

文章编号: 2095-4980(2016)02-0323-06

基于 FPGA 的微波辐射数字谱分析系统

封 天^{1,2}, 张升伟², 王新彪²

(1.中国科学院大学 计算机与控制学院, 北京 100049; 2.中国科学院 微波遥感技术重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 微波辐射谱分析仪是具有精细频谱分析能力的微波辐射计, 是近年来被动微波遥感器的技术发展方向之一。本文提出的微波辐射数字谱分析系统基于快速傅里叶变换(FFT)算法, 硬件平台基于 Xilinx 公司 7 系列下带有 4 DPS 高速模拟子卡的 Kintex7-FPGA 评估开发套件, 实现一个输入带宽 250 MHz, 探测通道数 16 384, 频谱分辨力 15 kHz, 可实时观测的微波辐射数字谱分析系统。给出了系统的电路原理设计、关键模块的设计框图及软件流程图。最后将设计的 Modelsim 仿真结果和 MATLAB 仿真结果作对比, 验证了整个设计的正确性。

关键词: 数字谱分析系统; 现场可编程门阵列; 自校正; 流水线型快速傅里叶变换

中图分类号: TN492; TP274

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0323

Microwave radiometer with digital spectrum analysis backend based on FPGA

FENG Tian^{1,2}, ZHANG Shengwei², WANG Xinbiao²

(1.School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2.Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The radiometer with spectrum analysis backend can be considered prototypical for spectrometer development for future radio astronomical applications. This paper focuses on the design and implementation of a Fast Fourier Transform(FFT) spectrum analysis backend for radiometer. The Kintex-7 family evaluation Field Programmable Gate Array(FPGA) of Xilinx Company with a 4 DSP FMC150 daughter card is the core to complete this system. The spectrometer works continuously and has a total bandwidth of 250 MHz, resolved into 16 384 channels with a frequency resolution of 15 kHz. The design scheme of delay-calibration for high speed data transmitting, pipelined, streaming I/O FFT structure, and spectrum accumulation modules, as well as software flowchart is presented. Finally, both simulation results obtained by Modelsim and MATLAB are compared to verify this system.

Key words: digital spectrum system; Field Programmable Gate Array; self-calibration; pipelined streaming Fast Fourier Transform

在地球大气层中的各种气体, 只有氧气及水汽是在微波谱中呈现明显吸收带的成分。通过对水汽最大吸收频点 22.235 GHz 及其附近频率的辐射测量可以确定水汽沿高度的剖面分布。这对于观测水汽变化并理解其变化过程具有重要意义^[1]。传统微波辐射计通常为一个窄带系统, 观测地物在频率通道内的平均亮温。随着遥感技术的发展, 为解决宽频谱范围内观测不同频率通道对应辐射亮温的需求, 产生了具有精细频谱分析能力的地基微波辐射谱分析仪。微波辐射谱分析仪是近年来发展起来的一种新型微波辐射计, 其主要特点是后端不采用传统辐射计的检波电压采样, 而是采用数字谱分析技术, 提高系统谱分辨力, 在微波大气水汽/氧气吸收峰探测, 特别是在谱线狭窄的大气痕量气体探测方面具有良好的应用前景^[2-3]。目前国际上已利用纯数字手段实现了具备连续谱线测量能力的光谱仪。2008 年伯尔尼大学的物理与应用研究所已经研制出 2 台用于观测同温层的水汽吸收谱线地基辐射计 MIAWARA 及 SWARA, 都能够得到海拔 20 km~80 km 的水汽剖面图^[4-7]。鉴于国内采用谱分析技术的微波辐射计领域仍属空白, 本文以传统微波辐射计为理论基础, 研究具有谱分析能力的微波辐射计谱分析系统, 为大气水汽临边探测工作提供参考。

