

## UV 波段的宽带可重构收发机的实现

吴海珍, 谢光驰

(中国航空无线电电子研究所, 上海 200241)

[摘要] 设计了一种宽带可重构收发机, 主要由三部分组成: 发射机、接收机和频率源。发射机完成从中频 70 MHz 到 100~550 MHz 的射频发射, 为了减小发射信号对相邻信道的干扰, 发射信号的杂散抑制要高。接收机从众多的电波中选出有用信号, 并将该信号搬移到中频信号, 然后放大到解调器所要求的电平值, 将射频信号变为中频信号, 由于传输路径上的损耗和多径效应, 接收机接收的信号是微弱且有变化的, 并伴随着许多干扰, 这些干扰信号强度往往远大于有用信号, 因此接收机的主要指标是灵敏度和选择性。频率源提供精确和低噪声的本振信号, 为射频变频系统核心部分之一, 频率源的主要指标是相位噪声。

[关键词] 发射机; 接收机; 可重构; 频率源; 中频信号; 带内杂散抑制; 相位噪声

[中图分类号] TN974

[文献标识码] A

[文章编号] 1006-141X(2020)02-0044-06

## Implementation of UV-Broadband Reconfigurable Transceiver

WU Hai-zhen, XIE Guang-chi

(China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** A broadband reconfigurable Transceiver is designed which is mainly composed of three parts: transmitter, receiver and frequency source. The transmitter completes the 70MHz IF signal moving to the required 100MHz-550MHz band and has sufficient transmitting power. In order to reduce the interference of transmitted signals to adjacent channels, the spurious suppression of transmitting signal is higher. Receiver completes the selection of useful signals from numerous radio waves and moves the signals to intermediate frequency signals, and then amplify it to the level required by the demodulator. Because of the loss and multipath effect in the transmission path, the signal received by the receiver is weak and changeable, accompanied by many interferences, which are often much stronger than the useful signal. Therefore, the main targets of the receiver are: sensitivity and selectivity. Frequency source provides accurate and low noise local oscillator signal, which is one of the core parts of radio frequency system. The main index of frequency source is phase noise.

**Key words:** transmitter, receiver, reconfigurable, frequency source, intermediate frequency signal, intra-band stray supersession, phase noise

在 IEEE 颁布的频段划分标准中, 超高频和甚高频 (UV: Ultrahigh Frequency and Very High Fre-

quency) 波段为 30 ~ 3000 MHz。UV 波段在通信系统特别是军事通信系统中, 具有许多独特的优点:

收稿日期: 2019-12-10

引用格式: 吴海珍, 谢光驰. UV 波段的宽带可重构收发机的实现 [J]. 航空电子技术, 2020, 51(2): 45-49.

(1)UV波段的收发机在机载、船舶等领域特别适用,应用范围很广;(2)UV波段信号穿透力很强,在环境和条件(阻碍物较多)极其糟糕的情况下仍然能正常传播;(3)UV波段的电磁波衰减较弱,覆盖范围很广;(4)国际上规定UV波段中的其中一段属军事应用独占。随着通信技术的不断进步,UV波段广泛应用于通信系统中,应用于UV波段的通信系统收发机具有极为广阔的前景<sup>[1]</sup>。

国外对于宽带收发机的研究和应用起步比较早,美国军方联合各军兵种共同发起的一项名为Speakeasy的计划。主要分为内外系统两大部分:内系统主要包括了射频控制部分、射频振荡器、发射/接收部分、信道预选器;外系统包括同信道干扰抑制部分、天线选择器、天线耦合器、以及射频天线。射频子系统主要完成信号的发射和接收,频率的上下变换、滤波、预放大、放大、分集接收、T/R开关、同信道干扰抵消等功能,该系统可以同时接收、发射多个通信信道。

随着电子信息技术的发展,信号频带越来越宽。宽带可重构收发机作为获取信息的设备前端,需求越来越强烈。同时为简化系统设计,希望对各频段信号进行统一的中频数字信号处理,对宽带收发机的需求也十分强烈,其技术指标和环境适应性要求也越来越高,可以说宽带收发机的性能对信息的获取起着非常重要的作用<sup>[2]</sup>。但是,宽带收发机存在一系列技术难点,如宽频段信号干扰问题、宽带噪声阻塞问题、强信号对弱信号压制问题、宽覆盖与细步进的矛盾、波形功能与射频资源耦合紧密的问题等,更有在恶劣环境下工作的高可靠性要求。本文就解决宽带收发机的上述难点,给出了工程设计中实用的解决方法。

