能天线系统性能仿真的重要基础。第 2 节建立了适合于智能天线系统蒙特卡洛仿真的空-时信道模型。在实际移动通信系统中, 智能天线空域信号处理同时域信号处理技术是密不可分的。第 3 节介绍了 2D-RAKE 等二维信号处理系统结构及各种智能天线算法。第 4 节以 Matlab / Simulink 为实验平台, 结合作者近年来在智能天线领域的具体研究, 介绍了仿真中常用的一些智能天线性能评估方法。

1 空-时信道建模

多径信道响应模型如图 1 所示, 天线阵列上接收到的无线信号由许多多径信号构成, 这些多径信号由于达波方向(DoA)不同, 在天线阵元间形成了不同的相位差; 又由于多普勒频移不同, 造成在同一阵元上的相位随时间变化快慢不同。用时刻 t 从用户 u 发送的信号在经过延迟 τ 到达天线阵列的信道响应向量来描述时变信道响应特性, 它可以分解为各多径的叠加:

$$\mathbf{h}_u(t, t + \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{r}_u^l e^{j(2\pi f_u^l \tau + \psi_u^l)} \mathbf{a}(\mathbf{q}_u^l) d(t - t_u^l) \quad (1)$$

其中 L 为多径数量, ρ_u^l , f_u^l , ψ_u^l , θ_u^l 和 τ_u^l 分别为用户 u 第 l 条多径的衰落幅值, 多普勒频移, 相位偏移, DOA 和时延。 $\mathbf{a}()$ 为阵列响应函数, 对于半波长等间距线形阵列, 若

收稿日期: 2003-04-08

修回日期: 2003-06-12

作者简介: 戎 璐(1975-), 男, 上海人, 博士生, 研究方向为宽带 CDMA 移动通信系统中的自适应智能天线。

以阵列中第一根天线作为参考天线, 则 $\mathbf{a}(\theta)$ 可表示为

$$\mathbf{a}(\mathbf{q}) = [1 \quad e^{j\mathbf{p} \cos(\mathbf{q})} \quad \dots \quad e^{jM\mathbf{p} \cos(\mathbf{q})}]^T$$

其中 M 为天线阵元数量, 上标 T 表示矩阵转置。

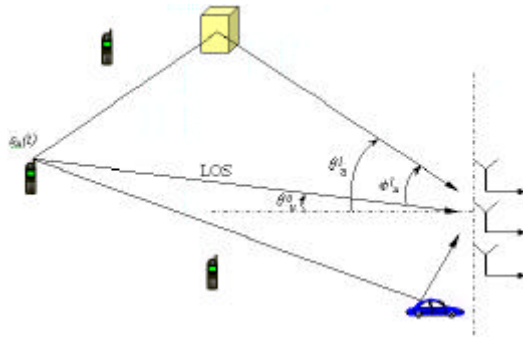


图1 多径信道响应模型

为了能够实现蒙特卡洛仿真, 首先需要知道多径信道响应参数的概率统计分布规律, 然后再据此设计算法以便在仿真中产生相应的随机样本。由于多次反射后的信号衰落很大, 同视距 (LOS) 信号和单次反射信号相比能量很小, 可以忽略不计, 所以可以用 LOS 和单次反射的多径响应来合理地近似信道响应。Liberti 等在此基础上, 根据两点间等时延多径信号所经路径长度相等, 单次反射的反射物呈椭圆分布的特点, 通过分析椭圆带状分布的反射规律, 得出了相对入射角 ϕ 和标准化时延 r 的联合概率密度函数[3]:

$$f_{f,r}(\mathbf{f}, r) = \frac{(r^2 - 1)(r^2 - 2r \cos \mathbf{f} + 1)}{p r_m \sqrt{r_m^2 - 1} (r - \cos \mathbf{f})^3} \quad (2)$$

其中 $r = \tau / \tau_0$, τ_0 为直射路径时延, $r_m = \tau_m / \tau_0$, τ_m 为所考虑的最大时延。

在仿真中, 可以根据该联合分布函数模拟产生出各多径的 DOA 与时延, 然后再进而确定衰落幅值、相位偏移和多普勒频移等参数, 构成时变无线信道响应。具体步骤如下:

(a) 初始化: 系统环境参数设定;

(b) 在系统覆盖范围内按均匀分布产生每个用户的位置, 得到 LOS 入射角 θ_u^0 ;

(c) 按如下概率分布产生各多径的标准化时延 r_u^l

$$F_r(r) = \frac{r\sqrt{(r^2 - 1)}}{r_m\sqrt{(r_m^2 - 1)}} \quad (3)$$

计算各多径的时延 $\tau_u^l = r_u^l \tau_0$;

(d) 按如下相对于标准化多径时延 r_u^l 的条件概率分布产生各多径的相对入射角 ϕ_u^l

$$f_{\phi|r}(\mathbf{f} | r) = \frac{(r^2 - 1)^{3/2} (r^2 - 2r \cos \mathbf{f} + 1)}{p (2r^2 - 1) (r - \cos \mathbf{f})^3} \quad (4)$$

计算各多径的绝对入射角 $\theta_u^l = \phi_u^l + \theta_u^0$;

(e) 在 $[-\pi, \pi]$ 间按均匀分布产生相位偏移 ψ_u^l ;

(f) 由多径时延和衰落因子计算多径衰落幅值

$$\mathbf{r}_u^l = \mathbf{r}_{ref} r_u^l \left(\frac{d_u}{d_{ref}}\right)^n / L_r \quad (5)$$

其中 ρ_{ref} 为在参考距离 d_{ref} 处获得的参考衰落幅值, d_u 为用户 u 的视距, L_r 为反射损耗;

(g) 根据移动速度 V_u^l 及其相对角度 \mathbf{a}_u^l 计算多普勒频移

$$f_u^l = V_u^l \cos \mathbf{a}_u^l / \lambda$$

其中 λ 为波长;

(h) 按高斯分布产生天线阵列上的噪声;

(i) 按式(1)合成各条多径响应, 得到总的信道响应。

在 Matlab 中, 可利用 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数发生器 $\text{rand}()$, 通过一些适当变换构造出具有上述各种概率分布规律的随机样本。对于步骤(c)中的标准化时延, 令 $F = \text{rand}()$, 则直接通过式(3)的反函数

$$r = \sqrt{(\sqrt{4r_m^2(r_m^2 - 1)F^2 + 1} + 1) / 2}$$

即可获得所需的随机变量 r 。对于步骤(d)中的相对入射角, 由于式(4)的反函数难以直接求取, 所以需要预先为仿真实验建立概率分布表, 通过检索分布表和插值的方式间接地获得反函数。对于步骤(h)中的高斯分布噪声, 可以利用 Matlab 通信工具箱中的 $\text{awgn}()$ 函数, 或者 Simulink 信源模块库中的高斯噪声发生器产生。文献[4]中提供了由均匀分布随机变量构建高斯分布随机变量的仿真算法。

天线阵列在时刻 t 接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{u=0}^{U-1} s_u(t - \mathbf{t}) * \mathbf{h}_u(t - \mathbf{t}, t) + \mathbf{n}(t) \quad (6)$$

其中 U 为用户数, $\mathbf{n}(t)$ 为高斯热噪声, $\mathbf{x}(t)$ 和 $\mathbf{n}(t)$ 均为 M 维复向量, 运算符 $*$ 表示卷积。

设智能天线算法输入信号的采样周期为 T_s , 则在 kT_s 时刻天线阵列上的离散接收信号为

$$\mathbf{x}(k) = \sum_{u=0}^{U-1} s_u(kT_s - \mathbf{t}) * \mathbf{h}_u(kT_s - \mathbf{t}, kT_s) + \mathbf{n}(k) \quad (7)$$