当今遥感器的设计更趋于高功能密度及小型化。因此,要求微波辐射谱分析系统的数据处理及控制系统具有高可靠性、高分辨力、实时性好、体积小、功耗低等特点。本文微波辐射数字谱分析系统基于 FFT 原理,鉴于 FPGA 逻辑运算速度快,功耗低,方便对内部程序进行擦写的特点,以 Xilinx 公司 7 系列 Kintex-7 FPGA 为核心实现基于 FFT 算法的微波辐射数字谱分析系统。

1 微波辐射数字谱分析系统硬件平台

为实现具有精细谱分析能力的微波辐射数字谱分析系统,本文选用 Xilinx 公司 7 系列下带有 4 DSP 高速模拟子卡的 Kintex-7 FPGA 评估开发套件。其核心为 XC7K325T-2FFG900C FPGA 芯片,具有超高逻辑容量及扩展接口,最大限度满足小型尺寸及大容量要求的高性能应用。Kintex-7 FPGA 评估开发板包含 2 个夹层扩展连接器(FPGA Mezzanine Card, FMC)接口,支持在物理特性及电气特性上符合 FMC 接口标准的子卡用于扩展评估开发板功能。4 DSP FMC150 高速模拟子卡,提供采样精确度 14 bit 双通道模/数转换器,最高采样率达到 250 MSPS。采样率、信号增益及偏移校正等参数可通过系统串行通信模块实现灵活配置;FMC150 子板包含一个高精度、低抖动的时钟发生芯片,用于向模/数转换芯片提供内部采样时钟信号。

2 微波辐射数字谱分析系统软件实现

接收机前端对输入信号经过下变频、放大后采用混合电桥进行 90° 功分,将输入信号分成 2 路相位相互垂直的 I/Q 正交信号送至谱分析系统输入端口。如图 1 所示,本文所述微波辐射数字谱分析系统主要包含数据采集单元、自校正单元、总线通信单元、FFT 单元、功率谱计算单元及双端口存储器(Dual Port RAM, DPRAM)非相干累积单元。系统上电后,总线通信模块在 FPGA 内部时序控制下,将预先存储在 FPGA 内部 ROM 的配置数据发送至模/数转换芯片及时钟发生芯片,模/数转换芯片(Analog to Digital Converter, ADC)配置完成后,向 FPGA 发送位宽 7 bit、速率为 500 MSPS 的双边沿低压差分信号(Double Data Rate Low Voltage Differential Signaling, DDR LVDS),时钟发生芯片向 FPGA 发送 250 MHz 低压差分时钟信号(LVDS)。配置完成后,总线通信模块将相关控制信号置高。随后 ADC 输出的采样信号进入自校正单元、功率谱计算单元对输入信号实现功率谱计算。DPRAM 非相干累积单元主要对功率谱计算结果进行累积平均,优化单个通道功率谱计算结果。

