

基于 CPU+FPGA 的临近空间信道模拟器设计

路 辉, 董昕玉

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对临近空间通信信道中的气象性损耗和非气象性损耗进行了理论分析, 着重研究大气吸收损耗、降雨衰减和多径衰落等信道传播特性的建模方法, 建立临近空间信道模型; 提出了一种基于中央处理器 (central processing unit, CPU) 和现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 的临近空间信道模拟器软硬结合实现方案, 并对希尔伯特变换和多普勒频移的实现方法进行分析; 结合卫星导航模拟器和信号发生器产生的实际信号对信道模拟器的性能指标和统计特性进行测试; 实测结果表明, 信道模拟器输出信道衰落的各项统计特性符合理论结果, 信道模拟器可实现分辨率和最大值分别是 5 ns 和 5 115 ns 的多径相对时延以及分辨率和最大值分别是 1 Hz 和 1.6 MHz 的多普勒频移; 该信道模拟器可辅助分析临近空间信道环境对信号传播的影响。

关键词: 临近空间; 信道建模; 信道模拟器; 性能测试

Design of a Near Space Channel Simulator Based on CPU+FPGA

Lu Hui, Dong Xinyu

(School of Electronic Information and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The meteorological loss and non-meteorological loss in near space communication channel are theoretically analyzed. In addition, the modeling methods of channel propagation characteristics such as atmospheric absorption loss, rainfall attenuation and multipath fading are studied, and then a near space channel model is established. A software-hard combination implementation scheme of the near space channel simulator based on central processing unit (CPU) and field-programmable gate array (FPGA) is proposed, and the realization method of Doppler shift and Hilbert transform is analyzed. Combined with the actual signals generated by satellite navigation simulator and signal generator, the performance index and statistical characteristics of channel simulator are tested. The experimental results show that the statistical characteristics of the output channel fading of the channel simulator are consistent with the theoretical results, and the channel simulator can achieve multipath relative delay with resolution and maximum value of 5 ns and 5 115 ns, and doppler frequency shift with resolution and maximum value of 1 Hz and 1.6 MHz, respectively. The channel simulator can assist in analyzing the influence of near space channel environment on signal propagation.

Keywords: near space; channel modeling; channel simulator; performance test

0 引言

临近空间, 一般指距海平面 20~100 km 的空域^[1]。因物理高度和空气密度等因素的影响, 传统的航空器和航天器无法在其间飞行。相较于卫星所在的外层空间, 临近空间更易到达, 同时, 临近空间高于飞机所在的传统空间, 在通信保障、情报收集、侦察监视以及对空对地作战等方面更具优势^[2]。因此临近空间的战略价值与巨大潜力日益引起国际重视。

因临近空间独具优势的物理高度与其包含的平流层环境特性, 与卫星通信、陆地移动通信相比, 临近空间通信的传播损耗和传输时延更小、覆盖范围更广^[3]。临近空间信道模拟器可模拟临近空间通信平台与地面通信终端间的通信链路, 有助于进行基于实验室环境的临近空间通信系统与通信设备的设计测试, 进一步提高临近空间通信的可

靠性与有效性, 节约时间成本与人力物力成本。

目前, 临近空间通信信道的研究多集中于特定波段范围内一种或两种信道传播特性的仿真建模。文献 [4] 针对临近空间低速飞行器构建了 Ka 波段范围内的多径衰落和降雨衰减的统计模型。文献 [5] 通过估算多径信道的参数, 建立了临近空间信道几何仿真模型。文献 [6] 对经典 Lutz 模型进行修订并从多径衰落和降雨衰减两个方面对 Ka 波段通信信道模型进行研究仿真。文献 [7] 基于广义平稳非相关散射 (wide-sense stationary uncorrelated scattering, WSSUS) 假设构造了高动态环境下的平流层多径散射通信信道。

本文在临近空间信道传播特性理论研究与仿真分析的基础上, 建立了综合考虑路径损耗、阴影衰落、多径衰落、大气吸收损耗、降雨衰减的临近空间信道模型, 设计并实现了基于 CPU+FPGA 软硬结合架构的临近空间信道模拟

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-03-05。

基金项目: 国家自然科学基金(61827901)。

作者简介: 路 辉(1977-), 女, 黑龙江肇东人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事无线电导航、信息系统测试与性能评估技术方向的研究。

引用格式: 路 辉, 董昕玉. 基于 CPU+FPGA 的临近空间信道模拟器设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 161-169.

器, 并从多径效应、多普勒效应、统计特性等方面进行性能指标测试。该模拟器可有效复现上述信道传播特性对传输信号的影响, 可用作临近空间通信系统设计研发的测试设备。

1 信道模型及建模方法

1.1 信道传播特性

临近空间自下而上包含平流层、中间层和热层底层区域^[8], 临近空间飞行器或通信平台多分布于大气状态稳定的平流层, 与地面移动终端通信时, 传输信号需跨越水汽含量丰富、天气现象复杂多变的对流层, 信号传输至近地面时, 还会受到地形地貌的影响。因此, 将临近空间信道传播特性分为气象性损耗与非气象性损耗两大类, 气象性损耗的产生原因是大气和天气变化。其中, 非气象性损耗包括路径损耗、阴影衰落、多径衰落等, 气象性损耗包括大气吸收损耗、降雨衰减等。

自由空间路径损耗是指特定环境下, 信号能量变化仅与传播距离有关^[9]。阴影衰落是指当信号传播过程中遇到障碍物阻挡, 信号产生衰落的现象^[10]。

采用下述对数距离路径损耗公式描述自由空间路径损耗和阴影衰落的叠加效果。

$$PL(d) = \overline{PL}(d_0) + 10n\lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_s \quad (1)$$

其中: d 是实际传播距离, 单位 km, d_0 是近地参考距离, 单位 km, n 是路径损耗指数, 由实际传播环境决定, X_s 是均值为 0 的高斯随机变量, 单位 dB。