2 空时处理结构及智能天线算法

基本的空-时二维信号处理系统结构如图2所示。

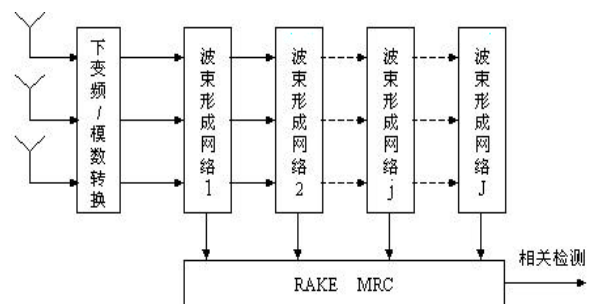


图2 2D-RAKE 空-时处理系统结构

天线阵列接收的信号经过下变频、模/数转换等处理后, 将离散基带信号送到一组波束形成网络。每个波束形成网络对应于一条瑞克 (RAKE) 分支。波束形成网络空间处理的输出由 RAKE 接收机进行最大比合并 (MRC)。

对应于用户 u 第 j 条 RAKE 分支的波束形成网络输出为

$$y_u^j(k) = \mathbf{x}^H(k) \mathbf{w}_u^j(k) \quad (8)$$

其中上标 H 表示共轭转置, $\mathbf{w}_u^j(k)$ 是波束形成网络权重, 一般采用自适应算法计算。以标准化最小均方 (NLMS) 算

法为例, 权重迭代过程如下[5]:

$$\mathbf{w}_u^j(k+1) = \mathbf{w}_u^j(k) + \frac{\mathbf{m}\mathbf{x}(k)[d_u^j(k) - \mathbf{x}^H(k)\mathbf{w}_u^j(k)]^*}{\|\mathbf{x}(k)\|^2} \quad (9)$$

其中 $\|\mathbf{x}(k)\|^2 = \mathbf{x}(k)^H \mathbf{x}(k)$, 上标 * 表示复共轭。

RAKE 接收机的输出为

$$z_u(k) = \sum_{j=0}^{J-1} \alpha_u^j(k) y_u^j(k) \quad (10)$$

其中 J 为 RAKE 分支数, α_u^j 为 MRC 权重。

以上所述的二维瑞克 (2D-RAKE) 接收机系统结构是宽带 CDMA 空-时二维信号处理结构中较为典型的一种, 其它二维信号处理结构包括时间延迟线 (TDL) 结构, 利用快速傅立叶变换 (FFT) 进行频域滤波的结构, 空-时选择性并性干扰消除 (ST-SPIC) 结构等, 参见文献[6][7]。

波束形成网络权重算法是智能天线的核心。自适应智能天线算法一般可以分为三大类别: 基于 DOA 的波束形成, 基于时间参考的波束形成 (TRB), 以及基于信号结构特性的盲波束形成等。其中较常用的算法包括最小均方 (LMS) 类算法, 递归最小二乘 (RLS) 算法, 恒模 (CM) 算法, 码过滤 (CF) 算法等。各种智能天线结构和算法的比较参见文献[8]。

