

# 基于 Simulink 的多径失真之卷积分析消除法 及其虚拟仿真教学探索

杨宗长

(湖南科技大学 信息与电气工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**作为一种积分变换的数学方法,卷积是信号与系统理论的重要内容。伴随信息技术的发展,计算机仿真在科学研究以及教育教学中得到广泛应用。针对卷积分析法及其应用,以无线通信系统中多径传输失真问题为例,设计了其基于卷积分析的失真消除方法及其 Simulink 环境的虚拟仿真教学。在 Simulink 可视化仿真环境中,以直观框图的形式构建其仿真模型并进行实验验证,增强了教学的直观性。仿真实验结果以及教学实践反馈表明:通过设计“逆系统”,回波干扰影响可以被明显削弱,多径失真得到有效校正,其建模设计与仿真过程直观明了。该教学设计与内容在近年来的“信号与系统”课程教学实践中反馈良好。

**关键词:**计算机化教学;虚拟仿真;卷积分析;逆系统;Simulink

**中图分类号:**G434 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-5884(2018)03-0063-06

卷积或称褶积,是一种积分变换的数学方法,它是信号系统理论的重要内容。随着信号与系统理论研究的深入以及计算机技术的发展,卷积方法在现代信号处理技术的多个领域得到了广泛应用,如通信系统、地震勘探、超声诊断、光学成像、系统辨识等方面都在借助卷积方法解决问题<sup>[1]</sup>。在无线电波传播信道中,由于建筑、山峰以及地面等物体存在,常有许多时延不同的传输路径,形成多径信号。无线通信中的多径效应(multipath-effect)<sup>[1]</sup>是指电波传播过程中,由于信道存在多径传输现象而引起的一种干涉延时效应而导致传输失真。多径传输现象及其效应是通讯传输中一个常遇到的基本问题<sup>[2-4]</sup>。多径效应对于数字通信、雷达最佳检测等,都有着十分严重的影响。

针对卷积分析法与实际应用,以上述多径传输失真问题为例,本文设计了其基于卷积分析的失真消除方法以及其 Simulink 虚拟仿真教学。利用“解卷积”分析法<sup>[1,5-8]</sup>,可设计“逆系统”,采用

逐步修正的方法,来降低或消除回波影响,以达到降低或消除多径失真。同时,应用计算机仿真技术,使用 MATLAB/Simulink 的图形交互式仿真环境<sup>[9-12]</sup>,可以用直观框图的形式来构建其仿真模型并进行验证,以达到增强教学的直观性、生动性。目前, MATLAB 已成为当今国际主流的计算与仿真软件之一<sup>[12]</sup>。它是由全球著名的科学计算与仿真建模软件公司即 Mathworks 发布,旨在为工程设计、科学研究以及数值计算等诸多众多科学领域及工程应用提供一种强大而快捷的解决方案。在其集成开发环境中,它将科学数据可视化、数值分析、矩阵计算以及系统建模与仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中,其便捷性可以使用户在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言(如 C, Fortran)的编辑模式。尤其是其可视化、图形交互式的模型输入计算仿真环境即 Simulink 的出现,为 MATLAB 推广与应用起到了极其重要的推动作用。在 MATLAB/Simulink 可视化仿真环境中,它提供了丰富的功

能模块,允许用户用框图的形式搭建起任意复杂的系统,从而对之进行准确有效的系统建模与仿真实验<sup>[9-12]</sup>。

## 1 问题描述与方法设计

在无线通信系统中,当接收机从正常途径收到发射信号时,由于还存在类似所谓“回声”现象(如图1)。例如,发射机经某些建筑物反射到达接收端,会产生所谓“回声”现象;或如,当人们在室内进行录音或讲话时,除了直接进入麦克风的正常信号外,经墙壁反射的信号也可能被采集录入,这也是一种“回声”现象<sup>[1]</sup>。