多径衰落是指信号传输过程中各种障碍物引起信号的反射、散射、折射和衍射, 使到达地面移动终端的信号是多簇路径信号的叠加的现象^[11]。在这过程中, 若通信收发两端存在相对运动, 则会产生多普勒效应。多径衰落可分为频率选择性衰落和平坦衰落^[12]。根据信道包络幅度分布不同, 平坦衰落又可分为瑞利衰落和莱斯衰落, 区别在于莱斯衰落信道包含直射信号路径。不同参数下的瑞利分布和莱斯分布如图 1 所示。

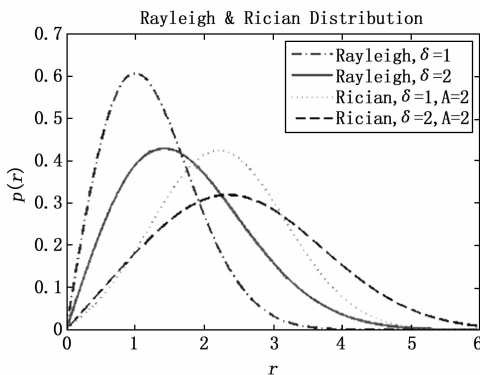


图 1 瑞利分布和莱斯分布

临近空间通信中, 平流层的臭氧、对流层的氧气和水蒸气会造成大气吸收损耗。当信号经过降雨区时, 雨滴对

信号同时产生吸收和散射作用, 形成降雨衰减, 信号频率 10 GHz 以上时, 降雨衰减的影响不可忽视^[13]。

1.2 建模方法

考虑传输距离与信号频率, 多径衰落、大气吸收损耗与降雨衰减是临近空间信道建模必不可少的因素, 下面也将对这 3 种信道传播特性的建模方法进行仿真分析。

频率选择性衰落信道常用 WSSUS 模型^[14]描述, 模型将接收信号表示为独立零均值复高斯过程和传输信号延时分量的乘积, 即接收信号可以由式 (2) 表示:

$$y(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{P_l} g_l(t) x(t - \tau_l) \quad (2)$$

式中, L 为可分辨径数量, P_l 是第 l 个可分辨径的功率, $g_l(t)$ 是功率谱为多普勒谱的复高斯过程, 可由平坦衰落模型建立。

WSSUS 模型可用抽头延迟线模型实现, 每个抽头均可等效为一个平坦衰落信道。

平坦衰落信道的建模以瑞利衰落为基础, 基于 WSSUS 假设, 选用 Zheng 模型^[15], 式 (2) 中的 $g_l(t)$ 可表示为:

$$g_l(t) = g_l(t) + jg_q(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos(\omega_n t \cos \alpha_n + \varphi_n) + j \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos(\omega_n t \sin \alpha_n + \varphi_n) \quad (3)$$

式 (3) 中, $\alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta_n}{4M}$, $\theta_n, \varphi_n, \varphi_n$ 均为 $[-\pi, \pi]$ 范围内的随机数, M 是通道数。Matlab 仿真的 Zheng 模型的时域幅值、一阶统计特性和二阶统计特性如图 2~5 所示, 均与理论曲线吻合。

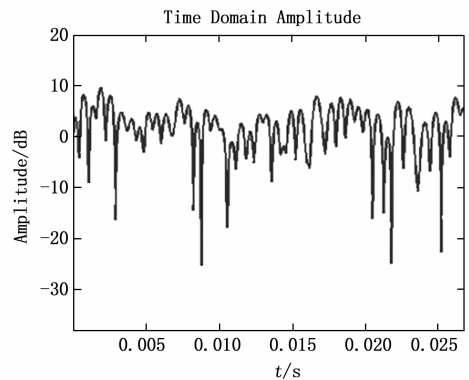


图 2 时域幅值

建模时选用普适性较高的 ITU-R 模型^[16]来预测降雨衰减, 该模型适用的频率范围是 1~55 GHz。模型所需的概率超过 0.01% 的年均降雨量参数由建议书提供的全球等温线高度值计算得到。图 6 为全球概率超过 0.01% 的年均降雨量分布图, 图 7 是固定经纬位置处的降雨衰减随频率变化曲线图。