3 智能天线性能仿真

图 3 是智能天线系统性能数据流仿真的整体软件流程。

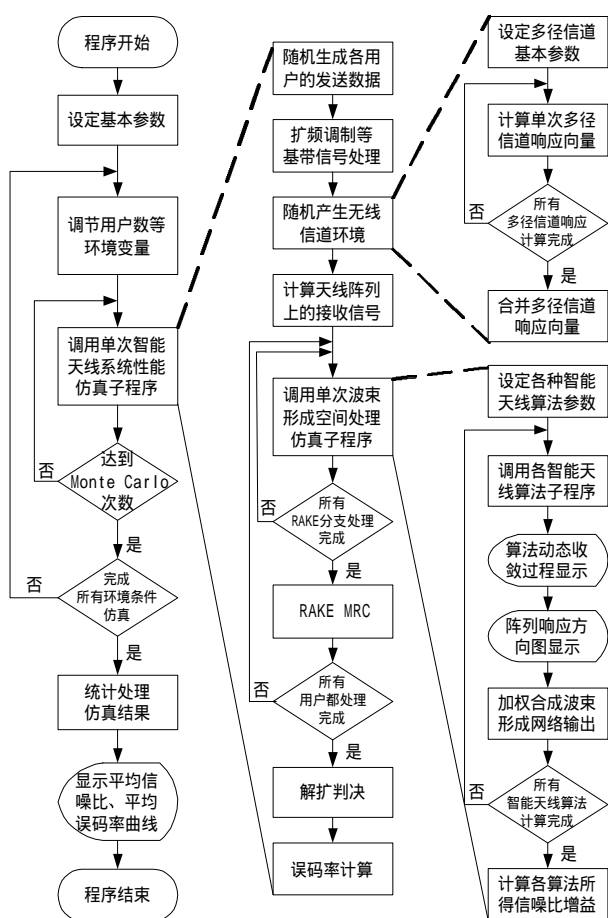


图 3 智能天线系统仿真程序流程

如图所示, 仿真软件大体分为三层。最外层主程序控制蒙特卡洛仿真实验过程, 主要功能包括基本仿真参数范围 (例如用户数抽样范围等) 设定, 蒙特卡洛随机仿真实验次数控制, 仿真数据结果统计处理, 以及统计结果显示等。中层为单次智能天线系统性能仿真子程序, 主要功能包括移动通信系统环境参数设定, 所有源信号的生成、基带处理和发送, 信号的传输和接收, 接收信号的空时二维处理, 以及对单次随机仿真实验中平均误码率等性能的计算。内层的第一部分按照第 2 节所述方法随机产生空-时移动信道环境; 第二部分针对具体的智能天线算法研究对象, 分别调用各种算法来计算智能天线权重, 完成波束形成空间处理, 评估信噪比性能, 同时从微观角度分析算法的动态收敛过程特性和稳态空间滤波效果。

智能天线系统的性能分析评估有多种方法, 以下结合具体的研究内容, 说明一些仿真中常用的方法。

(1) 权重收敛性

由 Simulink 中的示波器模块或 Matlab 中的 plot() 等绘图函数容易得到仿真中权重迭代的动态过程。可以使用 $\|\mathbf{w}(k)\|^2$ 函数曲线来从整体上观察向量序列 $\mathbf{w}(k)$ 是否发散。当需要对算法迭代过程做仔细分析时, 则应观察单根天线的权重迭代过程。

图 4 是通过 Simulink 仿真研究某智能天线新算法收敛性的一个示波器输出示例。仿真中假定每个小区包含三个扇区, 每个扇区采用一组 4 元线形阵列 (ULA)。小区中有 20 个干扰用户。标准化时延扩展为 2.0。码片速率为 3.84M。扩频因子为 256。图中 w_0 和 w_1 为新算法的两条分支的权重。从图中可以观察到, 新算法在无权重交换时是不稳定的, 而在采用了分支间的权重交换技术后, 能够获得较好的收敛性^[9]。

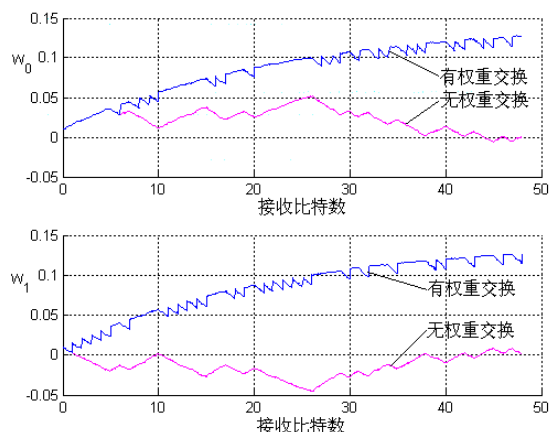


图 4 智能天线权重动态收敛过程

(2) 阵列波束方向图

阵列波束方向图是分析智能天线性能的一种基本方法。它通过智能天线空间处理增益随 DOA 变化的曲线, 形象地描绘出智能天线的空间滤波能力。

设智能天线权重为 \mathbf{w} , 则它在 θ 角度的增益为

$$G(\mathbf{q}) = \mathbf{w}^T \mathbf{a}(\mathbf{q}) / \|\mathbf{a}(\mathbf{q})\| \quad (11)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示向量的范数。