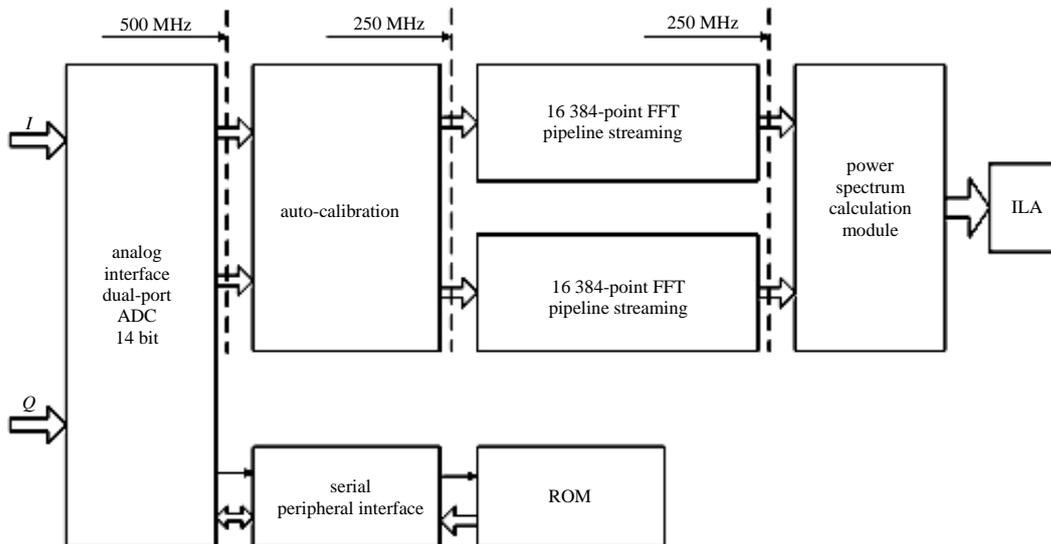


Fig.1 Architecture of radiometer with spectrum analysis backend

图 1 微波辐射数字谱分析系统框图

2.1 自校正单元

由于 FPGA 内部传输延迟及 FMC 接口的特点,每次将 4 DPS FMC150 插入卡槽的深浅不同,会引起板级间线路长度的差别,数据与时钟之间中心对齐的相位关系将产生偏移,在高速传输速率下会引起时序混乱,造成数据的错误传输。自校正单元校正系统内部电路结构所引起的传输延迟,达到在高速数据传输下能够正确捕捉数据的目的。

系统完成芯片配置后工作在 2 种模式下:

校正模式: FPGA 通过总线通信模块向数据采集芯片发送一组特殊的配置数据,将数据采集芯片的输出配置成一组连续递增的阶梯信号向 FPGA 发送,自校正单元在内部状态机的控制下,通过对采样芯片输出信号的连续性进行判别,调整可编程延迟单元(IDELAYE2)延迟控制信号值。IDELAYE2 是 Xilinx-7 系列专用可编程延迟单元,具有可控的 31-tap 延迟抽头线,用于延迟输入信号。当输入信号经可编程延迟单元后输出与配置一致的连续阶梯信号,说明自校正单元恢复了数据信号与时钟信号的相位关系,可编程延迟单元的延迟控制信号值保持当前状态不变,自校正过程结束并返回控制信号。

正常采样模式: FPGA 通过判别校正模式返回的控制信号有效性,通过总线通信模块对数据采集芯片进行重新配置,使其工作在正常采样模式下,对接收机前端的输出探测数据进行采样,向 FPGA 发送 500 MSPS 低压差分采样信号。

图 2 给出了自校正单元的仿真结果,输入激励模拟 ADC 模/数转换芯片校正模式下输出 0~16 383 连续递增阶梯信号。仿真结果说明了自校正单元未结束时,输出信号与输入信号相比,发生畸变,主要是由于内部延迟所引起的时序混乱。经过自校正单元调整可编程延迟单元的延迟控制值后,输出信号恢复成连续递增的阶梯信号,有效校正了内部传输延迟。

