

微波暗室中基于开关切换的动态干扰仿真方法

高颖¹, 姜涛², 王阿敏¹, 郭淑霞³

(1. 西北工业大学 航海学院, 710072 西安; 2. 中国电子科技集团第十研究所, 610031 成都;

3. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 710065 西安)

摘要: 为了准确实时复现航空通信系统数据链路中复杂电磁空间环境, 本文进行了动态干扰仿真. 在静态暗室中设计一种能模拟真实飞行过程抗干扰的半实物仿真系统, 并分析了航空通信系统数据链路的特性. 在微波暗室中复现动态干扰时, 通过微波仪表的控制实现电磁空间环境动态干扰的映射构建. 采用参数化模型表征技术实时建立相应的动态干扰模型, 并利用最小均方值方法设计出与其匹配的干扰切换的输出算法, 利用动静结合的方法仿真实现了微波暗室中通过静态喇叭模拟动态干扰模拟功能. 验证结果表明, 采用本文的方法能够逼真的反映飞行器在真实环境下所受动态干扰的影响, 该仿真系统的研究对提高航空通信系统数据链路的抗干扰性能具有参考意义.

关键词: 场景映射; 微波开关切换; 动态干扰模拟; 仪表驱动; 抗干扰性能

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)03-0104-06

Dynamic interference simulation method based on switching in the microwave chamber

GAO Ying¹, JIANG Tao², WANG Amin¹, GUO Shuxia³

(1. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China;

2. 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 610031 Chengdu, China;

3. Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, 710065 Xi'an, China)

Abstract: To accurately and real-time reproduce complex electromagnetic space environment of aeronautical communications system data link, the dynamic interference was simulated. A semi-physical simulation system is designed to simulate the real flight's anti-interference in static microwave chamber, then the characteristics of aeronautical communications system's data chain is analyzed, when reproducing the dynamic interference in the anechoic chamber, the electromagnetic space environment's dynamic interference mapping is achieved through the control of microwave instruments. The corresponding dynamic interference model is built in real-time by using the parametric model characterization techniques, and its matching output switching interference algorithm is designed by using the least mean square method. Thus, the function of simulating the dynamic interference through a static radio trumpet in the microwave chamber is realized by the method of combining static and dynamic simulation. Finally, the verification for anti-interference performance shows that the dynamic interference's impact on the aircraft can be realistically reflected by the method of simulating dynamic interference in the anechoic chamber based on the microwave switch. The study of the simulation system can greatly improve the anti-interference performance of aeronautical communications system data chain.

Keywords: scene mapping; microwave switching; dynamic interference analog; instrument drive; anti-interference performance

收稿日期: 2012-12-21.

基金项目: 武器装备部重点预研基金资助项目(9140A04020212 HK03010).

作者简介: 高颖(1965—), 男, 副教授.

通信作者: 高颖, gaoying@nwpu.edu.cn.

随着电磁空间环境越来越成为制约航空通信系统发展趋势的关键因素, 越来越多的学者对电磁空间环境的模拟仿真进行细致而详尽的研究. 文献[1]是以王汝群的电磁空间环境理论为基础

进行的理论研究,没有生成模型和进行仿真验证;文献[2]对以雷达为主体构成的电磁空间环境进行了建模和仿真;文献[3]是围绕复杂电磁空间环境中的动态背景信号,基于“软件无线电”的思想进行设计与实现;文献[4]针对战术通信训练电磁环境特点,提出了应用抛物型方程和神经网络对电磁环境模拟仿真的方法;文献[5]提出了复杂电磁空间环境的构建方法,构造了复杂电磁环境仿真涉及的主要数学模型;为了更加真实的模拟航空通信系统的动态干扰,文献[6]利用微波暗室模拟仿真复杂电磁空间环境,并指出微波暗室的设计规则与测试方法;文献[7]将微波暗室改造为多发射天线测试环境,提出一种基于已有微波暗室相关结构限制条件下的、接收机所接收卫星导航信号模拟环境的 DOP 值计算方法;文献[8]开发和演示 1 个可扩展的计算机电磁环境仿真软件,解决现实的物体和复杂的几何结构的雷达电磁环境的散射截面;文献[9]在微波暗室中对电磁干扰进行了系统的模拟仿真,并评估了干扰对于通信系统的性能影响;在模拟复杂电磁空间环境中的动态干扰时,文献[10]完成了微波暗室运动平台的机械结构、控制系统、软件及通信系统的设计,并对系统指标进行了实验检验。