图5是应用阵列波束方向图分析WCDMA标准中信道复用对智能天线性能影响的一个示例。期望用户的DOA为0°；两个干扰用户的DOA分别为30°和-45°。专用控制信道(DPCCH)与专用数据信道(DPDCH)的发射功率比为0.2。其它仿真条件同前。由图可见，DPCCH数量的增加导致同向自干扰增强，从而造成了智能天线的空间滤波性能下降^[10]。

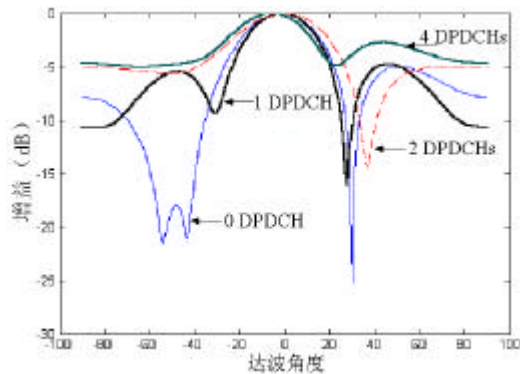


图5 智能天线阵列波束方向图

(3) 信噪比性能

信噪比性能是智能天线最关键的性能之一。一方面，通过空间处理来提高信噪比是智能天线技术改善移动通信系统性能的关键途径；另一方面，它提供了一个易于通过大量蒙特卡洛随机仿真实验统计得到的较为客观的量化指标。

将智能天线空间处理前的信号分解为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{s}(k) + \bar{\mathbf{s}}(k)$$

其中 $\mathbf{s}(k)$ 表示接收到的期望信号， $\bar{\mathbf{s}}(k)$ 表示接收到的干扰和噪声信号。智能天线空间处理前的信噪比 $SINR_{in}$ 和处理后的信噪比 $SINR_{out}$ 分别为

$$SINR_{in} = \frac{E\{\mathbf{s}^H(k)\mathbf{s}(k)\}}{E\{\bar{\mathbf{s}}^H(k)\bar{\mathbf{s}}(k)\}}$$

$$SINR_{out} = \frac{E\{\mathbf{w}^H(k)\mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k)\mathbf{w}(k)\}}{E\{\mathbf{w}^H(k)\bar{\mathbf{s}}(k)\bar{\mathbf{s}}^H(k)\mathbf{w}(k)\}}$$

其中 $E\{\cdot\}$ 为期望，在仿真实验中可以用有限样本均值来近似。

图6比较了三种智能天线盲算法在某微小区环境中的信噪比性能。假定每个用户有6条多径。最小时延1.31s，最大时延18.61s。最大多普勒频移为50Hz。码片速率为3.84M，扩频因子为32。功率控制步长为±0.5dB。RAKE分支数为3。图中曲线表明，所提出的新算法的性能同复杂度较高的CF算法接近，而明显优于具有同等复杂度的重扩频LMS算法^[11]。

(4) 误码率性能

误码率也是评估智能天线系统性能的一个重要指标。在有些情况下，例如当研究多用户检测技术同智能天线技术的结合方案时，不便比较信噪比性能，宜通过误码率来分析系统性能。在Matlab中，可以利用通信工具箱中的biterr()和symerr()等函数来计算误码率；在Simulink中，可以直接使用信宿模块库中的误码仪进行误码检测。使用函数semilogy()可方便地绘制出半对数坐标的误码率曲线图。

图7的示例比较了单天线RAKE接收、智能天线RAKE接收和一种低复杂度ST-SPIC方案的误码率性能。基本仿真条件同前所述。蒙特卡洛仿真次数为120。仿真结果证实，该ST-SPIC方案的性能明显优于其它两种接收方案^[12]。