## 1 收发机设计

UV波段的宽带可重构收发机由三部分组成:发射机、接收机和频率源。

通过分析收发机所使用的硬件资源属性,初步建立了包括机载通信、导航、监视、识别等十余种可重用的波形资源库,并将相应的硬件操作接口进行标准化封装,形成可被软件通信体系架构(SCA: Software Communications Architecture)框架管理和配置的逻辑设备资源<sup>[3]</sup>。硬件接口的抽象化、标准化设计可对可移植、可重构的标准化波形组件进行

灵活装配与部署,形成满足各类场景的波形应用,有效解决波形功能与射频资源耦合紧密的问题。

发射机将信道带宽为2 MHz或0.5 MHz、幅度为0 dBm的70 MHz中频信号上变频到频率范围为100~550 MHz、幅度为0 dBm的射频信号,发射机发射的信号是处于某一信道内的高频大功率信号,应尽量减少发射信号对相邻信道的干扰,发射机的主要指标是发射功率、带内杂散抑制、三阶交调和带外杂散抑制等。

接收机将在频率范围为100~550 MHz、幅度为-100~-20 dBm射频信号中选出有用信号<sup>[4]</sup>,并下变频到频率为70 MHz、信道带宽为2 MHz或0.5 MHz、幅度为-10 dBm中频信号,由于传输路径上的损耗和多径效应,接收机接收的信号微弱多变,并伴随着许多干扰,这些干扰信号强度往往远大于有用信号。

收发机系统的指标参数很大程度上取决于频率源的性能,本设计中频率源共有两种分别是920 MHz的固定频率源、950~1400 MHz的变频频率源,为收发机提供精确和低噪声的本振信号。

### 1.1 发射机设计

发射机将信道带宽为2 MHz或0.5 MHz的70 MHz中频信号,频率搬移到100~550 MHz幅度为0 dBm的射频信号,由于射频信号带宽远大于中频信号的频率,所以此设计中必须采用二次变频,首先将70 MHz中频信号和高本振920 MHz高本振混频,实现频谱搬移到850 MHz的高中频上,然后850 MHz的高中频再与950~1400 MHz高本振混频,得到100~550 MHz的射频输出,两次高本振混频,实现变频不倒谱。

由于中频信号的带宽有两种,所以在中频信号的输入端分别设计了1 dB带宽为2 MHz的70 MHz声表滤波器和1 dB带宽为0.5 MHz的70 MHz声表滤波器,然后通过开关在不同带宽的滤波器之间选择。UV波段的宽带可重构发射机的原理图如图1所示。

### 1.2 接收机设计

接收机将接收到的射频信号下变频到70 MHz幅度为-10 dBm的中频信号,由于射频信号带宽远远大于中频信号的频率<sup>[5]</sup>,为了消除镜频干扰,必须采用二次变频,首先将接收到的100~550 MHz射频信号与950~1400 MHz高本振混频,实现频谱搬移到850 MHz的高中频上,然后850 MHz的高