综上可知,利用微波暗室来模拟仿真复杂的电磁空间环境已经成为主流趋势,相应的理论与算法也日趋成熟,但是在实现动态干扰仿真时,文献[3]存在频率范围过窄,实时信号处理能力较弱的不足,而文献[10]是通过改变微波暗室运动平台的机械结构来实现动态干扰模拟,虽然更为逼真的再现动态干扰过程,但付出的暗室改造成本过高,难以推广。本文基于静态辐射天线的微波

暗室,设计了能模拟真实飞行过程中抗干扰的半实物仿真系统,在微波暗室中复现动态干扰时,通过动态切换微波开关来调整信号模拟的输入输出,从而真实实时的模拟每一时刻(仿真节拍)的飞行器接收到的干扰与通信信号,并通过实验结果来验证通过动态微波开关的切换可以更准确、实时的再现航空通信系统面临的复杂电磁空间环境,最后对其抗干扰性能进行验证。结果表明,采用基于微波开关切换的暗室中动态干扰仿真方法的抗干扰性能优于静态不动的干扰仿真方式,可满足准确实时复现航空通信系统数据链路中的复杂电磁空间环境动态干扰的需求。

1 半实物仿真系统组成

微波暗室半实物环境模拟电磁空间环境方法的逼真度仅次于外场全实物模拟,它由微波暗室、射频信号辐射器、射频信号产生器、计算机系统及监视系统等部分组成,可为辐射无线电骚扰(EMI)和辐射敏感度(EMS)测量,利用微波暗室能更加逼真的复现航空通信系统数据链路中的复杂电磁空间环境。本系统基于微波暗室的半实物仿真的系统如图 1 所示。

基于微波暗室的半实物仿真系统硬件组成以总控机为核心,通过 16 口的光纤通信模块连接发射机、评估机、接收机及 8 个干扰模拟源设备,并通过 8 入 8 出的微波开关将各个干扰模拟设备生成的干扰信号,根据与其匹配的干扰切换的输出算法,有选择性的映射到综合性能测试的微波屏蔽暗室里面的辐射天线上,完成整个航空通信系统数据链路工作过程中面临的动静态干扰模拟的仿真过程^[11]。

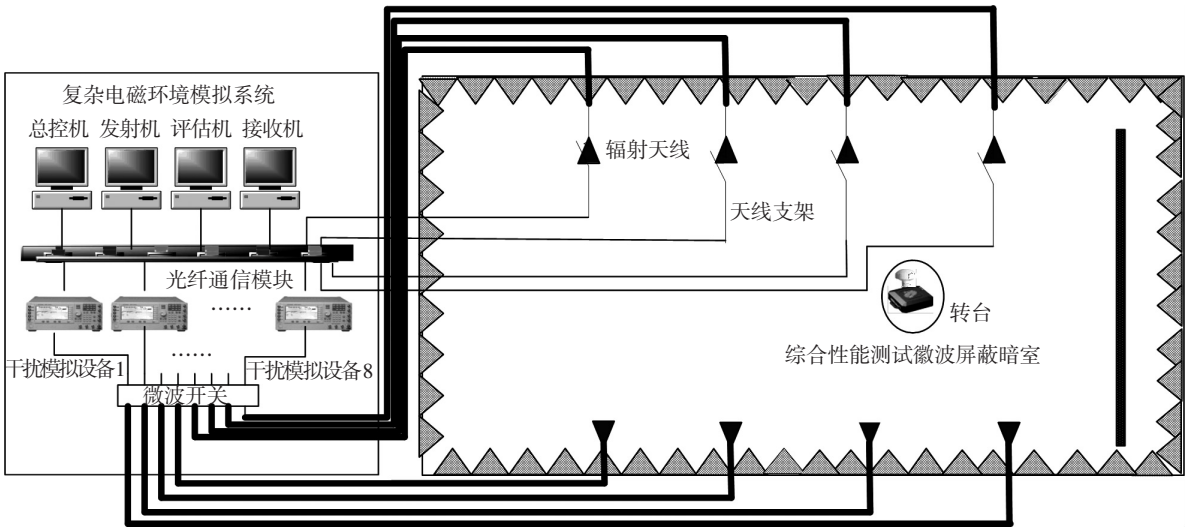


图 1 基于微波暗室的半实物仿真系统

2 微波暗室中的复杂电磁环境场景映射

基于微波暗室的半实物电磁空间环境的干扰仿真系统,通过软件界面可快速的构建用户指定的飞行器模拟通信过程中的干扰场景,并实时传递干扰信号参数到微波仪表,进行飞行器与干扰的位置及功率信息的模拟,完成干扰在微波暗室的逼真实时复现.本系统的仿真流程如图 2 所示.