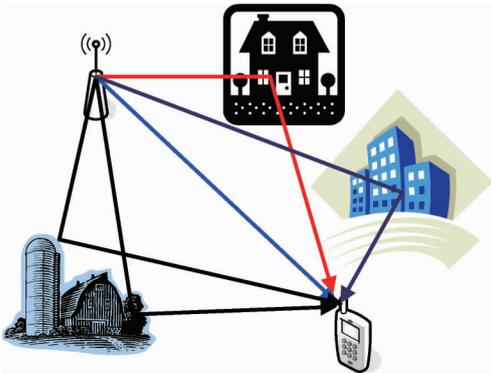


图1 无线通信环境中的多径传输

为研究此类多径传输现象,需建立数学模型。我们首先考虑简单情况,即可定义一个接收信号 $r(t)$ ,它包括了正常传播信号 $e(t)$ 与某一回波分量 $a \times e(t-T)$ 二者之和<sup>[1]</sup>,即

$$r(t) = e(t) + ae(t - T) \quad (1)$$

其中, $T$ 表示由于该回波路径的引入而导致传输延时,其系数 $a < 1$ ,表示回波路径对信号强度所产生的衰减。例如,当 $T=100 \text{ ms}$ 量级, $a \times e(t-T)$ 将是人耳能感觉到、可区分的回声。

由式(1),设 $e(t) = \delta(t)$ ,可知,该简单的回波系统的冲激响应表达式 $h(t)$ 为

$$h(t) = \delta(t) + a\delta(t - T) \quad (2)$$

更一般地,若传输环境存在更多的附加路径,那么此数学模型可以进一步表示为<sup>[1]</sup>

$$r(t) = \sum_{m=0}^N a_m e(t - T_m) \quad (3)$$

同理,设 $e(t) = \delta(t)$ ,那么该多回波系统的冲激响应表达式为

$$h(t) = \sum_{m=0}^N a_m \delta(t - T_m) \quad (4)$$

一般地,对于多径传输而言,根据信号与系统原理<sup>[1]</sup>,系统所收到的信号,等于在原激励(即输入信号) $e(t)$ 作用下而得到的系统(零状态)响应 $r(t)$ ,故其卷积表达式为

$$r(t) = h(t) * e(t) \quad (5)$$

其中,\*表示卷积运算符。如何从上述含有(由多径传输导致)干扰信号的回波系统中,恢复抽取出原信号 $e(t)$ ,我们可以设计一个“逆系统”(见图2)进行所谓“补偿”<sup>[1]</sup>。此时设“逆系统”的冲激响应为 $h_i(t)$ ,可得:

$$\begin{aligned} r(t) &= h(t) * e(t) \xrightarrow{\text{设计逆系统 } h_i(t)} \Rightarrow \\ e(t) &= r(t) * h_i(t) = [h(t) * e(t)] * h_i(t) = \\ &= [e(t) * h(t)] * h_i(t) = e(t) * [h(t) * h_i(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

因为 $e(t) = e(t) * \delta(t)$ ,由上式可知,若满足 $h(t) * h_i(t) = \delta(t)$ 的话,可保证原信号 $e(t)$ 被完整无误地恢复出来。

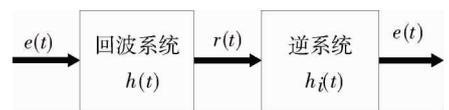


图2 利用逆系统进行信号恢复

由此,设已知 $h(t)$ ,设计“逆系统” $h_i(t)$ ,使得 $h(t) * h_i(t) = \delta(t)$ ,此为“解卷积”<sup>[1-8]</sup>或称“反卷积”。然而,对于连续时间信号与系统,其解卷积的问题,不能导出一般的求解公式,可采用逐步修正的方法求解以达到满意结果。以简单系统 $h(t) = \delta(t) + a\delta(t - T)$ 为例,设 $h_{i1}(t) = \delta(t) - a\delta(t - T)$ ,初次修正可得到:

$$\begin{aligned} h(t) * h_{i1}(t) &= [\delta(t) + a\delta(t - T)] * [\delta(t) - \\ &= a\delta(t - T)] = \delta(t) - a^2\delta(t - 2T) \Leftrightarrow \\ h(t) * h_i(t) &= \delta(t) \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $a < 1$ ,初次修正所得回波 $a^2\delta(t - 2T)$ 较 $a\delta(t - T)$ 的强度有所衰减,且回波分量出现的时刻,推延到 $2T$ 。于是,按照此思路进一步修改“逆系统”,以此类推,可得其“逆系统”的理想表达式为

$$h_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (-a)^k \delta(t - kT) \quad (8)$$