逐谱线求和法^[17]准确性较高, 因此用该方法预测大气吸收损耗。逐谱线求和法需要对应经纬高位置处的干空气

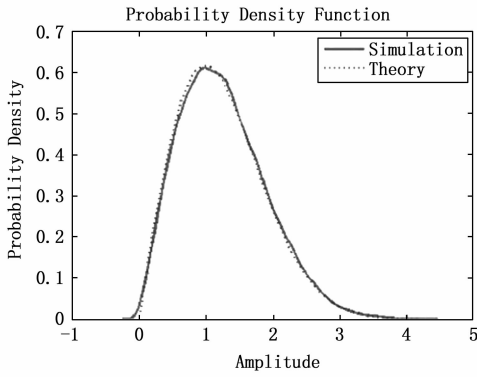


图 3 概率密度函数

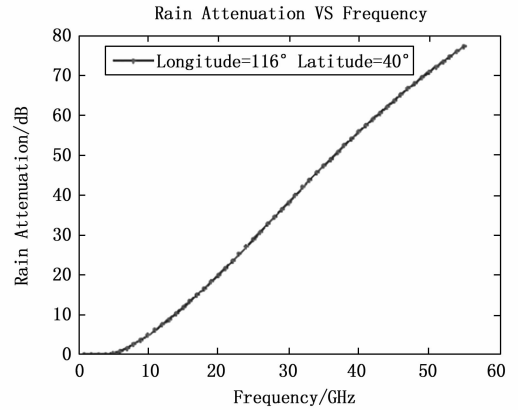


图 7 降雨衰减随频率变化图

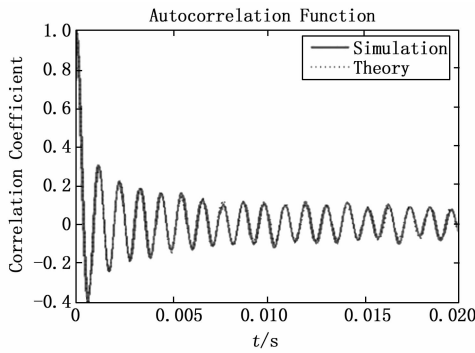


图 4 自相关函数

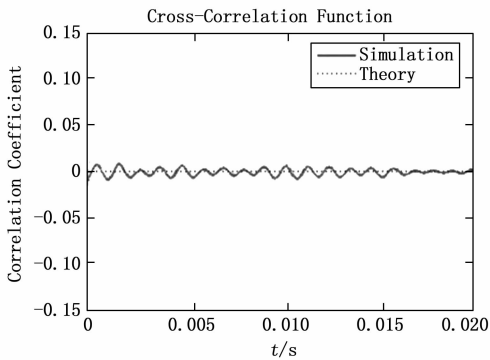


图 5 互相关函数

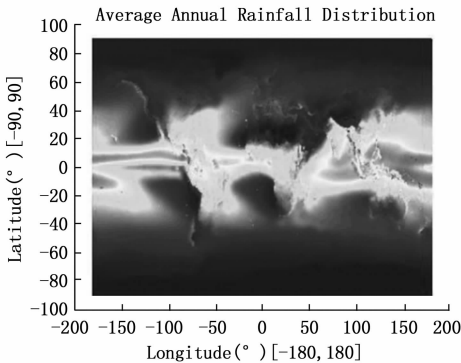


图 6 降雨量分布

气压、水汽分压和温度, 图 8 是利用 2013 年超强台风天兔的相关数据得到的固定经纬高位置处的大气吸收损耗随频率变化的仿真计算结果。

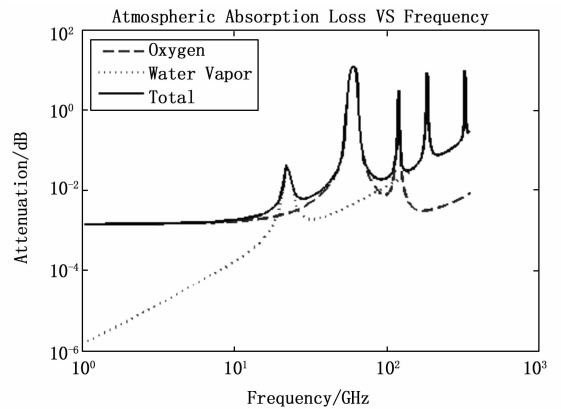


图 8 大气吸收损耗随频率变化图

2 CPU+FPGA 实现

已有信道模拟器的实现有软件、硬件、软硬结合 3 种架构。软件架构的信道模拟器不能产生实际信道, 仅体现通信信道对传输信号的理论影响。硬件架构的模拟器采用整体开发方式, 可产生实际数字信道, 但信道模拟器的维护、升级或更新十分受硬件设备影响。本文的临近空间信道模拟器采用基于 CPU+FPGA 的软硬结合架构, 充分利用 CPU 高效的数据处理能力、简洁的用户交互界面以及 FPGA 高速的计算能力。

2.1 模拟器设计指标

本文临近空间信道模拟器的设计实现基于综合自由空间路径损耗、阴影衰落、多径衰落、大气吸收损耗、降雨衰减等多种信道传播特性的临近空间信道模型, 主要预期指标如下:

- ◆ 射频信号频率: 1 MHz~3.9 GHz;
- ◆ 中频信号频率: 70 MHz;
- ◆ 采样频率: 200 MHz;
- ◆ 输入输出阻抗: 50 Ω;

◆ 多径衰落类型：频率选择性衰落、平坦—瑞利衰落、平坦—莱斯衰落；

- ◆ 频率选择性衰落可分辨径数：1~10；
- ◆ 瑞利衰落不可分辨径数：1~16；
- ◆ 可分辨径相对时延范围：0~5 115 ns；
- ◆ 可分辨径相对时延分辨率：5 ns；
- ◆ 多普勒频移范围：-1.6 MHz~1.6 MHz；
- ◆ 多普勒频移分辨率：1 Hz；
- ◆ 多普勒扩展范围：0~3.2 MHz。

2.2 总体架构设计

本文信道模拟器信号处理流程如图 9 所示，模拟信号经过模数转换变成数字信号进入信道，若输入信号是射频信号则需经过下变频，信号处理完成后，数字中频信号经过数模转换变成模拟中频信号输出，若需输出射频信号，可通过上变频实现。PC 机提供用户交互界面并完成信道参数的更新计算。

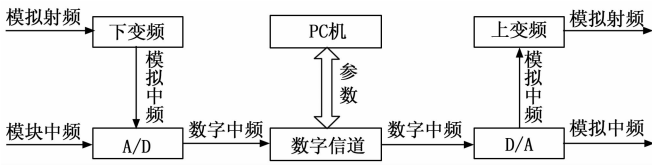


图 9 信号处理流程

为便于调试与修改，本文采用模块化设计，对 CPU 部分和 FPGA 部分的整体功能进行拆分，即，对图 9 中的 PC 机与数字信道部分进行功能模块设计，令不同的功能有不同的实现模块。基于 CPU+FPGA 的临近空间信道模拟器的模块功能框图如图 10 所示。

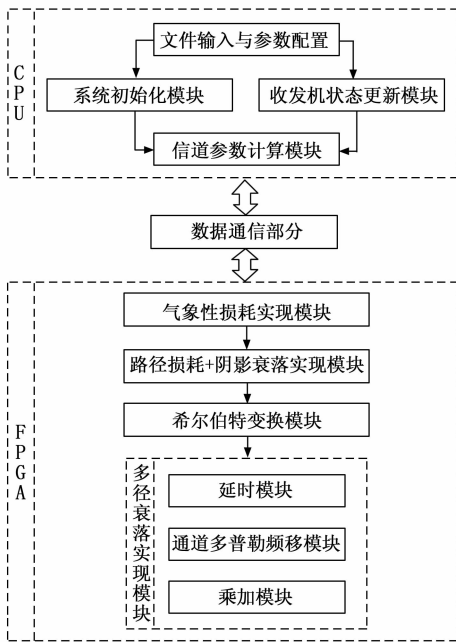


图 10 临近空间信道模拟器功能框图

部分的整体功能是信道传播特性的添加实现。两者通过数据通信部分进行参数传输。

首先，CPU 部分包含文件输入与参数配置、系统初始化模块、收发机状态更新模块和信道参数计算模块。文件输入与参数配置通过一个用户交互界面实现，该界面可输入信号收发机的运动轨迹文件，可配置信号参数、信道传播特性实现类型及对应参数。系统初始化模块产生不需随时间更新的各类计算所需参数。收发机状态更新模块根据输入的收发机运动轨迹文件计算信号收发机相对运动状态数据。信道参数计算模块则进一步计算 FPGA 部分实现信道传播特性添加所需的各类信道参数。