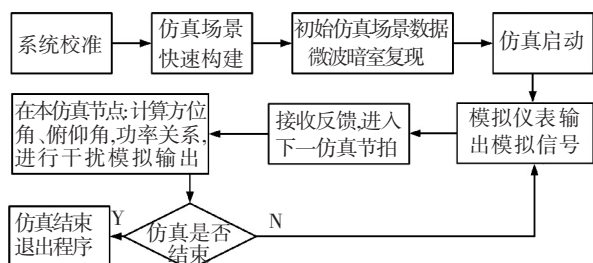


图 2 基于微波暗室的半实物仿真系统流程图

基于微波暗室的半实物电磁空间环境的干扰仿真系统,首先从系统校准开始,包括计算各路信号模拟的功率补偿、系统误差等.然后通过二维图标操作的交互手段,用户可快速构建指定的仿真场景,设置场景的初始化信息.同时,依据初始仿真场景数据进行系统的初始化设置:1)计算各干扰与飞行器之间的相对位置关系(方位角、俯仰角),功率关系,并进行干扰其他参数值的设置、选择干扰的模拟设备;2)根据系统校准数据,设定各路信号(干扰、遥控信号)模拟的功率补偿值.仿真启动后,控制模拟仪表按相应的参数设置输出模拟信号,并接收各仪表的执行反馈,进入下一仿真节拍,其中在 1 个仿真节拍中系统仍然计算各干扰与飞行器之间的相对位置关系(方位角、俯仰角),功率关系,控制微波开关切换至相应的辐射天线,设置新的功率参数,进行干扰模拟输出,直至整个仿真节拍的结束.

2.1 仿真场景的快速构建

整个系统的仿真场景设置,可通过对飞行器、干扰、地面站等二维图标的点击,快速地在大地形中进行设置,并可通过拖曳或手动输入设置它们的位置信息及各自的航迹、速度等动态信息,从而完成 1 个动态干扰的仿真场景搭建.其效果示意图如图 3 所示^[12].

2.2 多种模式的仿真设置

针对不同数据及相应的仿真需求,系统采取多种模式的仿真设置^[12],包含了数字式仿真和非数字式仿真,其中这两部分都包含了仪表模拟和实物模拟,系统仿真模式如图 4 所示.

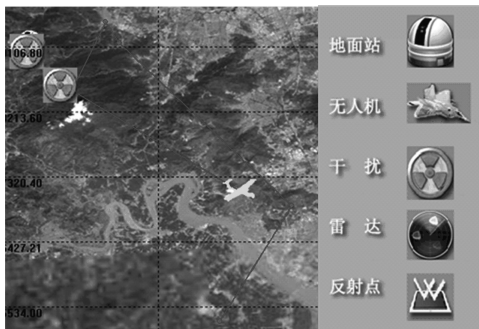


图 3 仿真场景的快速构建示意图

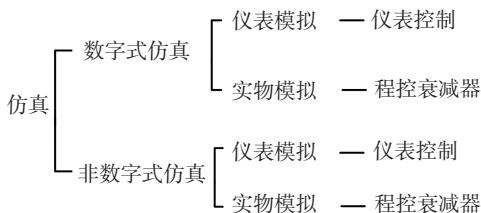


图 4 多种仿真模式

1)数字式仿真.数字式仿真提供开放的数字式仿真接口,通过导入数字式的仿真数据,完成对测试场景的构建,对相关参数进行设置,并结合微波暗室等实物动态切换仿真过程中的开关,达到逼真复现数字式仿真过程与结果.

2)非数字式仿真.非数字式仿真包含了仪表模拟和实物模拟,非数字式仿真要求用户根据需求完成对仿真场景及相关参数的初始化设置,并结合微波暗室等实物,动态切换仿真过程中的开关,达到逼真复现非数字式仿真过程与结果.