此时,可使得多余的回波被完全清除,即其影响 $\lim_{k \rightarrow \infty} a^k \rightarrow 0 (0 < a < 1)$ ,且出现时刻无限推延(即回波不再出现)。当然,由于此时“逆系统”包含无穷多项,在工程实践中,我们可根据具体的环

境条件,一般取有限项即可。同理,对于更一般的情况,即含有多路回波分量,我们也可以得到其“逆系统”的类似设计(以初次修正为例),如下:

$$h_{ii}(t) = [\delta(t)] - \sum_i a_i \delta(t - T_i) \quad (9)$$

### 2 基于 Simulink 的虚拟仿真教学设计

计算机虚拟仿真首先确认研究对象,然后对系统进行抽象即数学建模,最后基于所建立的系统仿真模型,利用计算机对系统进行虚拟仿真分析与研究。故对计算机虚拟仿真而言,其仿真环境或仿真平台选择非常重要。在 MATLAB 集成开发环境中,它将科学数据可视化、数值分析、矩阵计算以及系统建模与仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中,其便捷性使得使用者可以在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言的编辑模式。在 MATLAB/Simulink 计算仿真环境中,它提供了各种各样的模块,允许用户用框图的形式搭建起任意复杂的系统,从而对之进行准确有效的系统建模与虚拟仿真实验,如图3所示。

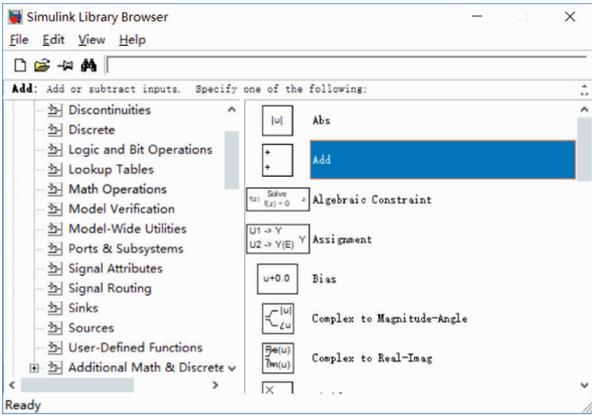


图3 Simulink 仿真环境及其可视化元件库

由此可见,在 MATLAB/Simulink 仿真环境中,可以方便地选择其相应的可视化元件,其元件选取、模型搭建及其仿真非常便捷。以简单系统  $h(t) = \delta(t) + a\delta(t - T)$  为例,设其“逆系统”为  $h_{ii}(t) = \delta(t) - a\delta(t - T)$ , 在 MATLAB/Simulink 仿真环境中,构建其仿真模型如图4所示。其中,选取并使用了下列相关的仿真功能模块:1)“比例器(Gain)”模块;2)“加法器(add)”模块;3)“传输延迟(Transport Delay)”模块;4)“示波器(Scope)”模块;5)“输入信号-正弦信号(Sine Wave)”模块。其中,设置参数:  $e(t) = \sin(\omega_0 t)$  为角频率为  $\omega_0$  的单位幅度正弦波,回波延迟为  $T$

