

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107017

超短波电台性能无线快速检测系统设计

田华明 刘云飞 田沿平
(海军航空大学青岛校区 青岛 266041)

摘要:针对超短波电台检测过程中存在的不能异地检测、破坏电台当前连接状态、不能同时对多地电台检测等问题,研制一种无线快速检测系统,通过北斗卫星导航系统和电台检测适配装置、检测平台的设计,在电台和检测平台之间建立射频信号和北斗短报文双重无线信道,利用北斗卫星系统测定二者之间的距离,推算射频信号的衰减,采用一定的算法进行补偿,并通过北斗短报文进行检测过程中相关信息的传输和修正,在检测平台中利用FPGA技术进行信号的存储和重构,实现了电台主要发射和接收指标的检测。利用该检测系统对相距60 km的电台进行检测,与现场计量测试相比,频率误差在 10^{-6} 以内,发射功率、灵敏度、调制度误差均在5%以内,在20 min以内完成了两部不同地点电台的检测,满足电台指标快速检测的需求,提高异地电台检测的效率。

关键词:超短波电台;无线检测;北斗卫星导航系统;检测平台设计;检测方法设计;信道衰减推算;信号重构
中图分类号: TN925+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Design of rapid wireless detection system about ultrashort wave radio indicators

Tian Huaming Liu Yunfei Tian Yanping
(Qingdao Branch, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aiming at the existing problems of ultrashort wave radio that detection process cannot be detected in different places, destroy the current connection state radio, not to much radio detection at the same time, developing a quick wireless detection system, through the Beidou satellite navigation system and radio test adapter device, the testing platform, make double wireless channel including the RF signal channel and Beidou satellite channel between stations and testing platform. Short message the Beidou satellite system is used to measure the distance between the stations and testing platform, calculate the attenuation of the radio frequency signal, use a certain algorithm to compensate, and through the Beidou short message to carry out the transmission and correction of the relevant information in the detection process, to achieve the detection of the station's main transmission and reception performance indicators. By using the testing system to test the 60 km away from the radio, compared with the field measurement, the frequency error is within 10^{-6} , transmission power, sensitivity, modulation error within 5%, within 20 minutes to complete the two different locations radio detection and meet the needs of radio index rapid detection, improve the efficiency of different radio detection.

Keywords: ultra-short wave radio; wireless detection; Beidou satellite navigation system; detection platform design; detection adaptation device; channel attenuation calculation; signal reconstruction

0 引言

为了保证通信的准确与畅通,超短波电台在使用之前都要进行发射功率、调制度、工作频率、灵敏度等主要工作指标的检测^[1]。目前国内外普遍采用无线电综合测试仪现场进行物理连接的方式进行检测,这种检测方式的优点是简单、直接,能够进行数据现场分析,缺点主要体现在4个

方面:1)要断开电台的天线、话筒、耳机等连接,破坏了电台原有工作状态^[2],容易带来新的故障;2)在机动保障的情况下,电台与检测平台不在同一地理位置,无法开展检测工作;3)当对多部电台检测时,需要将检测平台逐一与电台进行物理连接,工作量大而繁琐,对设备和仪器接口磨损较大;4)检测的精度、频率范围等主要取决于检测仪,不能根据电台特点和工作需求进行自行开发。文献[3]中,采用

收稿日期:2021-06-23

“ARM+FPGA”、“DDS+PLL”频率合成技术和数字信号处理技术,研制机载电台的快速检测方法,可以快速为收发通道提供高分辨率、稳定的高频信号,提高了性能指标的可靠性,但电台与检测仪必须进行物理连接,解决不了无线检测问题。针对这些问题,本文基于无线检测和指标推算相结合的思想,研究一种超短波电台性能无线快速检测系统,通过研发专用的电台检测适配器与电台相连,避免破坏电台当前的连接状态,防止带来新的故障;通过研发检测平台,实现电台射频信号的收发和处理,采用 FPGA 技术进行信号存储、处理和重构,提高检测的精度;利用北斗导航系统测距和短报文功能,对相关参数进行远程测量和定量推算,实现对不同驻地电台主要指标的检测。这种设计方式,便于异地检测和机动保障任务检测,由于采用北斗导航系统进行定位和数据短消息传输,保密性好,适用于军事通信设备的性能检测。同时本文提出的基于北斗短消息的检测思想、无线信道推算技术、采用 FPGA 技术进行信号重构的方法,为电子装备检测技术发展提供一种借鉴。