其次，数据通信模块是 CPU 部分与 FPGA 部分之间的通信枢纽，基于 PCIe 通信协议^[18]完成信道参数的下发接收与装帧解析，实现平台包括 CPU 与 FPGA。

最后，FPGA 部分包含气象性损耗实现模块、路径损耗+阴影衰落实现模块、希尔伯特变换模块和多径衰落实现模块。气象性损耗实现模块将大气吸收损耗和降雨衰减这两个气象性损耗利用乘法器添加至数字中频信号。路径损耗+阴影衰落实现模块将自由空间路径损耗和阴影衰落添加至信号。希尔伯特变换模块实现输入信号的 90°相移，输出一路同相信号和一路正交信号。多径衰落实现模块包含延时模块、通道多普勒频移模块、乘加模块等 3 个主要模块，可选择将频率选择性衰落、平坦—瑞利衰落、平坦—莱斯衰落的其中一种添加至信号。

2.3 希尔伯特变换的硬件实现

希尔伯特变换模块的实现核心是 FIR 滤波器的 IP 核。利用 MATLAB 的 FDAtool 工具箱生成滤波器系数，以 COE 文件格式导出后存入 IP 核。

综合考虑希尔伯特变换效果与 FPGA 的资源使用，本文采用 26 阶的希尔伯特滤波器，滤波器的幅频响应、相频响应、冲激响应、零极点图分别如图 11 至图 14 所示。

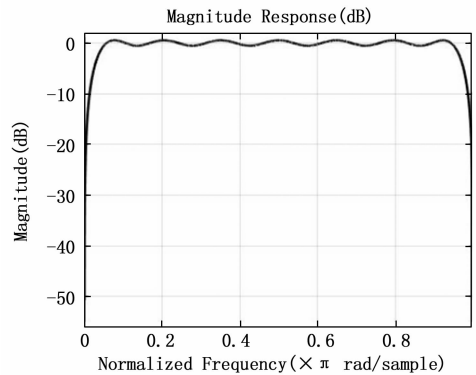


图 11 幅频响应

为进一步观察希尔伯特变换的硬件实现效果，FPGA 内部产生一个位宽为 16 bit、频率为 781 kHz 的正弦信号输入至希尔伯特变换模块，ModelSim 仿真的希尔伯特变换模块输出的同相信号与正交信号的时域波形如图 15 所示，两路信号满足相位相差 90°，希尔伯特变换的实现符合要求。

CPU 部分的整体功能是参数配置与参数计算。FPGA

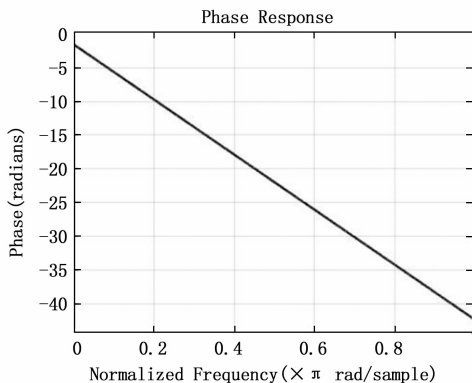


图 12 相频响应

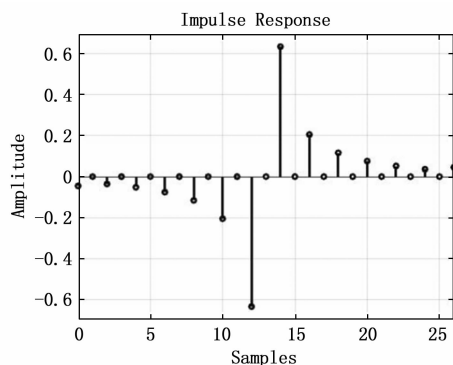


图 13 冲激响应

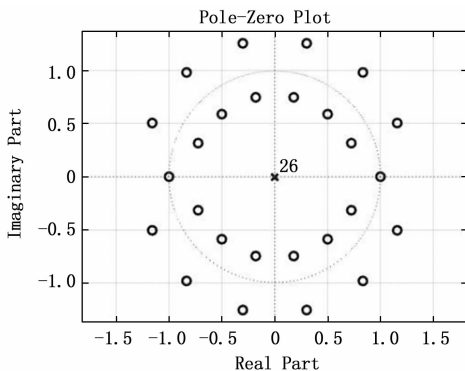


图 14 零极点图

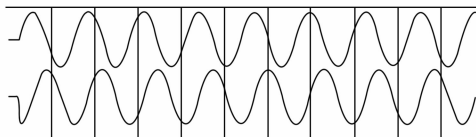


图 15 希尔伯特变换模块输出信号波形

滤波器的实现本质上是一个卷积过程, 模块输出的正交信号由输入信号与滤波器系数卷积得到, 则与模块输入信号相比, 模块输出的正交信号发生位宽扩展, 模块输出的同相信号位宽与输入信号相同, 为了保证后续输入多径衰落实现模块的两路信号位宽一致, 需要对希尔伯特变换

模块输出的正交信号进行截短处理。

2.4 通道多普勒频移的硬件实现

多径衰落的实现以平坦-瑞利衰落为基础, 基于式(3), 平坦-瑞利衰落应实现 M 个通道的多普勒频移。多普勒频移硬件实现的核心结构是直接数字合成器 (DDS, direct digital synthesizer), DDS 是一种可将数字信号转化成模拟信号的合成器, 本文采用的合成方法是查表法。DDS 基本组成结构如图 16 所示, 包括数控振荡器 (NCO, numerically controlled oscillator)、数模转换器、低通滤波器, 其中 NCO 由相位累加器和只读存储器 (ROM, read only memory) 构成^[19]。