$= 0.5 \text{ s}$ , 回波系数  $a = 0.5$ 。

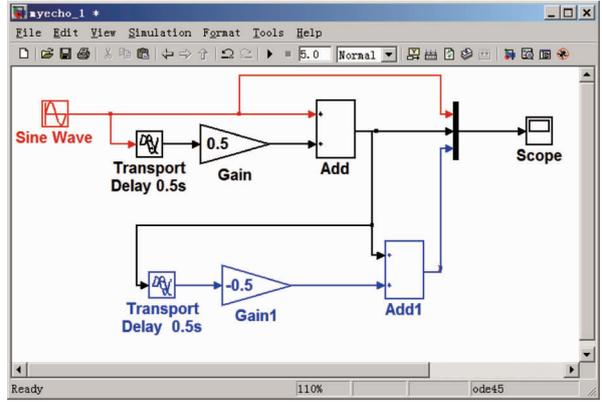


图4 多径效应(回波系统)及消除 Simulink 仿真[  $h_{ii}(t)$  ]

选取不同的角频率  $\omega_0 = 1, 2(\text{rad/s})$ , 其仿真结果如图5和图6所示。图中曲线,左侧由上至下,分别对应:接收(包含干扰回波)信号、修正恢复信号和源信号。由仿真结果可见,通过该“逆系统”的修正,使得回波的干扰影响明显削弱。

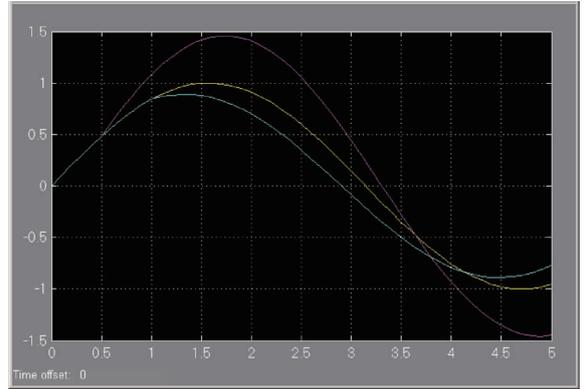


图5 多径效应(回波系统)及消除 Simulink 仿真结果[  $\omega_0 = 1(\text{rad/s})$  ]

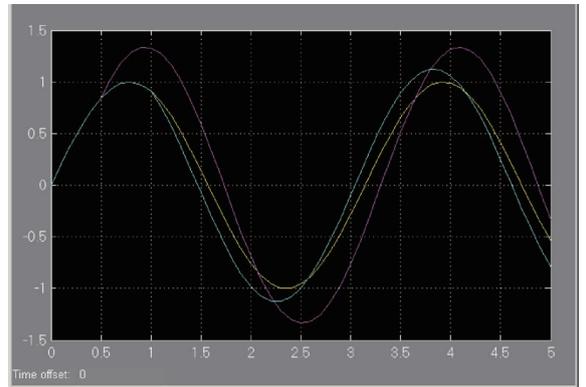


图6 多径效应(回波系统)及消除 Simulink 仿真结果[  $\omega_0 = 2(\text{rad/s})$  ]

当进一步修正(四次修正)并设其“逆系统”

为  $h_{i4}(t) = \sum_{k=1}^4 (-a)^k \delta(t - kT)$  时, 构建其仿真模型以及所得仿真结果如图 7 和图 8 所示。由仿真结果可知, 回波被进一步削弱。

更一般地, 相对于上述系统, 设其回波系统包含更多一路回波分量, 即为包含两路回波分量:

$$h(t) = \delta(t) + a\delta(t - T) + b\delta(t - T_2) \quad (10)$$

其中, 设上述两回波分量的时延和回波系数为:  $a = 0.5, T = 0.5$  和  $b = 0.3, T_2 = 0.8$ 。

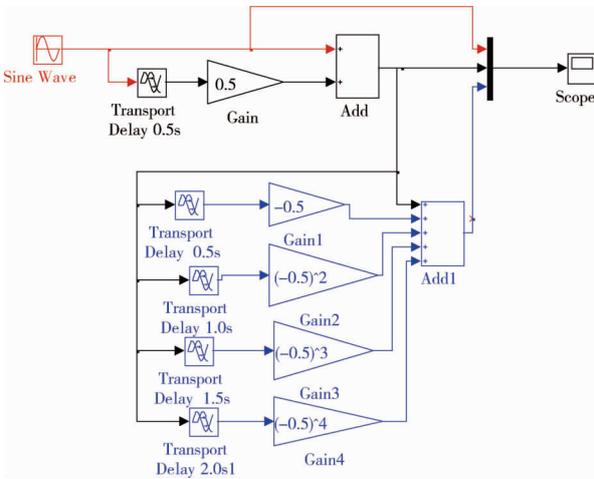


图 7 多径效应(回波系统)及消除 Simulink 仿真 [ $h_{i4}(t)$ ]