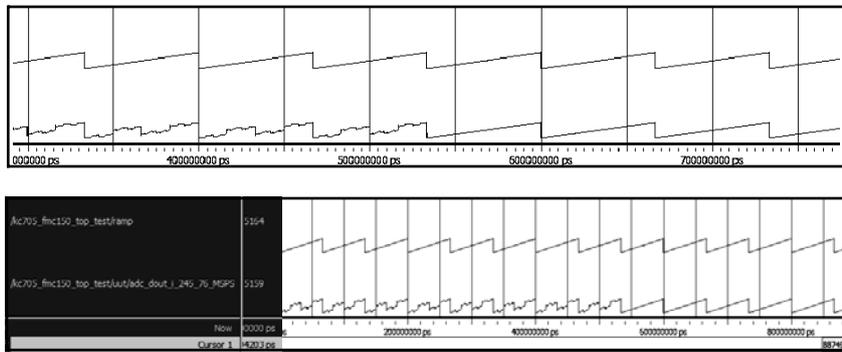


Fig.2 Diagram of auto-calibration simulation result
图 2 自校正单元仿真结果

2.2 FFT 单元

FFT 作为离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的一种快速算法,用于实现信号从时域到频域的转换。FFT 主要核心思想就是将 N 点序列逐次分解为 $(N-1)/2$, 直至 2 点的 DFT, 在各种数字信号处理的算法中起着核心作用^[8]。随着 FPGA 技术的快速发展,采用运算速度更快的 FPGA 已成为必然趋势。本文采用 Xilinx 公司配套其 FPGA 开发工具 ISE 14.7 推出的 FFT IP 核 7.1 进行 FFT。Xilinx FFT IP 核 7.1 可完成实数、复数信号的 FFT 及其逆运算(IFFT)。本系统一次进行 FFT 运算点数为 16 384, 操作数配置为 IEEE754-32 bit 单精度浮点数。在实际硬件操作中,模块的执行速度是很重要的参数,本系统采用流水线型 Streaming I/O 结构实现连续的数据处理。Streaming I/O 结构是对一系列基-2 蝶形运算处理引擎进行流水线技术设计,每个处理引擎包含独立的存储体(memory banks)用于存储输入数据及中间结果。流水线型 Streaming I/O FFT 结构具备同时对当前一帧数据进行 FFT 计算,输出上一帧数据结果,并加载下一帧数据的能力^[9]。



Fig.3 Diagram of FFT simulation result
图 3 FFT 仿真结果

图 3 为 FFT 仿真结果,图中圆圈表示经过流水线 Streaming I/O 结构运算产生的第 1 个 FFT 计算结果,当数据有效指示信号 fft_RdV 变高,说明 FFT 输出数据总线信号 Rxk_re 及 Rxk_im 输出有效计算结果。输出结果用 IEEE754-32 bit 单精度浮点数表示,可通过第 1 个 FFT 计算结果验证 FFT 核 v7.1 计算结果的正确性。

2.3 DPRAM 非相干累积单元

DPRAM 非相干累积单元用于对连续产生的单帧功率谱实现积分平均。本系统在 FPGA 开发软件 ISE14.7 下调用块存储器 IP 核 v7.3, 利用嵌入式块存储原语(block memory primitive)在 FPGA 内部形成一整块性能优化的双端口 RAM 存储器。存储深度由单帧 FFT 处理点数决定。如图 4 所示, 本系统存储深度为 16 384, 存储宽度 32 bit, 工作时钟频率为 250 MHz。每个端口的操作模式可实现独立配置, 可对 RAM 内存储单元进行独立的读/写操作。正常工作模式下, DPRAM 一个端口工作在写状态, 另一端口工作在读状态。DPRAM 单元在状态机的控制下产生 2 端口对应的写控制信号及读控制信号, 并产生相应读/写地址。时钟有效沿到来时, 上一帧数据对应功率谱通过读端口输出, 在状态机内部与当前一帧功率谱对应点进行累加平均后, 在写信号的控制下通过写端口重新写入 RAM 内对应单元。DPRAM 内累计次数对应微波辐射谱分析系统积分时间, 由软件可实现灵活配置。PRAM 单元可有效减小由随机噪声信号可能产生的较大起伏影响, 提高探测微弱信号的能力。