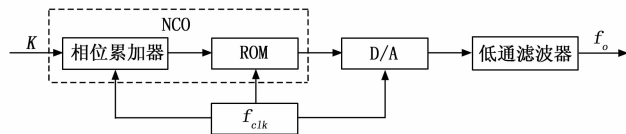


图 16 DDS 基本组成结构

ROM 中存储固定位宽和深度的、与相位对应的量化幅值序列, 相位累加器的输出是 ROM 的地址, ROM 输出的数字序列在通过数模转换和低通滤波器后便是模拟信号。本文多径衰落实现模块是对数字信号序列进行处理, 因此在实现输入信号的多普勒频移时不需进行数模转换和低通滤波。

通道内基于 DDS 结构产生的信号形式是余弦波, 因此 ROM 存储的是 2π 周期内的量化余弦幅值序列。可在 MATLAB 中对一个 2π 周期内的余弦信号按照相等的相位间隔进行采样得到相位离散的余弦波, 按照 ROM 位宽量化模拟幅值序列后得到相位离散、幅值离散的整周期余弦信号序列并存入 ROM。

图 16 中位宽是 N 的相位累加器以 FPGA 时钟 f_{clk} 为触发, 以频率控制字 K 为步长进行累加运算, 相位累加器的输出再移位后的值是 ROM 的地址, 当相位累加器的累加结果达到 2^N 时溢出, 至此便完成一个 2π 周期内的数字序列输出。

DDS 输出的数字余弦波的频率 f_o 、FPGA 时钟 f_{clk} 、相位累加器的位宽 N 、频率控制字 K 之间的数学关系可用下式描述:

$$f_o = \frac{K \times f_{clk}}{2^N} \quad (4)$$

由式(4)可知, 当 FPGA 时钟 f_{clk} 与相位累加器的位宽 N 固定, 改变频率控制字 K 的值可改变相位累加器的累加速度, 进而改变相位累加器的溢出时间, 最终改变输出数字余弦序列的频率。

式(4)中 DDS 输出的数字余弦波的频率 f_o 在通道内中是 Zheng 模型的多普勒频移数值, 由多普勒频移计算公式 f_o 可以表示为:

$$f_o = f_{RF} \times v_{rel}/c \quad (5)$$

式中, f_{RF} 是传输信号频率, v_{rel} 是收发机相对运动方向上的

相对运动速度, c 是光速。可见, 上文中基于一阶 DDS 结构产生的频率是多普勒频移数值的数字余弦序列可以反映信号收发机的相对速度变化。若要更为精确地描述信号收发机的相对运动进而计算多普勒频移, 可以使用二阶 DDS 或三阶 DDS^[20], 将信号收发机间的相对加速度和相对加速度也纳入考虑范围。本文采用三阶 DDS, 时域上可理解为用相对加加速度修正相对加速度在收发机相对运动数据更新时间间隔内的数值变化, 进而修正相对速度在数据更新时间间隔内的数值变化, 以得到精度更高的多普勒频移数值。

3 性能测试

为验证本文临近空间信道模拟器的衰落信道的统计特性实际值与理论值是否一致以及可分辨径相对时延和多普勒频移的实现是否满足设计指标, 采用图 17 所示的测试平台进行模拟器的性能测试。

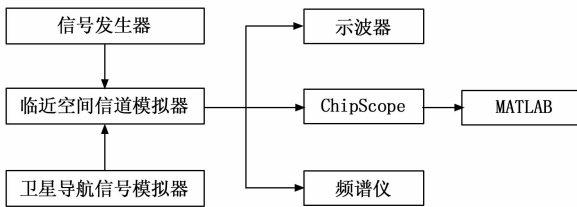


图 17 临近空间信道模拟器测试平台

信号发生器和卫星导航信号模拟器用以提供测试信号, 信号发生器可产生一定幅度与频率的正弦信号, 卫星导航信号模拟器是实验室自研设备, 可产生 GPS L1CA 等导航信号。示波器和频谱仪可分别直接观察信号时域波形和频谱。信道模拟器输入输出信号也可由逻辑分析仪 ChipScope 采集后导入 MATLAB 进行分析处理。

3.1 衰落信道统计特性验证

本文信道模拟器可实现的多径衰落类型有平坦—瑞利衰落、平坦—莱斯衰落、频率选择性衰落 3 种, 多径衰落的硬件模拟完成后, 需进一步验证瑞利衰落的一阶统计特性和二阶统计特性、莱斯衰落的一阶统计特性、频率选择性衰落不同可分辨径间的互相关特性与理论仿真值是否一致。

启动信道模拟器, 用 ChipScope 采集硬件模拟的多径衰落幅值, 导入 MATLAB 进行统计分析, 此时模拟器不需要输入信号。

首先, 令多径衰落类型是平坦—瑞利衰落, 通道数设为 16, 最大多普勒频移设为 1.6 MHz, ChipScope 采集输出信号的序列长度是 131 072。硬件模拟瑞利衰落的一阶统计特性和二阶统计特性如图 18 至图 21 所示, 均与理论分布一致。

其次, 分别令多径衰落类型是平坦—莱斯衰落和可分辨径数目为 2 的频率选择性衰落, 其余参数与平坦—瑞利衰落时相同。莱斯衰落的幅度分布如图 22 所示, 实测分布