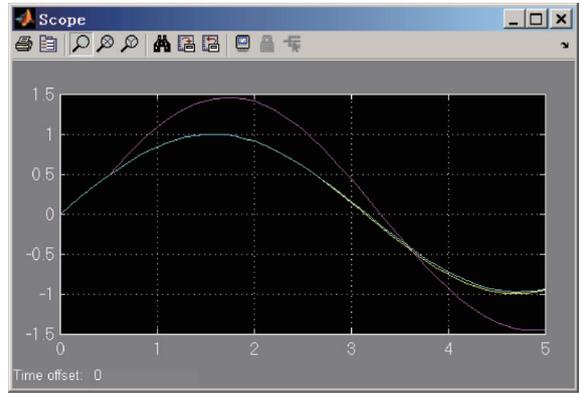


图 8 多径效应(回波系统)及消除 Simulink [ $h_{i4}(t)$ ] 仿真结果 [ $\omega_0 = 1(\text{rad/s})$ ]

同理, 根据式(9)和式(10), 我们亦得到此回波系统及其多径效应消除 Simulink 仿真 ( $h_{i4}(t)$ ) 和实验结果如图 9 和图 10 所示。显然, 此时其“逆系统”分别包含 2 个对应的“子逆系统”为

$$h_{i4}(t) = \sum_{k=0}^4 (-a)^k \delta(t - kT) + \sum_{k=0}^4 (-b)^k \delta(t - kT_2) \quad (11)$$

同理, 对于含更多回波分量的多径效应及其消除法, 根据式(9), 我们可类似设计其“逆系统”进行 Simulink 仿真, 以逐步修正的方法来降低或消除回波影响。