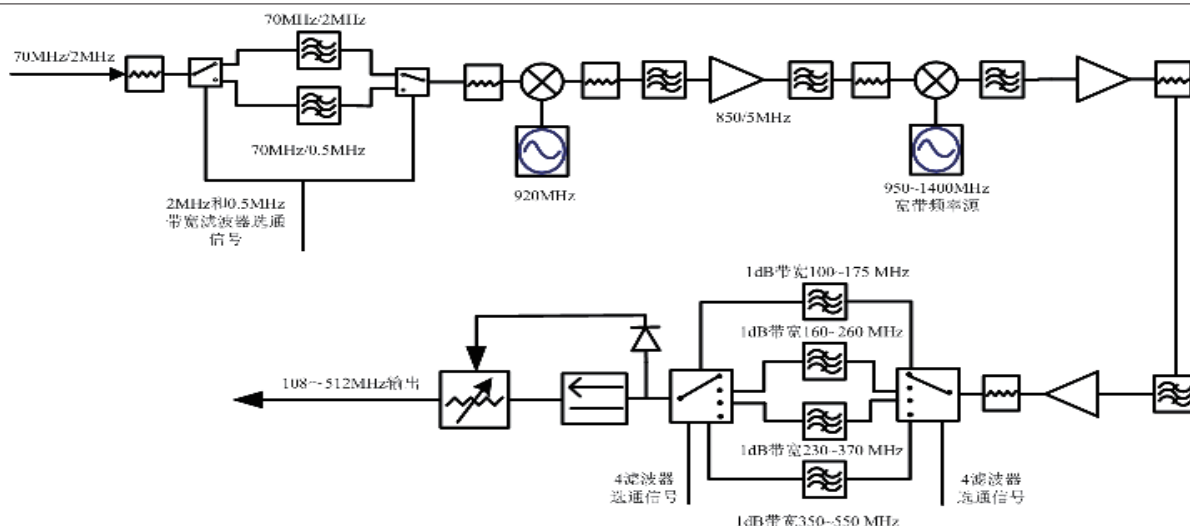


图1 发射机原理图

中频再与 920 MHz 高本振混频, 得到 70 MHz 中频信号输出, 两次高本振混频, 实现变频不倒谱。

由于中频信号的带宽有两种, 所以在 70 MHz 中频信号链路中分别设计了 1 dB 带宽为 2 MHz 的 70 MHz 声表滤波器和 1 dB 带宽为 0.5 MHz 的 70

MHz 声表滤波器, 然后通过开关在不同带宽的滤波器之间选择。

UV 波段的宽带可重构接收机的原理图如图 2 所示。

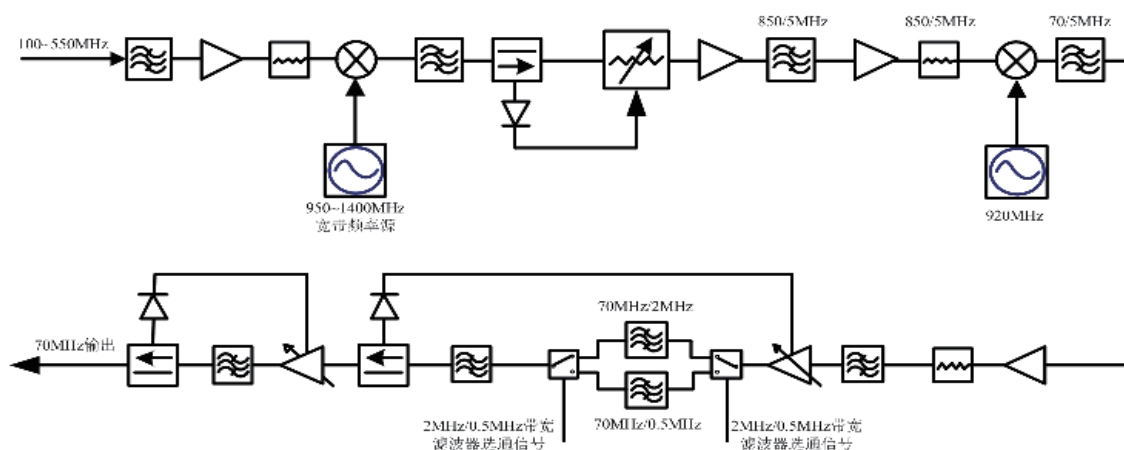


图2 接收机原理图

### 1.3 频率源设计

本设计中共有两种频率源, 分别是 920 MHz 的固定频率源、950 ~ 1400 MHz 的变频频率源。以 950 ~ 1400 MHz 的变频频率源为例, 下面介绍频率源的组成原理及频率源相位噪声的计算方法。

频率源工作原理图如图 3 所示, 图中压控振荡器 (VCO: Voltage-Controlled Oscillator) 在 900 ~ 1500 MHz 频率范围是可调的, 它的输出用一个可编程分频器进行分频到鉴相频率, 分频器的输出端馈入鉴频鉴相器的一个输入端, 并与另一个端