1 系统结构

1.1 总体结构设计

系统的总体结构组成包括电台工作位、指标检测位、北斗卫星导航系统 3 个部分,如图 1 所示。

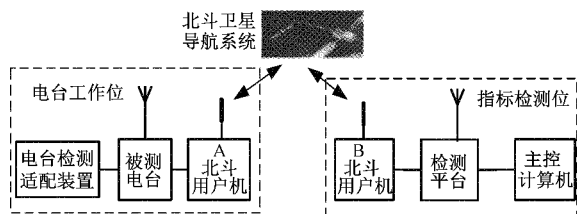


图 1 检测系统的总体结构

图 1 中,“电台工作位”是位于电台工作的台位,“指标检测位”是位于实施指标检测的台位,与电台工作位可以在同一位置,二者之间建立两个无线信道,一是电台和检测平台之间建立的超短波信道,进行超短波射频信号的发送与接收,用于电台指标的检测;二是两个台位北斗用户机建立北斗短报文信道,用于二者之间进行电台 ID(identity)号、检测结果等必要信息的传递和传输距离的推算。

1.2 各部分功能设计

1) 电台工作位

电台工作位包括被测电台、电台检测适配装置以及北斗用户机“A”3 个部分。电台检测适配装置是为配合电台指标检测设计的,能够进行电台收发状态的控制、调制信号的产生以及信噪比的检测等。北斗用户机 A 进行电台当前位置的经纬度、电台 ID 号、收发状态转换、电台信噪比等信息的发送,便于检测位掌握被测电台的基本情况。

2) 指标检测位

指标检测位包括检测平台、北斗用户机“B”和主控计

算机 3 个部分。检测平台是实现电台指标检测的主要部件,由射频接收和发射模块、信号处理模块、频谱处理模块、射频信号产生等模块组成,完成信号的收发、处理和解算。北斗用户机 A、B 通过信息交换,协调检测平台与被测电台之间工作。主控计算机采用 LabVIEW 软件进行编程,实现对检测平台和北斗用户机 B 的控制,使检测平台按照预先编制的程序完成检测工作。

3) 北斗卫星导航系统

本系统中利用北斗卫星导航系统主要完成两个方面的功用,一是测定电台与检测平台之间的距离,便于进行信道衰减的推算,二是通过短报文传送电台与检测平台之间电台 ID 号、收发状态转换、检测结果等必要的信息^[4]。