3)仪表模拟.仪表模拟通过一系列微波仪表(如 SMU200A、E8267D、SMF100A 矢量信号发生器及信号分析仪等)来模拟产生指定参数的干扰信号,并对功率进行实时输出.

4)实物模拟.实物参与的干扰模拟可精确地模拟干扰环境,实物模拟采取电控衰落模拟器来实时模拟生成准确的干扰衰落信号.

3 动静结合动态干扰仿真方法

3.1 动态开关切换模拟动态干扰

在微波暗室中复现航空通信系统面临的复杂电磁环境场景中,各个干扰的位置可以通过主控程序动态的切换微波开关来选择最为接近真实电磁信号辐射的输出,而辐射的功率则要改变干扰的功率设置来达到下一仿真节拍的辐射功率值.

复杂电磁环境模拟控制模块中,多路电磁信号的模拟与动态开关切换输出流程示意图如图 5 所示.

多路电磁信号的模拟与动态开关切换过程中,需要实时解算干扰与地面站相对于航空通信系统的方位角与俯仰角及辐射功率,通过比对角度关系设置功率参数,并通过动态切换微波开关完成干扰

模拟源的干扰信号输出,其场景设置与微波暗室的角度与功率关系映射解算具体步骤如下。

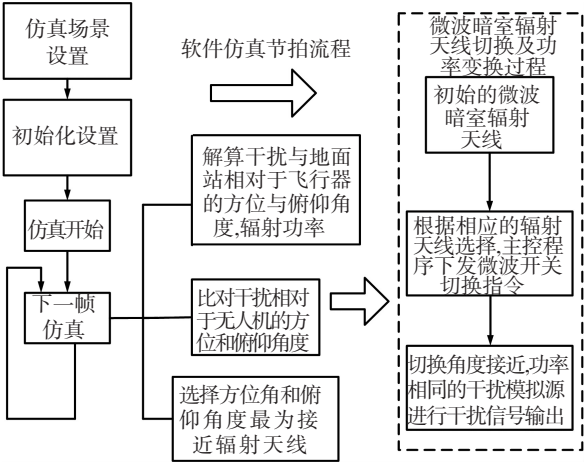


图 5 多路电磁信号的模拟与动态开关切换输出流程图

航空通信系统飞行场景的描述如图 6~7 所示,设置航空通信系统的飞行航道,并放置干扰。系统仿真开始之前,根据场景的初始化信息,代入八路干扰与航空通信系统在电子沙盘坐标系中的坐标值,分别解算出八路干扰相对于航空通信系统的俯仰角,与微波暗室中的辐射天线的俯仰角进行比对,选择最为接近的辐射天线作为此干扰的辐射源输出,在微波开关中切换,关联俯仰角度关系最为接近的场景中干扰模型与微波暗室中辐射天线,依次计算八路干扰的俯仰角,各自完成角度比对,由主控程序进行微波开关动态切换的控制,完成逼近真实干扰的模拟输出。

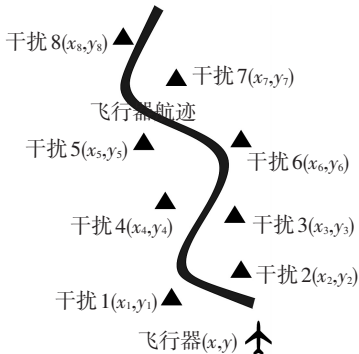


图 6 航空通信系统飞行场景图

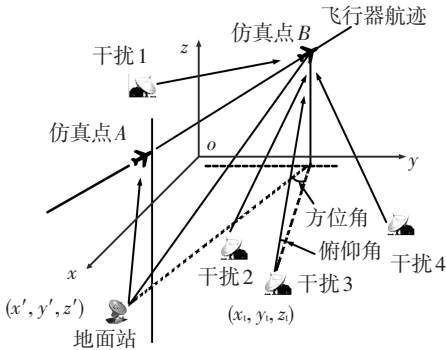


图 7 航空通信系统动态仿真场景

假设航空通信系统当前飞行场景如图 7 所示,以干扰 3 为例进行方位角和俯仰角的计算。航空通信系统当前位置为 (x, y, z) , 干扰 3 当前位置为 (x_1, y_1, z_1) , 地面站当前位置为 (x', y', z') , 定义干扰相对方位角为 θ , 相对俯仰角为 φ , 可以通过计算干扰相对 y 轴的夹角和地面站相对 y 轴夹角之差得到干扰相对方位角, 通过计算干扰和飞机相对位置与 z 轴角度得到相对俯仰角^[13]。

$$\varphi = \arctan \frac{x_1 - x}{y_1 - y} - \arctan \frac{x' - x}{y' - y},$$
$$\sigma = \arctan \frac{z_1 - z}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}}.$$