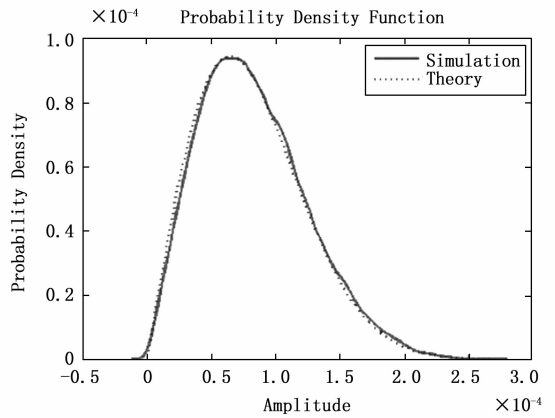


图 18 实测瑞利衰落幅度分布

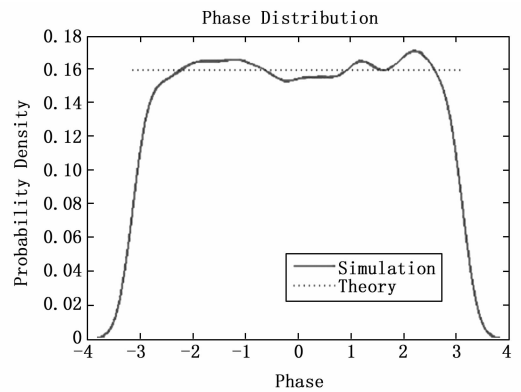


图 19 实测瑞利衰落罗相位分布

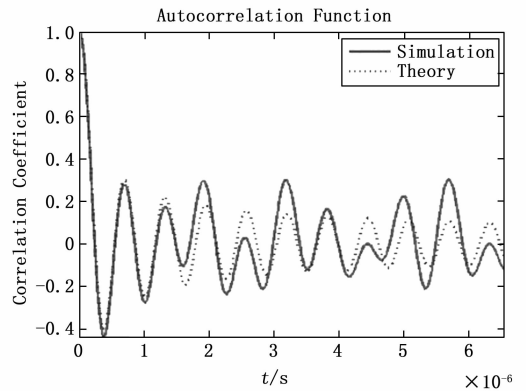


图 20 实测瑞利衰落自相关

与理论分布基本一致。频率选择性衰落两个抽头的瑞利衰落间的互相关如图 23 所示, 数值在 0 上下波动且在 -1 和 1 之间, 结合图 18 至图 21 的瑞利衰落的一阶统计特性和二阶统计特性实测结果, 可知频率选择性衰落满足 WSSUS 假设。

3.2 可分辨径相对时延测试

频率选择性衰落的可分辨径的传输信号之间, 因传输路径不同, 到达信号接收机的时间不同, 可分辨径相对时延可用来描述不同路径传输信号间的相对时延量。

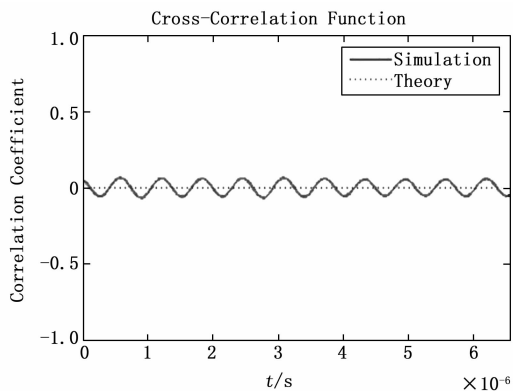


图 21 实测瑞利衰落互相关

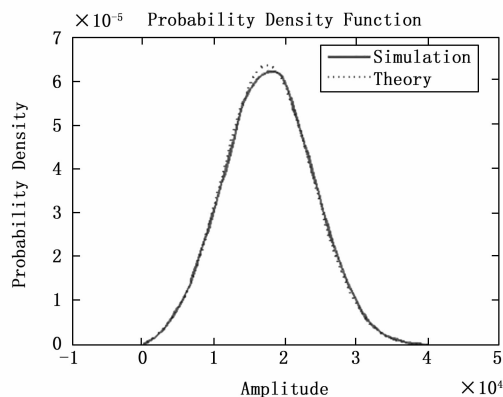


图 22 实测莱斯衰落幅度分布

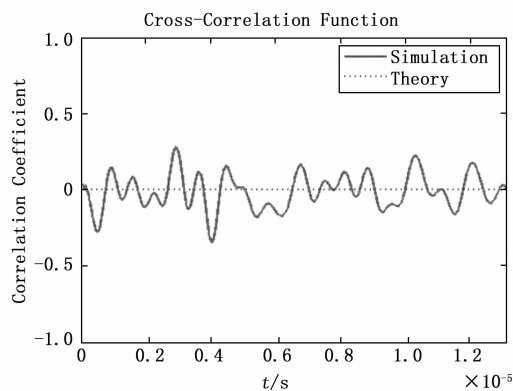


图 23 实测频选衰落互相关

进行可分辨径相对时延测试时, 信道模拟器需要实际输入信号, 可通过示波器直接对比观察延时前后的信号时域波形。

首先, 令信号发生器产生一个频率是 20 MHz、幅度是 800 mVPP 的正弦信号作为信道模拟器的输入信号。之后, 令信道模拟器的两路 D/A 分别输出延时模块输入信号和延时模块输出信号, 并接至示波器的 CH1 和 CH2。示波器开启延时扫描并设置为边沿触发模式, 用 CH1 通道信号作为触发信号, 观察示波器两通道信号间的时延。

时延是 5 ns 和 5 115 ns 时的示波器显示如图 24 和图 25

所示。因输入正弦信号频率是 20 MHz, 周期是 50 ns, 所以时延是 5 115 ns 时, 示波器显示的非整周期时延是 15 ns, 示波器结果图与设置值吻合, 信道模拟器多径时延的实现满足设计指标。

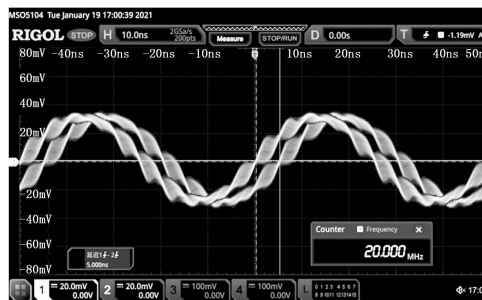


图 24 延时 5 ns 时的示波器显示

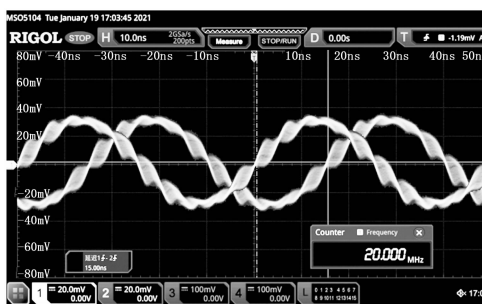


图 25 延时 5 115 ns 时的示波器显示

3.3 多普勒频移与扩展测试

信号经多径衰落后, 到达接收机的信号是多径合成信号, 接收信号的频率分量增加, 频谱展宽, 产生多普勒扩展。多径传输中每个子径内的传输信号经历多普勒频移。

进行多普勒频移与多普勒扩展的测试时, 信道模拟器需要输入信号, 考虑多普勒频移以单频信号为测试信号、多普勒扩展以调制信号为测试信号时更利于测试结果的对比观察, 多普勒频移的测试采用信号发生器产生的正弦信号作为测试信号, 多普勒扩展的测试采用卫星导航信号模拟器产生的 GPS L1CA 信号作为测试信号。