1.3 系统简要工作过程

系统简要工作流程如图 2 所示。主要包括建立联系、发射测量、接收测量、生成报表 4 个步骤。

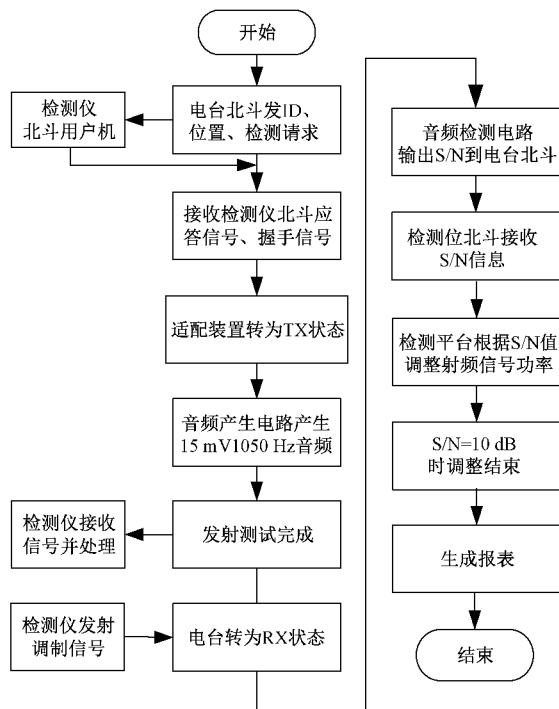


图 2 系统简要工作流程

1) 建立联系

电台工作位的北斗用户机与检测位的北斗用户通过短报文的形式发送检测请求、电台 ID、位置等信息,为无线电信号的接收与发送做好准备^[5]。

2) 发射测量

检测平台通过接收和处理电台发射的信号,实现发射功率、工作频率、调制度的参数的检测和推算。

3) 接收测量

检测平台通过发射射频信号、接收北斗用户机 B 的信噪比数值、调节衰减器的衰减量等,实现对电台灵敏度的检测和推算。

4)生成报表

主控计算机生成检测报表,并将检测的结果通过北斗短报文信道发送给电台端,便于电台工作人员掌握电台的性能指标。

详细的过程结合检测方法进行叙述。

2 硬件装置的设计

硬件装置的设计包括北斗用户机、电台检测适配装置和检测平台等,对北斗用户机的改造设计是根据北斗的通信协议实现与电台检测适配装置和检测平台的交联,便于短报文信息的收发。硬件设计中采用射频直采、 Δ/D 转换、FPGA 信号重构以及适配器收发自动切换等,提高了系统的性能和稳定性。下面主要分析电台检测适配装置和检测平台的设计。

2.1 电台检测适配装置

电台检测适配装置组成如图 3 所示。包括收发转换控制电路、音频检测电路、音频产生电路和二次电源单元 4 个部分。

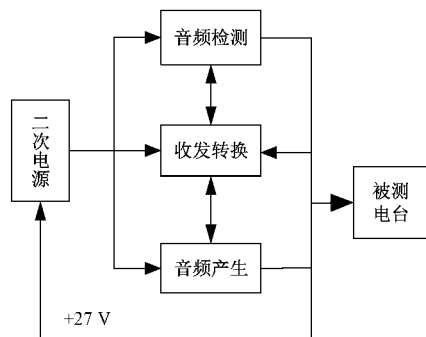


图 3 电台检测适配装置组成

图 3 中收发转换控制是根据检测的进程和北斗用户机的信号控制电台进入发射或接收状态,并按照检测流程启动或关闭音频产生电路与音频检测电路,便于测量相应状态下的指标。音频检测电路是在灵敏度检测中,检测电台接收机输出的音频信号信噪比(S/N),以此作为检测平台调节射频信号功率的依据。音频产生电路是产生 0.015 V、1 000 Hz 的音频信号,作为调制度检测时的调制信号^[6]。二次电源单元是从电台中引入 +27 V 直流电,变换成 ±12 V、+5 V 等供各级电路使用,由于耗电较小,为简化系统的结构和连接关系,本系统采用直接从电台取电再进行二次变换的方式。

2.2 检测平台

超短波电台性能无线检测平台采用模块化设计,如图 4 所示,主要由人机交互模块(包括显示屏、控制处理模块、按键板、扬声器等)、信号处理模块、频谱处理模块、射频模块和底板等部分组成^[7],具有人机交互简单、操作性强、节约成本、便携性好等特点。