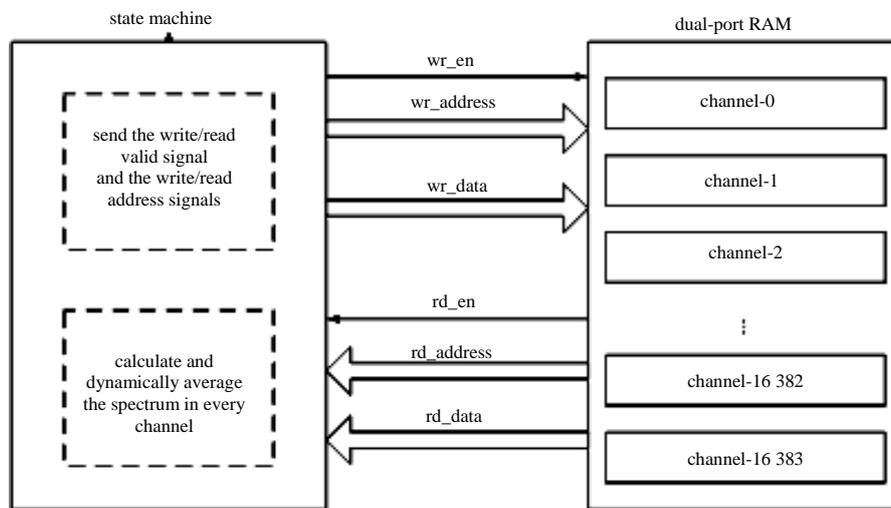


Fig.4 Diagram of DPRAM architecture
图 4 双端口存储器(DPRAM)非相干累积单元结构框图

3 系统仿真结果及验证

本文通过在 ISE14.7 开发环境中生成测试激励文件(TestBench), 在 ISE14.7 开发环境中关联 Mentor 公司的 Modelsim HDL 仿真软件进行仿真。本测试文件通过编写代码形成测试激励, 此方式具有更高功能覆盖率, 并且可移植性好, 验证速度更快^[10]。

本文针对微波辐射计后端数字谱分析系统设计仿真测试激励, 模拟 ADC 模/数转换芯片产生连续阶梯递增信号, 输入 FPGA 进行功率谱计算, 工作时钟频率为 250 MHz。图 5 为 Modelsim 仿真测试结果波形图, 功率谱计算结果用 IEEE754-32 bit 单精度浮点数表示。通过仿真结果可知, 对于连续递增阶梯信号, 其主要功率谱分布在低频通道, 即 0 通道附近区域。表 1 为 Modelsim 仿真结果与 MATLAB 功率谱计算结果关键点对比。通过 Modelsim 仿真结果验证数字谱分析系统具备对输入信号功率谱计算的功能。

表 1 MATLAB 与 Modelsim 关键点仿真结果对比
Table1 Simulation results of MATLAB/Modelsim

channel number	MATLAB result	Modelsim result
0	0.500 0	0.499 4
1	0	0
2	0.050 0	0.049 8
16 382	0.050 0	0.049 8
16 383	0	0