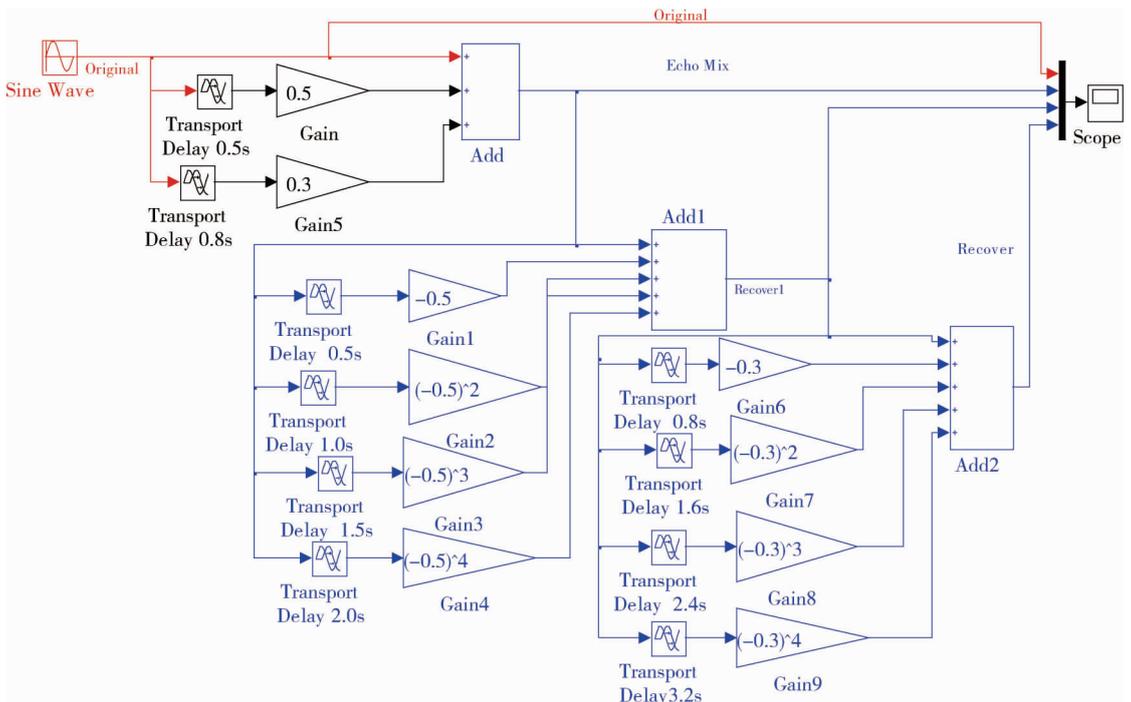


图 9 两分量回波系统[式(10)]及其多径效应消除 Simulink 仿真 [ $h_{i4}(t)$ ][式(11)]

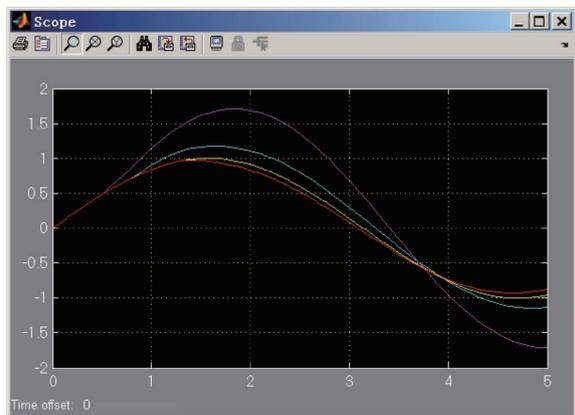


图 10 多径效应(回波系统) (式(10))及消除 Simulink[ $h_{14}(t)$ ] [式(11)] 仿真结果 [ $\omega_0 = 1(\text{rad/s})$ ]

注:上图 10 之“示波器”所示的四路信号,依次分别为所收到回波(混响)信号,通过第一个“子逆系统”所得的恢复信号,通过整个“逆系统”所得的恢复信号,最后一路为原始传输的信号。对比结果可知,该“逆系统”(含两个对应的“子逆系统”)恢复所得的结果,相比于只使用第一个“子逆系统”所得的恢复信号,消除回波的效果有明显改善,因而该“逆系统”设计有效可行。

### 3 教学实践与反馈

卷积及多径失真是信号与通信系统理论中的一个重要内容,其理论性强,概念繁多,且数学推导及运算较多。故在采用互动式、启发式教学的同时,借助计算机多媒体教学手段,在讲授基本概念与理论时,引入了计算机虚拟仿真教学演示方法,避免了完全的纯理论讲授的抽象,在提高学生的兴趣的同时,也加深了学生对概念的直观理解。该教学设计与内容,近年来在作者所讲授的本科生“信号与系统”专业课程中,进行了教学实践。从教学反馈的结果来看,教学内容得到了拓展充实,教学过程更加直观明了,受到学生的欢迎。当然,由于课程教学内容中融合了 Simulink 计算机仿真技术,在激起学生动手操作兴趣的同时,也对学生的动手能力以及教学实践的改革提出了一些新的要求与挑战(见表 1)。

表 1 实践教学反馈与建议

序号	反馈内容	建议与改进
1	拓展、加深了教学内容	加强课前预习、课后复习
2	理论分析与实际应用结合的问题	进一步加强实践教学内容
3	仿真软件 Simulink 的熟悉与操作	加强计算机动手能力的培养
4	计算机仿真技术的发展与应用前景	课后多阅读、思考

从表 2 和图 11 所示 2017 年所任教的学生其相关知识的作业检查(测验)成绩统计结果来看,优良率(含优秀和良好)比较满意,教学达到了预期效果。当然,继续探索、完善教学方法及其教学手段,并进一步提高教学效果,似无止境。