1) 人机交互模块

人机交互模块由显示屏、控制处理模块、按键板、扬声

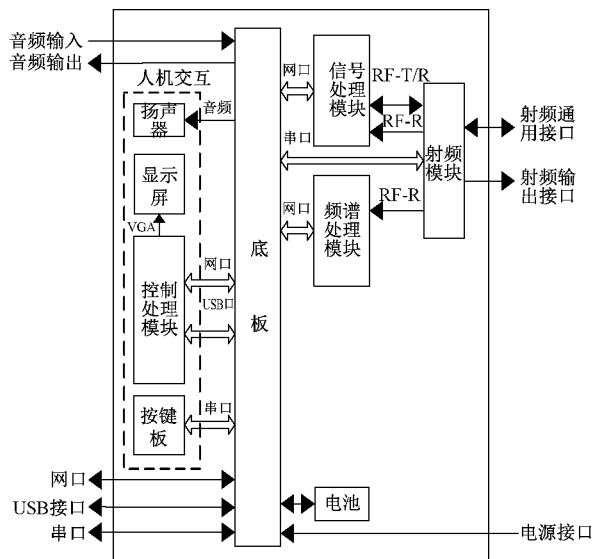


图 4 检测平台系统结构

器等组成,可以通过网口和 USB 口完成与其他模块的通信和控制。

2) 信号处理模块

信号处理模块主要由射频电路、音频电路和信号处理电路 3 部分组成,实现射频信号产生器、音频信号产生器、音频频率计、功率计、调幅度计、频偏计、驻波比检测仪等多种仪表的功能^[8]。

射频电路由接收通道和收发双向通道两路通道组成,原理如图 5 所示。

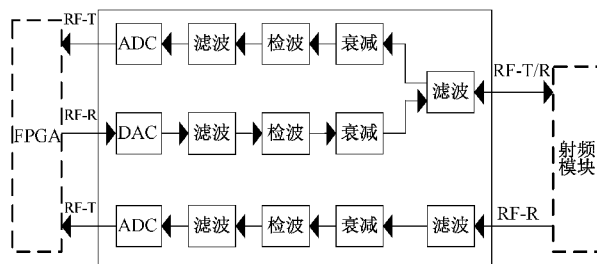


图 5 射频电路原理

射频电路与射频模块交联有两个通道,“RF-T/R”通道用于信号的收发检测,“RF-R”通道用于接收信号的存储与重构,采用两个通道是避免信号之间的干扰而影响重构的效果。

音频电路由接收通道和发射通道两路通道组成,完成音频合成与分析,合成多音或单音信号,可用于内部调制或输出,同时实现外部音频信号的分析或接收解调信号分析。原理如图 6 所示。

信号处理电路主要由 FPGA 芯片和外围电路组成,原理如图 7 所示。采用 XC7VX690T 芯片为信号处理与控制核心,运用矢量信号合成,辅以宽带接收和发射来实现信号检测^[9]。

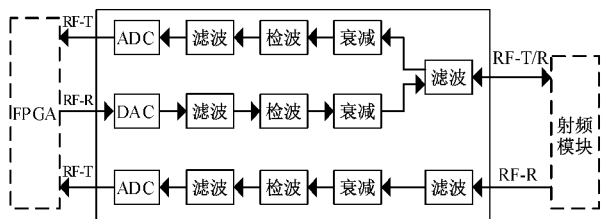


图 6 音频电路原理

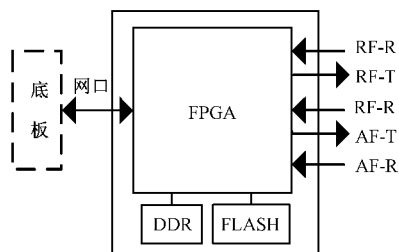


图 7 信号处理电路原理

信号处理电路是设备的核心处理单元,完成信号的上下变频、对 FLASH 中存储的信号进行重构、控制 DDR 产生射频调制信号等,是数字基带信号处理、数字音频信号产生、分析等相关算法实现的平台。

3) 射频模块

射频模块主要由选择开关、衰减器、耦合器和单片机电路等组成,可以根据不同的检测功能来控制各个开关和衰减器进行选择和衰减,是射频信号的收发通路^[10]。其工作原理如图 8 所示。