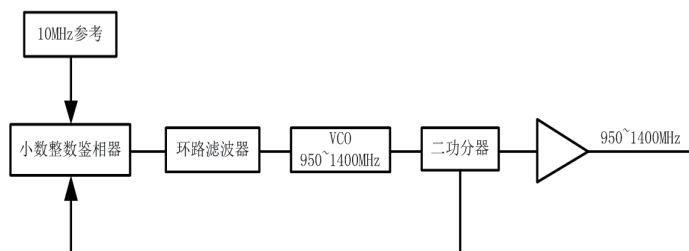


图3 频率源原理图

计算环路带宽内的相位噪声, 在频率合成器系统中, 影响相位噪声的部分主要为锁相环芯片噪声基底、N 分频器噪声、鉴相器噪声等。本设计中参考频率为 10 MHz 的恒温晶振, 其 1 kHz 处的相位噪声 -138 dBc/Hz, VCO 选用 MINI 公司的 ROS-1707-119+, 其相噪在 100 KHz 处为 -121 dBc/Hz, 鉴相器件采用 ADI 公司的 AD4153 芯片。AD4153 芯片的归一化噪声基底为 -213 dBc/Hz, 环路滤波器的带宽大约设置为 50 kHz 左右, 环路带宽内的相位噪声由鉴相器决定, 环路带宽以外的相噪由 VCO 决定, 采用 ROS-1707-119+ 作为振荡器件, 其在偏离载波 100 kHz 处的相噪为 -121 dBc/Hz, 所以此方案可满足在偏离载波 100 kHz 处的相噪要求。计算环路带宽内的相位噪声可以通过下面两种公式估算。其中 PN (Phase Noise) 为系统带内相位噪声,  $PN_{\text{syn}}$  为恒温晶振 1 kHz 处的相位噪声 -138 dBc/Hz, N 为 N 分频器值, 这里为预分频比值 INT。F<sub>ref</sub> 为恒温晶振的参考频率, F<sub>pid</sub> 为鉴相器鉴相频率, 这里等于 10

MHz。假设输出频率为 1000 MHz, 计算相位噪声的公式有两种, 分别如下:

$$(1) PN = PN_{\text{syn}} - 20 \log (F_{\text{ref}} / F_{\text{pid}}) + 20 \log (N) = -138 - 20 \log (R) + 20 \log (1000/10) = -98 \text{ dBc/Hz}$$

$$(2) PN = -213 + 10 \log (F_{\text{pid}}) + 20 \log (N) = -213 + 10 \log (10 \times 10^6) + 20 \log (1000/10) = -213 + 70 + 40 = -103 \text{ dBc/Hz}$$

上述计算取最大值, 则计算得出带内相位噪声约 -98 dBc/Hz。

## 2 关键技术

### 2.1 链路预算与分配

根据发射机要达到的几项关键技术指标<sup>[6]</sup>和器件的参数性能, 理论设计了发射机的整体增益分配框图, 如图 4 所示, 发射机前端输入信号幅度为 0 dBm, 输出信号设计为 0±1 dBm。