测试多普勒频移时, 信道模拟器多径衰落类型选择平坦-瑞利衰落, 通道数 $M = 1$ 。由公式推算, 输入信号是正弦信号、瑞利 Zheng 模型的通道数 $M = 1$ 时, 输出信号应有 $f + f_d$ 和 $f - f_d$ 两个频点, f 是输入信号频率, f_d 是多普勒频移量, 同时因 FPGA 实现希尔伯特变换时对输出的正交信号进行截短处理, 两个频点的幅值或功率并不相等。

图 26 是输入信号频率 20 MHz、幅度 800 mVPP, 频移设定值是 1.6 MHz 时的频谱仪显示。图 27 是输入信号频率 20 MHz、幅度 800 mVPP, 频移设定值是 5 kHz 时的频谱仪显示。图 28 是输入信号频率 5 MHz、幅度 800 mVPP, 频移设定值是 8 Hz 时的频谱仪显示。图 29 是输入信号频率 5 MHz、幅度 800 mVPP, 频移设定值是 7 Hz 时的频谱仪显示。由图 28 和图 29 可验证模拟器可实现 1 Hz 的多普勒频移分辨率, 由图 26 可验证模拟器可实现 1.6 MHz 的多普

勒频移最大值，因此信道模拟器多普勒频移的实现满足设计指标。

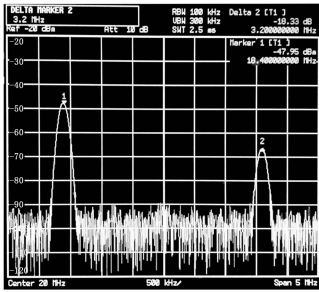


图 26 多普勒频移为 1.6 MHz

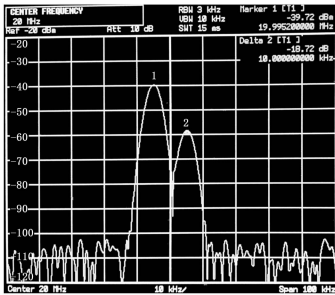


图 27 多普勒频移为 5 kHz

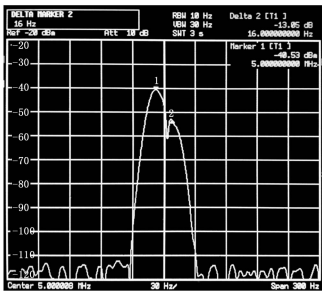


图 28 多普勒频移为 8 Hz

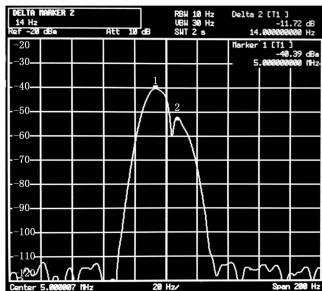


图 29 多普勒频移为 7 Hz

测试多普勒扩展时，信道模拟器多径衰落类型选择平坦-瑞利衰落，通道数 $M = 8$ ，多普勒频移最大值设定为 1 MHz。卫星导航信号模拟器产生的 GPS L1CA 信号的中频频率是 42.966 MHz。

用 ChipScope 采集模拟器输出信号，导入 MATLAB 进行频谱分析。输入信号的频谱如图 30 所示，主瓣带宽约为

2 MHz，输出信号的频谱如图 31 所示，主瓣带宽约为 4 MHz，频谱扩展约 2 MHz，符合设定值，信道模拟器多普勒扩展实现良好。

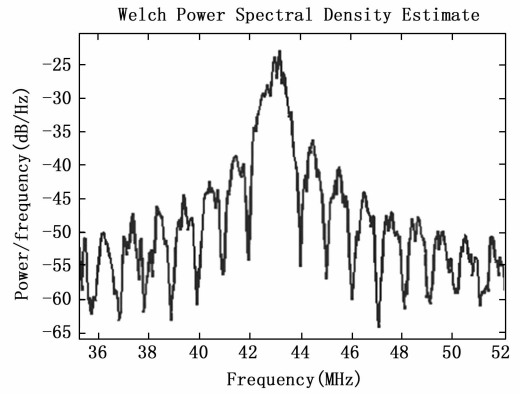


图 30 输入信号频谱

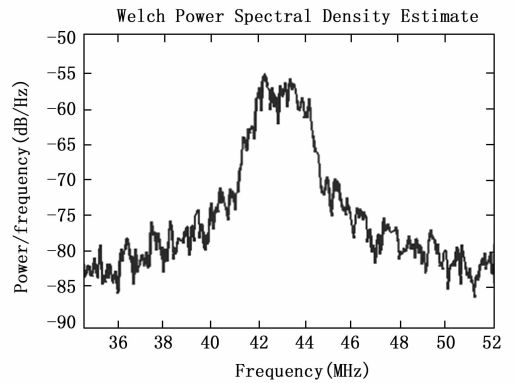


图 31 输出信号频谱

4 结束语

本文在理论分析临近空间信道传播特性的基础上，研究了多径衰落、大气吸收损耗和降雨衰减的建模方法并用 MATLAB 进行仿真。基于 CPU+FPGA 的软硬结合架构实现了能够模拟路径损耗、阴影衰落、多径衰落、大气吸收损耗和降雨衰减等信道传播特性对传输信号的影响的临近空间信道模拟器。该模拟器具有简洁全面的用户交互界面与高速有效的信号处理模块，易于操作，功能丰富，便于升级，具有灵活的可扩展性。实测表明，本文的临近空间信道模拟器生成的多径衰落幅值的统计特性与理论值吻合，多径时延与多普勒频移等关键部分的实现满足设计需求，多普勒扩展实现良好。因此，本文设计的信道模拟器可用于临近空间通信系统与通信设备的研发测试，可有效缩短研发周期，节约测试成本。后续研究中可进一步扩展信道规模，丰富信道传播特性，优化系统性能。

参考文献：

[1] 杨钧烽. 中纬度临近空间大气风场变化特性研究 [D]. 北京：中国科学院国家空间科学中心，2016.