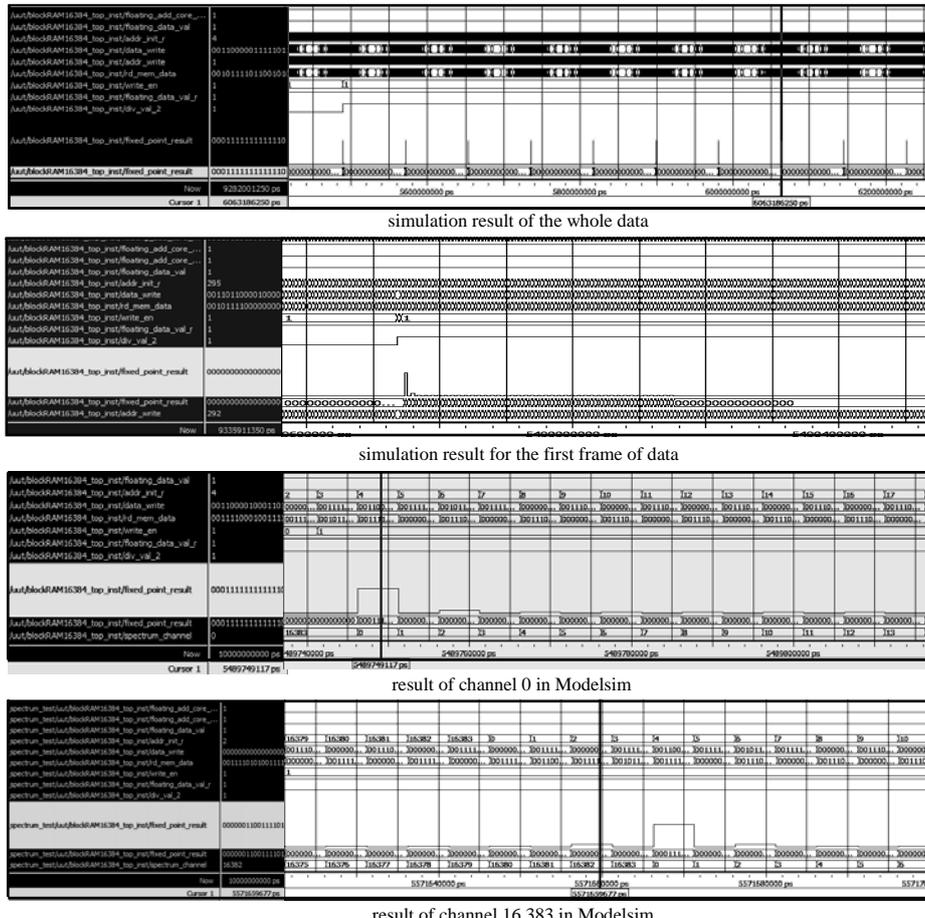


Fig.5 Simulation results in Modelsim
图 5 Modelsim 仿真结果

4 结论

本文详细介绍了一种基于 FFT 原理的微波辐射谱仪系统设计原理及实现方法。开发工具采用 Xilinx 公司 ISE 14.7 进行程序的编写及系统的综合、布局布线等。采用 FPGA 实现了该系统各模块的设计,并进行了主要模块的仿真验证及整个系统的调试工作,达到了设计小型化的目的。初步实现了输入带宽 250 MHz,探测通道数 16 384 的微波辐射数据谱分析系统的设计。利用 Xilinx 公司 kintex7-FPGA 丰富的硬件资源,很大程度上简化了传统硬件设计的规模,具有集成度高,可实现灵活配置的特点,可根据实际需要及时修改调整相关参数,使系统能够可靠稳定地工作。对整体设计进行了仿真,仿真结果满足设计要求,表明了数字谱分析系统设计合理性。

参考文献:

[1] F T 乌拉比,R K 穆尔,冯建超. 微波遥感(第一卷):微波遥感基础和辐射测量学[M]. 侯世昌,马锡冠,译. 北京:科学出版社, 1998. (ULABY F T,MOORE R K,FEIST D G. Microwave Remote Sensing(Vol.1):Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry[M]. Translated by HOU Shichang,MA Xiguan. Beijing:Science Press, 1998.)

[2] 刘浩. 干涉式全极化宽谱成像微波辐射计系统研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011. (LIU Hao. System study on the Interferometer Synthetic Aperture with polar metric and spectral observation capabilities[D]. Beijing: Center for Space and Science and Applied Research,Chinese Academy of Sciences, 2011.)

[3] 张江漫,张升伟. K 波段谱分析技术的微波辐射计方案设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,5(11):747-752. (ZHANG Jiangman,ZHANG Shengwei. Scheme design of the K band spectrum analysis microwave radiometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,5(11):747-752.)

[4] DEUBER B,KAMPFER N,FEIST D G. A new 22-GHz radiometer for middle atmospheric water vapor profile measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004,42(5):974-984.)

[5] MULLER S C,MURK Axel,MONSTEIN C,et al. Intercomparison of digital Fast Fourier Transform and acoustooptical spectrometers for microwave radiometry of the atmosphere[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009,47(7):2233-2239.

[6] ERWAN Motte,PHILIPPE Ricaud,BENJAMIN Gabard,et al. A 22-GHz Mobile Microwave Radiometer(MobRa) for the study of middle atmospheric water vapor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(10):3104-3114.