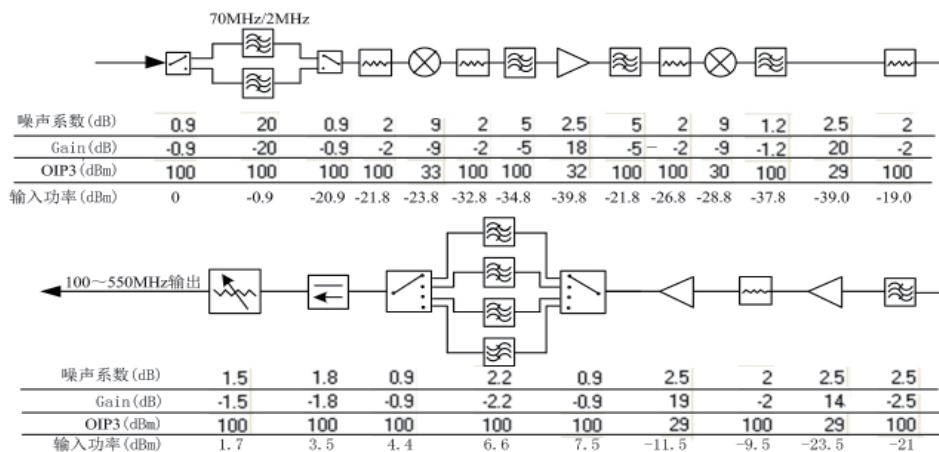


图 4 发射机整体增益分配框图

根据接收机要达到的几项关键技术指标和器件的参数性能, 设计了接收机的整体增益分配框图,

如图 5 所示, 接收机前端输入信号幅度为 -100 ~ -20 dBm, 输出信号设计为 -10±0.5 dBm。

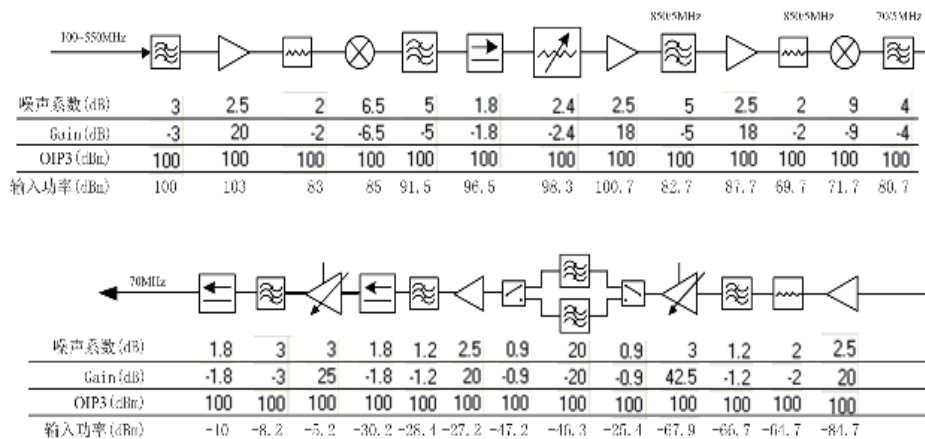


图 5 接收机整体增益分配框图

2.2 第一本振和第二本振的选择原则

本设计中发射机和接收机均采用二次变频方案,二次变频是通过混频器混频实现变频的,由于混频器实现混频功能是靠器件的非线性特性的平方项完成两信号相乘实现的,由于器件非线性特性的高次方项,使本振与输入信号除产生有用信号中频分量外还会产生很多组合频率,当某些组合频率会产生大量的组合落在中频带内的话,就会形成对有用信号的干扰,所以第一本振和第二本振的选择对收发机正常工作起到决定性的作用。现以发射机的第一本振和第二本振选择为例,详细阐述第一本振和第二本振选择原则。

如图 1 所示,本发射机选择的第一本振是 920 MHz,输入中频是 70 MHz,带宽为 2 MHz,设计中采用双平衡混频器作第一级和第二级混频电路,由图 4 可见,进入各级混频器的输入信号的幅度均小于 -20 dBm,极大地减少了干扰信号对有用信号的影响,混频分量只有  $m, n$  为奇次的分量。有用信号是 850 MHz。本发射机选择的第二本振是 950 ~ 1400 MHz,输入中频是 850 MHz,带宽为 2 MHz,设计中采用双平衡混频器,混频分量只有  $m, n$  为奇次的分量。

2.3 发射机输出端滤波器组的设计

本设计中发射机输出射频信号频段宽,造成低频段发射信号的二次和三次谐波落到 100 ~ 550 MHz 的频段内,分析可知输出频率为 108 MHz、幅度为 0 dBm 的射频信号,由于器件的非线性,108 MHz 的二次谐波是 216 MHz,幅度为 -38 dBm 左右;三次谐波是 312 MHz,幅度为 -48 dBm 左右;四次谐波是 432 MHz,幅度为 -58 dBm 左右;这些信号均在输出射频信号频带内(108 ~ 512 MHz),如果不采取相应措施,输出信号中的二次、三次和四次谐波根本无法滤除,造成带内杂散抑制远远达不到指标 -60 dBc 的要求。为解决这个问题,在射频输出端设计了一开关滤波器组,实现分段滤波,达到滤掉谐波的目的。开关滤波器组共有四个滤波器组成,指标如表 1 所示。滤波器频段划分原则是本段滤波器的最低频率的二次谐波在本滤波器的 50 dB 抑制的带外。

2.4 动态 AGC 电路设计

在实际的应用中,收发机的工作环境是十分复杂的,具有很大的不确定性,传输的距离、干扰信号的强弱、天气情况,甚至空气中某种成分的变化

表 1 滤波器组指标表

| 滤波器 | 中心频率<br>(MHz) | 1 dB 带宽<br>(MHz) | 插入损耗<br>(dB) | 50 dB 抑制带宽<br>(MHz) | 隔离度<br>(dB) |
|-----|---------------|------------------|--------------|---------------------|-------------|
| 1   | 140           | 100~175          | 4            | 65~198              | 70          |
| 2   | 210           | 160~260          | 4            | 110~310             | 70          |
| 3   | 300           | 230~370          | 4            | 150~450             | 70          |
| 4   | 440           | 350~550          | 4            | 240~640             | 70          |

都会对信号传输造成影响。自动增益控制电路就是为了保证通信系统的传输质量,提高收发机的动态范围。在现代通信系统中无论是模拟电路系统还是数字电路系统,都需要 AGC(中文译名和英文全称)电路,其对系统通信质量及设备使用寿命都有很大的作用。