表 2 2017 年相关知识点学生作业检查成绩统计情况

不及格 ( < 60 )	及格 ( 60 ~ 69 )	中等 ( 70 ~ 79 )	良好 ( 80 ~ 89 )	优秀 ( > = 90 )
5	8	18	35	27



图 11 2017 相关知识点学生作业检查成绩统计

### 4 结语

卷积是一种重要的数学运算,它是信号系统理论的重要内容。数字时代的到来,利用计算机对所建立的系统仿真模型系统进行分析与研究的方法,即计算机仿真,为科学研究、工程应用以及教育教学提供一种强有力的辅助工具,其数值计算功能强大,使用便捷直观。针对卷积分析法以及应用,以无线通信系统中多径传输失真为例,即由于多径传输将引起的干涉延时效应即多径效应,会导致传输失真,设计了其基于卷积分析的失真消除法及其 Simulink 虚拟仿真教学。

“解卷积”(“反卷积”)分析法表明:可设计“逆系统”进行所谓“补偿”,以逐步修正的方法来降低或消除回波影响,能达到降低或消除多径失真。MATLAB/Simulink 提供了强大而便捷的图形交互式计算机仿真环境,利用其相关的功能模块,以直观框图的形式构建其仿真模型并进行验证实验,以强化教学的直观性、生动性。Simulink 仿真结果及教学实践反馈结果表明:通过“解卷积”分析而设计的“逆系统”,可以明显削弱回波干扰影响,能达到降低或消除多径失真,即其多径失真得到有效校正。该教学设计与内容,在近年

来的“信号与系统”课程教学实践中反馈良好。然而,进一步提高教学效果,似无止境,且行且思。

### 参考文献:

- [1] 郑君里,应启珩,杨为理. 信号与系统(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [2] Jerzy Domzal, Zbigniew Dulinski, Mirosław Kantor, et al. A survey on methods to provide multipath transmission in wired packet networks [J]. Computer Networks, 2015 (11):18-41.
- [3] Cheng Cheng, Jean-Yves Tournet, Quan Pan, et al. Detecting, estimating and correcting multipath biases affecting GNSS signals using a marginalized likelihood ratio-based method [J]. Signal Processing, 2016 (1): 221-234.
- [4] Yin X, Wu D, Wang Z, et al. DIMR: Disjoint Interdomain Multipath Routing [J]. Computer Networks, 2015 (14):356-375.
- [5] 陈后金. 信号与系统[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [6] 管致中,夏恭恪,孟桥. 信号与线性系统(第4版)[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [7] 曾禹村,张宝俊. 信号与系统[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [8] Oppenheim A V. Signals and Systems(中译本)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [9] Orion Zavalani. Computer-based simulation development of a design course project in electrical engineering [J]. Computer Applications in Engineering Education, 2015(4):587-595.
- [10] Behrooz Vahidi, Ehsan Esmaeeli. MATLAB-SIMULINK-based simulation for digital differential relay protection of power transformer for educational purpose [J]. Computer Applications in Engineering Education, 2013(3):475-483.
- [11] Recai Kili, Fatma Dalkiran. Utilizing SIMULINK in modeling and simulation of generalized chaotic systems with multiple nonlinear functions [J]. Computer Applications in Engineering Education, 2010(4): 684-693.
- [12] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计-MATLAB语言与应用(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社,2012.

## Study of Teaching on the Distortion Elimination for the Multipath-effect Based on the Convolution Analysis: its Virtual Simulation by Employing the Simulink

YANG Zongchang

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The computer-based simulation has been widely applied in a varied range of fields. Based on the convolution analysis, inverse systems in a gradual-amendment approach are introduced to eliminate the multi-path effect in this paper. Besides, its Matlab-Simulink-based implementation and simulation can be achieved in one convenient and vivid way. The Simulink-based simulations show workability of the presented method. The proposed method obtains good feedback results in its teaching application for a basic course of “signals and systems” for undergraduate students.

**Key words:** computer aided instruction; simulation; convolution; inverse systems; Simulink

(责任校对 刘兰霞)