计算得到航空通信系统与干扰的方位角后,为了完成进一步复现,需要为干扰匹配暗室中方位最优天线,其相关的算法如下:

1) 首先假设 $a[8] = \{10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80\}$ (单位为度) 表示静态喇叭在微波暗室中的角度,而这些角度可以由仿真前人为设定,然后,将实时仿真中输入的干扰相对于飞行器的角度按照大小顺序进行排列,设干扰的个数为 c ,则由实时解算的角度为 $b[c]$ 。

2) 当 $\max(b[c]) < \min(a[i])$, 即实时角度都小于设定角度,或 $\min(b[c]) > \max(a[i])$, 实时角度都大于设定角度时,用实时角度 $b[c]$ 按照由小到大的顺序设定相应的 $a[i]$ 并顺序模拟。

3) 当 $b[c]$ 中有实时角度在 $a[i]$ 区间内,则通过计算每个实时角度与设定角度的最小均方值,取其最小值,如下式所示:

$$\min \left(\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{c-1} \sum_{n=0}^7 (b^2[m] - a^2[n])}{(c-1) \times 7}} \right).$$

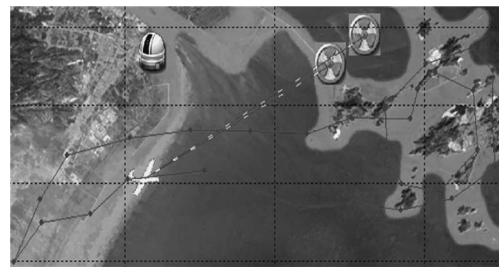
式中:匹配相应的 $b[m]$ 与 $a[n]$, 则实时第 m 个角度可由第 n 个设定角度模拟,得到最佳的仿真效果。

4) 最后,通过实时切换微波开关,将对应的实时角度的干扰与设定角度的辐射天线关联。此算法完成了航空通信系统与干扰之间位置的相对比较,实现了 8 入 8 出微波开关的动态切换功能,其开关切换显示效果如图 8 所示。

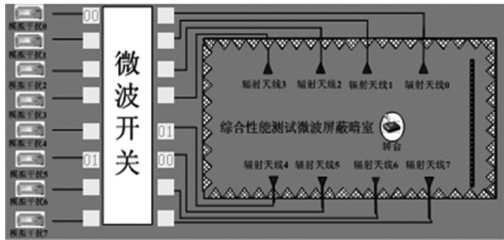


图 8 微波开关动态切换示意图

图 9 和图 10 分别为仿真环境下 t_0 时刻(微波开关切换前)与 t_1 时刻(微波开关切换后)干扰的辐射输出场景映射的效果示意图。

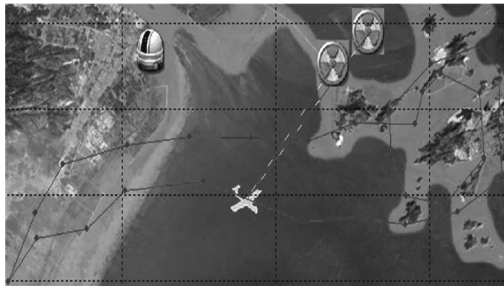


(a) 干扰辐射的场景映射图

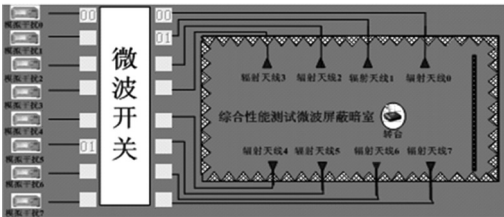


(b) 微波开关切换状态图

图 9 t_0 时刻(微波开关切换前)干扰的辐射输出场景映射图



(a) 干扰辐射的场景映射图



(b) 微波开关切换状态图

图 10 t_1 时刻(微波开关切换后)干扰的辐射输出场景映射图

复杂电磁环境模拟完成对多路、不同形式的电磁信号的模拟与控制。随着仿真的进行,在对多路电磁信号的模拟过程中,干扰与信号源相对于飞行器的相对位置关系(方位角与俯仰角)与对飞行器机载接收端的辐射功率在变化,所以在整个仿真的每个节拍中干扰与信号源的位置与功率都需要不断的调整。