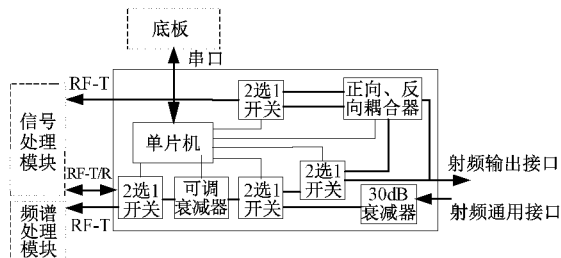


图 8 射频模块原理

4) 电源模块

超短波电台性能无线检测技术验证平台的供电电压设计为 DC12 V,供电电流为 10 A,有电池供电和外接电源适配器供电两种供电模式,便于携带。

3 检测技术与方法

3.1 发射指标检测

发射指标包括电台的发射功率、工作频率、调制度,由于检测平台集成了多种信号处理模块,接收一次信号后,可以同时多种信号的分析处理,并给出相应指标的检测值。

1) 检测过程

按照图 2 的系统工作流程,检测过程如下。

(1)电台通过北斗用户机 A 向检测平台北斗用户机 B 发送检测请求和当前位置的经纬度信息,并启动电台检测适配装置,北斗用户机 B 收到请求后,检测人员启动检测平台和主控计算机,运行检测程序,检测平台进入发射指标检测状态。

(2)主控计算机根据电台北斗用户机 A 的经纬度信息和自身北斗用户机的位置信息,计算出电台和检测平台之间的距离。

(3)北斗用户机 B 向北斗用户机 A 握手信号,电台检测适配装置发出 PTT 信号使电台处于发射状态,并产生 0.015 V、1 000 Hz 的音频信号送入电台的音频电路,在电台中形成当前工作频率 f_1 下的调制信号,通过天线发射出去。

(4)检测平台通过天线收到电台发射的信号,按照程序进行信号的处理和指标的推算,并给出相应的数值。

(5)检测平台处理完毕,北斗用户机 B 向北斗用户机 A 发出信息,电台检测适配装置收到信息后,判断发射指标测试完成,否则重新进行发射测试^[11]。

(6)电台收到北斗用户机 B 测试完成的信息后,停止发射,转入接收状态。

2) 发射指标的推算

超短波频段的信号在传输过程中,只要双方保持相对静止或低速运动的状态,距离因素对工作频率和调制度的影响可以忽略,因此,检测平台计算出的工作频率和调制度即为电台的工作频率和调制度指标数值。但由于信号在传输过程中有功率的衰减和设备的损耗,因此指标“发射功率”是需要进行推算后得出。

当电台和检测平台均采用全向天线时,收、发天线增益为 0 dB,自由空间传播损耗可定义为:

$$L_{fs} = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \tag{1}$$

式中: P_T 为电台发射的功率, P_R 为检测平台接收的功率, L_{fs} 为信号的衰减量, d 为电台与检测平台之间的距离, λ 为电台发射信号的波长,其中 d 是主控计算机根据电台北斗用户机的经纬度信息和检测平台北斗用户机的位置信息计算得出, λ 根据检测平台测量的信号工作频率 f_1 ,按照式(2)推算得出:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f_1} \tag{2}$$

式中: c 为电磁波在真空中传播的速度。

为便于计算,将式(1)转换成对数形式:

$$L_{fs}(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 20\lg\frac{4\pi d}{\lambda}$$

$$L_{fs}(\text{dB}) = 32.45 + 20\lg d + 20\lg f_1 \tag{3}$$

式中: d 的单位是 km, f_1 的单位为 MHz。

因此根据检测平台收到功率值可以推算出电台发射的功率值,如式(4)所示。

$$P_T = P_R + 32.45 + 20\lg d + 20\lg f_1 + P_K \quad (4)$$

P_K 为检测平台的功率损耗,可以通过多次对标准信号测量的方式并进行处理的方式获得^[12],也可以通过仪器标准计量单位检测得到,一旦检测平台定型, P_K 为常值。

这样,根据所测得的 d 、 f_1 、 P_K 、 P_R , 就可以推算出电台的发射功率 P_T 。

3.2 灵敏度检测

灵敏度是电台的重要指标,表示电台接收微弱信号的能力,尤其是电台在远程保障的情况下,必须进行灵敏度指标的检测。

1) 检测过程

按照图3的系统工作流程,灵敏度的检测是在发射指标的检测之后,因此,灵敏度检测时,距离 d 、频率 f_1 均为已知量,可以直接应用。检测过程为:

(1) 检测平台完成对发射指标检测后,进入接收指标检测状态。

(2) 检测平台产生一个工作频率为 f_1 、调制频率为 1 000 Hz、调制度为 30% (调幅模式)、载波功率为 P_{Tj} 的射频信号。

(3) 电台接收到检测平台的信号后进行解调,输出音频信号到电台检测适配装置进行信噪比的解算,并将信噪比的值通过北斗用户机发给指标检测位的北斗用户机,再传到主控计算机。

(4) 主控计算机得到电台的信噪比数据后进行判断,当信噪比大于 10 dB,控制检测平台的衰减器 P_m 按照 0.2 dB 的步长逐步减小 P_{Tj} ,直到信噪比等于 10 dB,记录此时的 P_{Tj} 、 P_m ;若信噪比小于 10 dB,控制检测平台的衰减器 P_m 按照 0.2 dB 的步长逐步增大 P_{Tj} ,直到信噪比等于 10 dB,记录此时的 P_{Tj} 、 P_m ,控制流程如图9所示^[13]。

(5) 检测平台停止发射信号,主控计算机将检测结果生成报表输出。

(6) 检测位北斗用户机 B 将检测结果发送给电台工作位北斗用户机 A,检测过程结束。

2) 灵敏度指标的推算

根据式(4)的机理,按照收发关系进行转换可得接收机灵敏度计算公式为:

$$P_{Rmin} = P_{Tj} - 32.45 - 20\lg d - 20\lg f_1 - P_K - P_m \Big|_{S/N=10 \text{ dB}} \quad (5)$$

式中: P_m 为衰减器的数值,增大时为正值,减小时为负值。由于 P_{Tj} 、 P_m 、 d 、 f_1 、 P_K 均为已观测测量,因此可以直接得到接收机灵敏度 P_{Rmin} 。

3.3 实验数据分析

根据设计的系统,采用某型实装电台进行 60 km 拉距测试。北斗用户机采用广州南方测绘科技股份有限公司的 LT10620 北斗短报文一体机,带有用户 IC 卡,单次通信能力为 120 个汉字或代码,默认波特率为 115 200 bit/s,具有汉字和代码两种电文传输方式,满足数据传输的要求。试

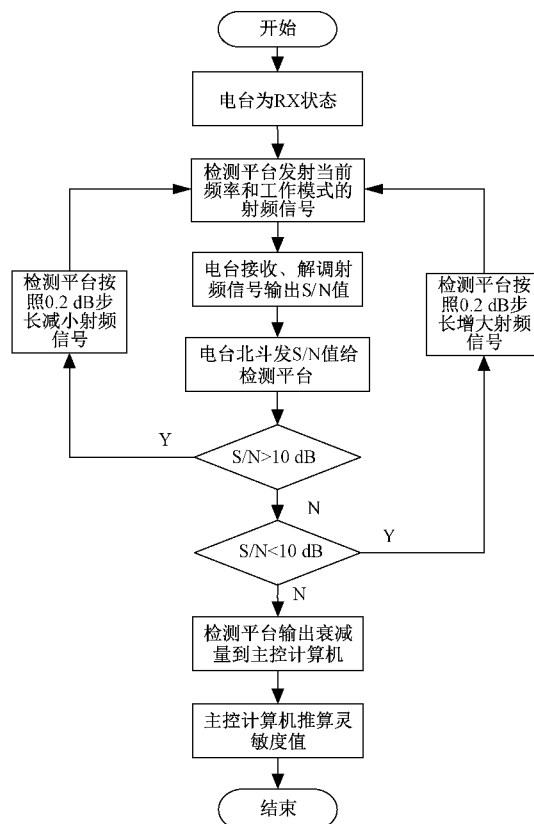


图9 灵敏度检测中射频信号功率控制过程

验采用无线遥测和现场计量测试两种方式,对工作频率、发射功率、调幅灵敏度、调频灵敏度、调幅度、频偏 6 个主要参数进行测量,结果如表1所示。

表1 电台无线检测和现场计量数据分析

序号	项目	无线检测	现场计量	误差
1	工作频率	150.000 287	150.000 145	0.95×10^{-6}
2	发射功率	10.67	10.83	1.4%
3	调幅度	82.3	84.2	2.2%
4	频偏	5.71	5.60	1.9%
5	调幅灵敏度	2.8	2.7	3.7%
6	调频灵敏度	2.2	2.3	4.3%