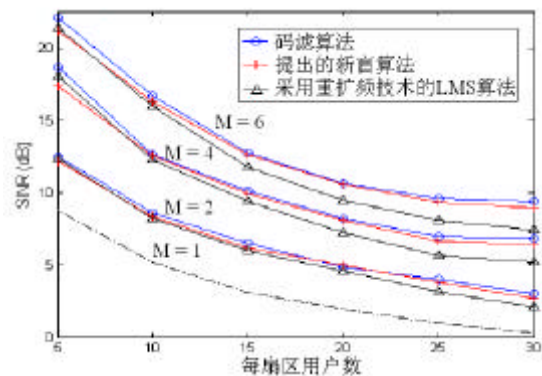


图6 智能天线系统信噪比性能

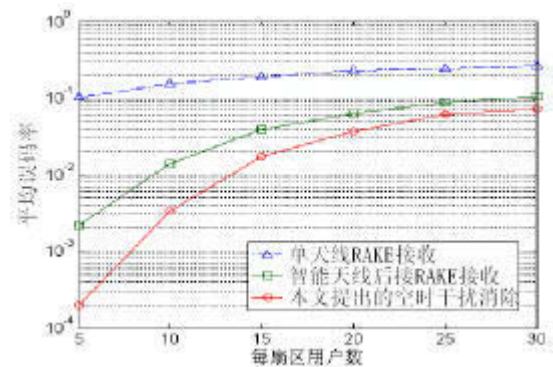


图7 智能天线系统误码率性能

以Matlab为平台研究智能天线系统性能时，仿真方法非常灵活。比如可以利用fix(clock)或者datestr(now)获取算法当前运行时间，并比较不同智能天线算法的计算复杂度等等。各用户可以根据自己的研究需要来选用最合适的性能分析方法。

大量的应用结果表明，上述智能天线系统性能仿真方法的实际使用效果良好。同一些通信系统仿真商业软件相比，本文所采用的软件系统配置更为灵活，可扩展性更强，而且由于仿真内容的针对性更强，所以能够获得更高的计算效率，在较短的时间内完成各种所需的智能天线系统性能仿真实验，为智能天线研究工作的顺利开展提供有力的支持。

4 结论

本文以Matlab/Simulink为平台，系统地介绍了智能天线系统性能仿真的方法。首先描述了空-时信道响应模型及其仿真模拟方法；然后讨论了空-时二维信号处理结构和智能天线算法。最后结合智能天线新技术研究中的实例，说明了各种常用的智能天线性能仿真方法。本文所采用的仿真方法经过大量实际应用验证，具有很好的实用性、灵活性和较高的计算效率。

(下转第1238页)

制器等模块。其中时延及多普勒调制器可用数字射频存储器(DRFM)实现,以完成对雷达脉内调制射频信号的复制和时延控制。值得一提的是,随着数字信号处理(DSP)技术的发展,利用软件无线电技术(Software Defined Radio)模拟产生各种所需复杂信号,比如杂波信号,具有很多优越性,是未来信号模拟的一大仿真方向。

同样,为保证仿真的精度,雷达信号环境仿真设备不能放大各种信号模型的误差,也即对物理效应设备从论证、设计阶段起就需进行校核工作。另一方面,物理效应设备所能达到的精度指标反过来又制约着信号模型的准确性,因为仿真模型最终是通过物理效应表现出来的。在性能不高的情况下,物理效应设备自身带来的误差可能早已使仿真模型的精度变得毫无意义。

对雷达信号环境仿真设备而言,重点论证的指标应包括信号的幅度、相位控制精度和范围,信号时延、多普勒频率控制精度和范围,模拟信号的瞬时带宽,还应包括信号质量指标如相噪、杂散、谐波等。目前采用 DRFM 模拟雷达目标的水平大致在几百兆带宽内,杂散电平 $<-30\sim-50\text{dBc}$,相噪 $<-70\sim-90\text{dBc/Hz}@1\text{KHz}$ 。基本可满足仿真目标模型的要求。

以上分析了雷达对抗仿真系统中的几种重要模型的建模方法和可信性要求,

可以看出,注入式雷达对抗仿真系统的几种主要模型的可信度要求从高到低可如下排序:

天线模型、目标和杂波模型、干扰信号模型、平台(飞机、导弹)的运动模型等

从以上对雷达对抗仿真系统模型的可信度分析中可以得出以下结论:

(1) 可信度与仿真模型的用途有关,仿真结果的偏差不能大到影响其有用性的程度。

(2) 可信度评估内容主要包括如下既相互区别又相互联系三个方面:

仿真模型校核,即是否正确地建立了模型?强调准确性;

仿真模型验证,即是否建立了有效的模型?强调逼真性;

仿真模型确认,即是否信赖仿真模型和仿真结果?