- [2] 陈 聪. 临近空间的性质争议及法律定位 [J]. 学术交流, 2015 (4): 104-108.
- [3] 欧阳向京, 陈树新. 临近空间通信平台及其军事应用 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37 (2): 163-166.
- [4] 张超然, 张 可, 黄 盼. 临近空间高动态飞行器通信设计与仿真 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (15): 211-215.
- [5] 林 诚, 陈树新, 苏一栋. 临近空间衰落信道建模及其性能分析 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (6): 80-82.
- [6] 施春强, 郭道省. 一种新的临近空间通信信道模型及其仿真分析 [J]. 电讯技术, 2012, 52 (5): 741-747.
- [7] ZHANG D Y, WU Z H. Modeling and simulation of near space platform-land channel [C] // 2010 IEEE 12th International Conference on Communication Technology. IEEE, 2010: 128-131.
- [8] 黄宛宁, 张晓军, 李智斌, 王生, 黄旻, 蔡榕. 临近空间科学技术的发展现状及应用前景 [J]. 科技导报, 2019, 37 (21): 46-62.
- [9] OYELEKE O D, THOMAS S, IDOWU-BISMARCK O, et al. Absorption, Diffraction and Free Space Path Losses Modeling for the Terahertz Band [J]. International Journal of Engineering and Manufacturing, 2020, 10 (1): 54-65.
- [10] BEAULIEU N C, et al. A Circuit Theory Model for Shadow Fading Autocorrelation in Wireless Radio Channels [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8 (1): 161-164.
- [11] 周生奎, 戴秀超, 朱秋明, 等. 无线衰落信道模拟方法及仪器研制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (7): 988-994.
- [12] 胡晓慧. 矩阵求逆在大规模 MIMO 中的应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [13] SRINIVAS K K, RAMANA T V. Severe Cause of Cloud Attenuation and Rain Attenuation on Space Communication Link at Millimetre Band and Differentiation between Rain Attenuation and Cloud Attenuation [C] // Advance Computing Conference. IEEE, 2017: 255-259.
- [14] TANG M S, XU W Z, CHEN C. A Channel Emulator Based on WSSUS [J]. Advanced Materials Research, 2014, 846-847: 1133-1136.
- [15] 孙得娣, 徐荣蓉. 两种瑞利衰落信道模型的研究 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (8): 23-26.
- [16] MOHANTY S, SINGH C, TIWARI V. Estimation of rain attenuation losses in signal link for microwave frequencies using ITU-R model [C] // IGARSS 2016 - 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016.
- [17] IPPOLITO, LOUIS J. Propagation Effects Modeling and Prediction [M]. 2017.
- [18] 曹科庭. 基于 PCIE 的 DMA 高速数据传输控制器的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [19] RIDWAN A M, FAROQI A, Nusantara H, et al. DDS-Based 13.56 MHz Sine Wave Generator for Wireless Charging System [C] // 2018 International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing and Communication (AESPC). 2018.
- [20] LI R, CAI Y L, BAI X B, et al. An Improved Doppler Shift Simulation Method Based on Third-Order DDS [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 614: 356-362.
- ~~~~~
- (上接第 155 页)
- [6] LI Y, WU L S, ZHANG N, et al. Constant false alarm rate detection based on estimating statistical distribution of non-homogeneous sea clutter in sky-wave over-the-horizon radar [J]. IET radar, sonar & navigation, 2020, 14 (1): 48-60.
- [7] Suresh, Penamati, Thayaparan, et al. Fourier-Bessel transform and time-frequency-based approach for detecting manoeuvring air target in sea-clutter [J]. IET radar, sonar & navigation, 2015, 9 (5): 481-491.
- [8] 杜 勇, 尚 煜, 磨国瑞. 雷达导引头抗有源压制干扰技术研究 [J]. 火控雷达技术, 2020, 49 (1): 35-39.
- [9] 石 荣, 刘 江, 杜 宇. 外军典型地面一次性使用有源干扰机现状与发展分析 [J]. 兵工自动化, 2019, 38 (11): 9-13.
- [10] GONG S X, WEI X Z, LI X, et al. Mathematic principle of active jamming against wideband LFM radar [J]. 系统工程与电子技术 (英文版), 2015 (1): 50-60.
- [11] 迟 彤, 郭传福, 傅学庆. 箔条质心干扰对舰空导弹使用影响问题研究 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40 (10): 63-67.
- [12] 陈 瀚, 王 森. 美军电子对抗装备干扰技术及其效果研究 [J]. 数字技术与应用, 2020, 38 (5): 221-222.
- [13] YANG Y, XIAO S P, FENG D J, et al. Polarisation oblique projection for radar seeker tracking in chaff centroid jamming environment without prior knowledge [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8 (9): 1195-1202.
- [14] 徐寒冰, 祝明波. 美军舰载反导电子战系统及其发展 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40 (8): 1-3, 33.
- [15] 黄盼乐. 舰载雷达面临的电子对抗威胁及应对措施 [J]. 电子技术与软件工程, 2017 (11): 104.
- [16] HUANG D T, CUI G L, YU X X, et al. Joint range-velocity deception jamming suppression for SIMO radar [J]. IET radar, sonar & navigation, 2019, 13 (1): 113-122.
- [17] 谢泽峰, 罗华锋. 基于舰船目标的海战场电磁干扰量化表征方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39 (1): 152-156.
- [18] 范庆辉, 熊 坤, 邓晓龙, 等. 舷外有源干扰评估方法研究 [J]. 航天电子对抗, 2017, 33 (2): 14-16.
- [19] 余 忱, 张 磊. 基于重频捷变抗舷外有源诱饵距离假目标干扰的研究 [J]. 舰船电子对抗, 2020, 43 (4): 23-26, 31.
- [20] 陈骄阳. 舷外有源诱饵干扰效果动态评定方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40 (3): 73-76.