在系统仿真过程中,仿真的每一帧在飞行器接收机端,干扰与通信信号的功率随着飞行器飞行仿真而实时动态变化,通过研究实时动态的功

率解算公式可提供准确的干扰与通信信号的功率值^[14],为飞行器在复杂电磁环境中的抗干扰性能评估提供功率基础。

以下的功率解算公式,提供实时动态的干扰或通信信号到飞行器接收机端的功率值。

$$P = a + b + 20\lg(3 \times 10^8 / f_{\text{WaveFreq}}) - 20\lg(4\pi) - 20\lg(f_{\text{Meter}}).$$

其中: a 表示设定的发送功率; b 表示发射天线增益; f_{WaveFreq} 表示载波频率; f_{Meter} 表示飞行器与信号源(干扰源或通信信号地面站等)的距离。

3.2 基于脚本的仪表驱动技术

由于系统模拟了多路干扰信号与通信信号,而对其进行模拟,则需采用多个多种的微波仪表设备,因此,本系统中针对不同的干扰类型对应不同的仪表,软件智能显示可用仪表,并通过比对相同名称的仪表名与脚本名来给相应的仪表加载匹配的脚本文件^[15],此脚本文件包含大量的仪表驱动时的参量及驱动仪表的指令。

本系统在数据库中定义了多种干扰类型所相应的仪表类型,如图 11 所示。

表 "InstruSelect" 中的数据,位置是 "DIZ数据库" 中, "(LOCAL)" 上								
comm_send	comm_recv	mainline	noise	noise	pulse	swep	vspe	
SWI00A	no	SWI00A	SWI00A	SWI00A	SWI00A	SWI00A	SWI00A	
BIG0TD	no	BIG0TD	no	BIG0TD	no	BIG0TD	BIG0TD	
no	FSQ-26	no	no	no	no	no	no	
SWF100A	no	SWF100A	SWF100A	SWF100A	SWF100A	SWF100A	SWF100A	
SWA100A	no	SWA100A	SWA100A	SWA100A	SWA100A	SWA100A	SWA100A	
*								

图 11 数据库中定义的微波仪表及可模拟的干扰类型

针对不同的干扰及信号,分别由不同的仪表类型来驱动,选择仪表后会调用相应仪表的脚本程序,如图 12 所示。加载对应仪表的驱动脚本,进一步节省系统的处理时间,提高系统相应速度,提升微波仪表的实现模拟效率,完成仪表的有效管理。

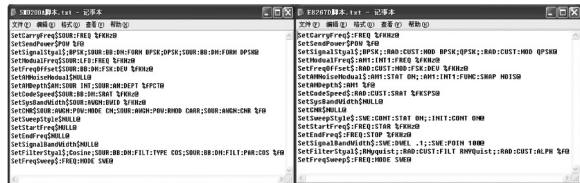


图 12 可供微波仪表驱动的程序脚本

4 实验仿真结果

仿真场景设定为飞机按照大陆-海洋-半岛的飞行仿真路线,实时与地面站进行通信,同时,分布三路干扰分别位于沿海陆地、海洋上及海洋岛屿中,三路干扰类型为脉冲干扰、脉内线性干扰及其他混合干扰,其随着通信信号与干扰之间信噪比变化,呈现出来的误码率关系如图 13 所示。