[7] MOTT E,RICAUD P,NICLAS M,et.al. A 22 GHz mobile microwave radiometer for the study of stratospheric water Vapor[C]// IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium,IGARSS, 2007:4415-4418.

[8] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2007. (CHENG Peiqing. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.)

[9] 徐文波,田耘. Xilinx FPGA 开发实用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2008. (XU Wenbo,TIAN Yun. Xilinx FPGA: Development and Application[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2008.)

[10] 张瑜,张升伟. 基于 FPGA 的微波辐射计数控系统设计与实现[J]. 电子技术应用, 2009,35(12):42-46. (ZHANG Yu, ZHANG Shengwei. Design and implementation of data processing and control system in microwave radiometer based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2009,35(12):42-46.)

作者简介:



封 天(1990-), 女, 兰州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为被动遥感器设计.email: fengtiangraduate@163.com.

张升伟(1963-), 男, 山东省昌邑市人, 硕士, 博士生导师, 主要研究方向为陆基、机载及星载微波遥感器设计与研制.

王新彪(1984-), 男, 湖北省孝感市人, 博士, 主要研究方向为被动微波遥感.

2016 中国雷电防护高峰论坛征文通知

为了反思发展中的症结, 研讨中国防雷行业在新形势下的发展方向, 中国气象学会、深圳市防雷协会联合昱生展览(上海)有限公司定于 2016 年 6 月 19 日在中国国家会议中心举办“2016 中国雷电防护高峰论坛”。本届论坛与“第八届中国气象科技和水文技术设备展、中国第十届防雷技术与产品展”同期举行, 将邀请国家气象局、中国气象学会雷电委员会、全国雷电防护标准化技术委员会、大专院校、科研设计院所、国家电网、防雷检测机构、投融资机构、知名防雷企业、省市防雷中心等相关领域学者、专家、负责人出席, 通过权威主题报告、技术方案解析以及“专家论道”等互动形式, 对防雷行业共同关注的热点问题指明方向。

征文要求:

- 1、为了集中反映当前中国智能防雷技术的水平和发展方向, 为各应用领域提供最具针对性的智能防雷解决方案或设计策略, 本届论坛面向相关企业事业单位、国内外科研机构、大专院校等征集论文, 截稿时间: 2016 年 5 月 15 日。
- 2、论文主题范围: 防雷产业发展方向和趋势、智能防雷技术解决方案, 需具有前瞻性、技术先进性和实用性。
- 3、论文格式要求: WORD 电子文档, 发送至邮箱: 14260473@qq.com
- 4、所有论文经专家评审组严格审核通过后, 编入《2016 中国雷电防护高峰论坛论文集》, 在全行业发行。
- 5、入选论文作者享受论坛会务费特别优惠。

论坛背景

2015 年, 由国家行政审批制度改革引发的防雷体制改革有了实质性的进展, “智慧城市”建设在全球范围内快速铺开, 大数据、云计算、物联网的广泛应用被上升到国家战略层面, 诸如此类的利好极大地促进了中国防雷产业的市场化和智能防雷技术的发展, 也给防雷行业带来机遇、困惑和挑战

2016 年, 是国家“十三五”规划的开局之年, 在“保持经济中高速增长, 推动产业迈向中高端水平”的宏观战略指导下, 政府将加强交通、能源、信息化等重大基础设施建设, 由此产生出巨大的市场供需。中国的防雷行业, 面对新的市场规则、新的市场需求, 能否成就产业的转型升级? 能否让当前面临的种种困局逐一水落石出?

此外, 四川省电子学会电磁脉冲与雷电防护技术专业委员会也将于 2016 年 7 月 14 日在成都新国际会展中心举办专题技术研讨会, 并出版论文专辑, 欢迎投稿并参会交流。

投稿邮箱: 13988401@qq.com

有关论坛详情, 请关注【中国防雷】微信公共号: CNFangLei