从表1可以看出,与现场的计量相比,频率误差为 10^{-6} ,其他各项误差均在 5% 以内,满足电台性能指标的检测要求,并能生成检测的报表。试验中对异地的两部电台进行测试,用时为 20 min,满足快速检测的要求,电台的 ID 转换、北斗数据传输均流畅。

4 技术难点

由于是对射频信号进行无线检测,信号幅值较小,调制方式多样,检测环境复杂,对检测平台的设计和检测方法与设计流程的要求较高,本系统设计过程中的技术难点主要体现 4 个方面。

4.1 无线检测链路仿真与验证

采用无线的方式进行电台指标检测,链路衰减是制约检测精度的关键因素,建立链路仿真模型,通过理论或标定或者两者结合的方式进行链路计算,减小误差。电台通过天线进行信号发射,检测平台通过天线对电台无线信号进行接收,关键参数是电台与检测设备之间的链路衰减,对这个参数有两种获取方式,一是根据理论计算衰减,二是通过标准源进行定标^[14],多测几次取平均值确定。

1) 理论计算

研究建立链路仿真模型,计算出检测设备接收的理论功率大小,再与实际综测仪数据进行比对,判断电台的发射功率是否正常,本方案中现行方法是根据电磁波在真空中的传播衰减公式(1)进行理论计算,并测定检测平台的固有损耗,二者相加得到链路损耗。

2) 标准源定标

采用一个输出标准功率的设备,架设与电台同样位置(越接近越好),采用与真实电台同样的发射天线,进行模拟电台信号发射^[15],检测平台接收信号,计算出链路真实衰减,后续检测电台的发射功率需要把这个链路衰减值进行补偿。由于电台的位置不定,这种方式在一定程度上限制了使用。

4.2 宽带接收与射频直采技术

目前宽带数字接收机主要有两种方式来实现,一是通过信道化方式进行中频采样,二是通过超高速 ADC 进行直接射频采样。随着 ADC 器件工艺水平的不断发展,结合本系统接收机工作的超短波频段,采用了射频直采方式^[16]。通过采用一种射频直接采样的宽带数字信道化系统和方法,宽频段天线接收信号后,在射频前端进行低噪声放大和增益控制工作后,采用“采样保持器(S/H)+ADC”的射频直采方式,通过多通道的时间交替采集,解决通道间的时钟失配非线性误差,直接采样高频输入信号,减少射频链路中的变频滤波等相关环节,在一定输入带宽范围内解决了并行采样的非均匀误差问题,提高了系统瞬时带宽,实现宽带信号的直接射频采样,适应了超短波频段 400 MHz 信号模拟输入带宽要求。

4.3 FPGA 技术

本系统中采用 XC7VX690T 芯片作为信号处理与控制核心,运用 FPGA 技术在检测平台中实现射频和音频信号产生、信号多级混频以及音频频率计、功率计、调幅度计、频偏计、信噪比计、驻波比检测仪等多种仪表的功能,并完成对检测平台收发状态的转换控制,是检测平台的关键技术。

4.4 电台状态重构技术

本系统在进行电台指标检测时,可以不按照检测规程进行规定工作频率和工作模式的设置,而是基于电台现行的工作频率和工作模式。在发射指标检测时,检测平台通过信号分析得到电台的工作频率和工作模式,并将信息记