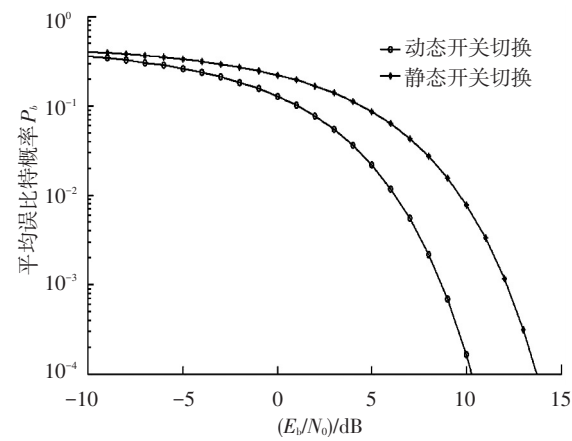


图 13 动态开关切换与静态开关切换的误码率

由于仿真初始化时, 干扰的实时角度与设定角度差距较大, 所以其误码率偏高, 而随着仿真的进行, 飞行器与干扰的角度逐渐趋于稳定, 则其误码率迅速下降. 而利用动态开关切换控制动态干扰的模拟, 与静态开关切换的误码率对比, 在相同的电磁空间环境仿真场景与干扰分布环境下, 利用动态微波开关切换的仿真方式, 随着信噪比的增大, 呈现误码率明显减小的趋势, 并且对比传统的静态开关切换的方式, 整个航空通信系统的误码率有明显的下降.

4 结 论

1) 基于微波暗室完成了半实物仿真系统组建, 用于模拟电磁空间环境, 通过对各种仿真场景的快速构建, 本文中系统可实现多种模式的仿真, 控制微波仪器、开关及程控衰减器等物理硬件可更加逼真实时的再现复杂电磁空间特性.

2) 在静态暗室中模拟动态干扰时, 设计了基于最小均值的干扰匹配输出算法, 可实时在每一仿真节拍中通过控制微波开关切换, 达到较好的动态干扰模拟效果, 并与静态的干扰输出算法进行了比较, 结果表明基于微波开关切换的动态干扰模拟方法在降低通信系统误码率的条件下, 实时逼真性也得到保障.

3) 由于系统中采用了多种的微波仪器, 因此针对不同的干扰及信号, 可分别由不同的仪表类型来驱动, 本文设计了相应仪表的脚本程序, 加载对应仪表的驱动脚本, 能进一步节省系统的处理时间, 提高系统相应速度, 提升微波仪表的实现模拟效率, 完成仪表的有效管理.

参考文献

[1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 2006: 28-45.

[2] 王晶, 李智, 来嘉哲, 等. 虚拟战场电磁环境构建方法研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(6): 11-16.

[3] 张静. 战场复杂电磁环境模拟系统的研究[D]. 山东: 山东大学, 2008: 6-18.

[4] 赵红宙, 于赛发, 赵颖坤. 战术通信训练电磁环境模拟与仿真研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(8): 175-177.

[5] 程健庆, 余云智. 信息化战场条件下复杂电磁环境仿真建模技术[J]. 舰船电子工程, 2008, 170(8): 152-156.

[6] 肖本龙, 王雷钢, 杨黎都. 微波暗室吸波材料及其性能测试方法[J]. 舰船电子工程, 2010, 193(7): 161-165.

[7] 李隽, 王振华. 基于微波暗室多天线发射测试环境的DOP值计算方法[C]//第二届中国卫星导航学术年会电子文集. 上海, 2011: 325-328.

[8] NAMBURU R R, MARK E R, CLARKE J A. Scalable electromagnetic simulation environment[J]. CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2004, 5: 443-453.

[9] RAJAMANI V. Establinshing probability of failure of a system due to electromagnetic interference[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 2010: 65-78.

[10] 贡志锋. 微波暗室运动平台系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 5-18.

[11] KUNTHONG J, BUNTING C F. Statistical characterization of the 900 MHz and 1800 MHz indoor propagation using reverberation source stirring technique[C]//International Symposium on Antennas and Propagation. Charleston, SC, 2009: 3243-3246.

[12] HILL D A. Electromagnetic fields in cavities[M]. Hoboken, NJ: Wiley Publications, 2009: 89-105.

[13] NICOLI M, FERRARA S, SPAGNOLINI U. Soft-iterative channel estimation: methods and performance analysis[J]. IEEE Trans. Signal Process, 2007, 55(6): 2993-3006.

[14] HALLBJORNER P, CARLBERG U, MADSEN K, et al. Extracing electrical material parameters of electrically large dielectri objects from reverberation chamber measurements of absoption cross section[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(2): 291-303.

[15] RAJAMANI V, BUNTING C F, WEST J C. Calibration of a numerically modeled reverberation chamber[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Austin, TX, 2009: 87-91.

(编辑 张 宏)