(3) 可信度要求,尤其是校核和验证的要求对处于不同环节中的模型可以不同。

(4) 应将 VVA 过程贯穿于仿真系统研究的全生命周期中,使之成为仿真工程的有机组成部分,不能等工程结束后才进行。

(5) 半实物仿真中,仿真模型校核不仅仅是要校核计算机仿真模型,还应包括仿真系统中的物理效应设备。

(6) 半实物仿真中,仿真模型的可信度要求要综合考虑物理效应设备的技术可行性和所需费用。

(7) 对被试品的仿真模型和对物理环境仿真模型的可信度需求是有差别的,导致对它们的 VV,尤其是模型验证的要求有所不同。

(8) 一般说来,仿真设备性能越高越能保证仿真的精度,但在工程实践中,不能以此为原则,仿真模型和物理效应仿真设备的置信度水平是相互制约的,盲目追求其中一项的仿真精度是没有意义的。

4 结论

本文介绍了雷达对抗仿真系统的基本组成、功能,重点对仿真系统中几种仿真模型的建立方法和 VV 要求进行了分析。提出在工程应用中,对不同模型应有不同的校核和验证的要求,需要根据仿真试验的目的和需求,物理效应设备能达到的技术水平,以及系统建设费用做具体分析。

参考文献:

- [1] 黄柯棣,查亚兵.系统仿真可信性研究综述[J].系统仿真学报,1997,9(1):4-9.
- [2] Defense Modeling and Simulation Office (DMSO). Verification, Validation and Accreditation (VV&A) Recommended Practices Guide[R]. <http://www.dmsomil/>. November 1996.
- [3] 张伟,王行仁.仿真可信度[J].系统仿真学报,2001,13(3):312-314.
- [6] Godara L C. Application of antenna arrays to mobile communications: Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations [J]. Proc. IEEE, 1997, (8): 1193-1245.
- [7] Del R E, Fantacci R, Marabissi D, *et al.* Low complexity selective interference cancellator for a WCDMA communication system with antenna array [A]. San Antonio: GLOBECOM[C], 2001, 1: 480-484.
- [8] 戎璐,谢剑英,伍守豪.智能天线中两类波束形成技术的比较[J].通信技术,2002,122(2):34-37.
- [9] 戎璐,谢剑英.码分多址移动通信系统中一种新智能天线结构[J].上海交通大学学报,2003,37(3):316-319.
- [10] Rong L, Xie J Y. Impact of WCDMA Channel Multiplexing on Smart Antenna Systems [A]. Journal of Systems Engineering and Electronics [J], 2003, to be appeared.
- [11] Rong L, Xie J Y. Low-complexity blind algorithm for CDMA adaptive arrays [J]. Electronics Letters, 2003, 39(1): 124-125.
- [12] 戎璐,谢剑英.一种低复杂度空-时选择性干扰消除方法[A].通信技术,2003.
- [1] Shin E S, Park Y O. Design and analysis of a smart antenna system for IMT-2000 W-CDMA [A]. Houston: IEEE VTC 49th[C], 1999, 3: 2109-2112.
- [2] 李建新,刘乃安,刘继平编.现代通信系统分析与仿真-MATLAB通信工具箱[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000.
- [3] Liberti J C, Jr, Rappaport T S. Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications [M]. NJ: Prentice Hall PTR, 1999, 193-214.
- [4] Lee J S, Miller L E. 许希斌等译. CDMA 系统工程手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2001,75-84
- [5] Slock Dirk T M. On the convergence behavior of the LMS and the normalized LMS algorithms [A]. IEEE tran. Signal Processing [J], 1993, 41(9): 2811-2825.

(上接第 1234 页)

参考文献:

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>