录在 FLASH 存储器中^[17],并将在射频模块通过射频直采的数据也存储在 FLASH 中,在接收指标检测时,检测平台要产生并发射射频信号,FPGA 运用 FLASH 中的数据,控制 DDS 数字频率合成器,采用“基于相位谱迭代”的射频信号重构方法,产生相同工作频率和工作模式的信号,并进行频率、相位和幅度的调节,由于重构的数据来自射频直采环节,保持接收和发射的测试信号一致性,提高了检测的针对性,并有效降低了检测平台射频信号的杂散。这种检测方法不仅适用于常规的调幅、调频模式,还可用于扩频和较低速度(小于 500 Hop/s)的跳频模式,有效扩展了检测系统的工作能力。

5 结 论

本文设计的系统,检测过程不破坏电台原有的工作状态,是一种原位检测手段,能够对包括馈线、天线、话筒等所有附件在内的电台进行全方位的检测,更真实反映电台的性能。从试验效果来看,通过本系统能够进行超短波电台收发主要指标的检测,并通过不断的数据积累,逐步修正 P_m 、 L_{fs} 、 P_K 等数据,使检测的结果更加准确。在检测方法的设计上,采用了北斗卫星定位、短消息传输、FPGA、射频信号分析、调制信号产生、信号存储和重构等一系列新技术和新方法,还可以推广到电台的数传、抗干扰指标的检测,为开展电台无线检测技术和方法应用提供了借鉴。本系统的设计思想是在全自动、智能化的状态下进行电台检测,当没有携带相应的电台检测适配装置和北斗用户机时,可以通过操作人员配合的方式进行电台收发状态转换、电台位置信息告知等方式逐步操作电台,也能够实现对异地、临时有检测需求的电台进行检测。

参考文献

- [1] LI T Y, CHI X F, SHI H Y. Rolling shutter aided optical camera communications with increasing communication distance[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(5): 362-367.
- [2] 欧明敏, 易金, 武义. 一种复杂环境下的运动目标检测方法及其 FPGA 实现[J]. 通信技术, 2020, 53(12): 3128-3133.
- [3] 胡晓明. 机载短波电台检测仪设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [4] 吕志刚. 一种无人水下航行器智能自救系统的研制[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 143-146.
- [5] 李士刚, 常鹏. 水下北斗精确导航定位系统技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(1): 124-128.
- [6] 周陈彬. 新型压电能量收集接口电路设计及其宽频分析[J]. 电子设计工程, 2018, 26(6): 165-170.
- [7] 孙柏昶, 林增涛. U/V 超视距通信信道分析与系统设计[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(3): 258-261.
- [8] 宗凯. 基于 FPGA 的 DDR3 控制器设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 118-121.

- [9] 关鸿. 一种高性能射频开关单芯片的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [10] 顾振杰, 刘宇. 基于FPGA的宽带雷达回波信号处理板设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(1): 74-78.
- [11] 苗润苏, 肖旺, 苗建苏. 基于BD/GPS方位系统的机载测向标校系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(11): 245-250.
- [12] 金丽宏, 吕玉婷, 汪耀, 等. 基于部分最小二乘岭估计的粗差定值定位[J]. 测绘工程, 2016, 25(6): 62-64.
- [13] 邓鑫林, 牛红涛, 隋良红, 等. 数字式无线微弱磁场测量装置设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(2): 64-67.
- [14] KHAMISS A A, CHAI S C, ZHANG B H, et al. Energy-balanced on demand clustering improved leach protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 25(3): 353-364.
- [15] 李昌隆. 基于FPGA的DDS精确频率合成方法研究[D]. 西安:西北大学, 2019.
- [16] 刘法. 基于射频直采架构的微小数字信道化接收机仿真[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(3): 85-90.
- [17] 杨士宁, 张虹, 李盛杰, 等. 张磊基于大容量FLASH存储器的FPGA重构系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 179-181.

作者简介

田华明, 硕士, 副教授, 主要研究方向为对空通信与导航技术、电子装备检测、电子电路设计与仿真等。

E-mail: thm3000@163.com

刘云飞, 硕士, 讲师, 主要研究方向为对空通信技术、电子电路设计与仿真。

E-mail: yunfei-liu@163.com

田沿平, 硕士, 讲师, 主要研究方向为对空通信与导航技术、电子装备检测。

E-mail: 3390293282@qq.com