AGC 电路在结构上包括两部分,一个是可控增益放大电路,另一个则是用来形成可控电压信号的。一般情况下,信号先经过增益模块得到放大,然后将放大过的信号送往 AGC 检波器中进行处理,再经过一个低通滤波器去除掉干扰信号和噪声,这就形成了一个电压信号,并将这个电压信号反馈回增益放大电路,以此来控制放大电路的增益。在实际应用中,控制放大电路增益的一般有以下三种方法:

(1) 通过晶体管的基本特性,改变其工作状态来调整其放大系数;

(2) 在电路中加入衰减器网络,这种衰减器可由反馈回来的电压信号来控制;

(3) 改变放大电路的结构,将其负载变为可控电阻,阻值受反馈电压信号控制。

考虑实际的设计需求和成本,设计采用第二种方法来控制增益。本设计要求的动态范围是 80 dB,考虑到将接收机的总增益分散到高频,第一中频和中频三个频段上,可变增益范围 30 dB 放在第一中频 850 MHz,通过检波输入信号的幅度判断是否衰减 30 dB 实现,若输入幅度大于 -40 dBm,控制器即发出衰减量 30 dB 的命令,可变增益范围 50 dB 放在中频 70 MHz 上,50 dB 可变增益范围通过两套反馈型 AGC 电路来实现,这样的设计使得高增益放大实现相对容易,也相对稳定。

3 测试结果

设计最后对各项指标进行了测试:信号源输入相应频率和功率的信号,频谱仪接收射频板输出信号。100 ~ 550 MHz 频带内调试记录表如表 2 所示。

表 2 调试记录表

参 考 文 献

| 项目     | 测试记录                                                                      |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| 输入驻波比  | < 1.8                                                                     |
| 输出驻波比  | < 1.4                                                                     |
| 输出信号功率 | 0 dBm±1 dBm                                                               |
| 输出信号带宽 | 2.8 MHz                                                                   |
| 带内波动   | < 1 dB                                                                    |
| 带外抑制   | > 60 dBc                                                                  |
| 带内杂散抑制 | > 60 dBc                                                                  |
| 噪声系数   | < 10 dB                                                                   |
| 动态范围   | > 80 dB                                                                   |
| 谐波抑制   | > 60 dBc                                                                  |
| 三阶交调   | > 30 dBc                                                                  |
| 相位噪声   | 100 Hz, 优于 -65 dBc/Hz;<br>1 kHz, 优于 -75 dBc/Hz;<br>10 kHz, 优于 -85 dBc/Hz; |
| 功耗（电流） | 1.5 A（上电启动）<br>1.25 A（稳定后）                                                |

本设计最终达到的主要技术指标分别为：发射机：100 ～ 550 MHz 射频输出幅度为 0±1 dBm，三阶交调 >30 dBc，杂散抑制 ≥60 dBc，减少了发射信号对相邻信道的干扰；接收机：70 MHz 中频信号功率 -0±0.5 dBm，噪声系数 9 dB，谐波抑制 ≥60 dBc，动态范围 80 dB，保证了对有用信号的接收。本方案很好地满足技术要求，有效解决宽频段下信号干扰问题、宽带噪声阻塞问题、宽覆盖与细步进的矛盾，并具备在恶劣工作环境下的可靠性。

4 结束语

本文阐述了 100 ～ 550 MHz 的收发机设计中需要考虑的几个问题，通过对一些概念的解释和关键技术的论述，很好地阐明了电路设计过程中需要注意的问题。从对各个指标的设计分析和测试结果看出，整个设计达到了系统要求，能有效处理有用信号和抑制干扰信号，在 VU 语音电台、数传电台、综合数据链、仪表着陆系统（ILS: Instrument Landing System）和超高频（UHF: Ultrahigh Frequency）卫通等设备中得到广泛应用，即使它的部分电路也对一些特殊要求收发机的设计具有很高的参考价值。

[1] 舒浩. 新一代无线通信射频收发机系统的研究和实现 [D]. 西安电子科技大学, 2011.

[2] 张胜. 宽带无线通信系统射频收发前端研究 [D]. 杭州电子科技大学, 2011.

[3] 崔立良. 无线通信射频收发系统设计探究 [J]. 数字技术与应用, 2011, (14): 210-211.

[4] 余江. 数传电台射频前端接收模块的研制 [D]. 电子科技大学, 2012.

[5] 刘民伟. 10MHz-12GHz 超宽带接收机的设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2013.

[6] 王枫. UHF 频段无线收发信机前端设计 [J]. 电子设计工程, 2011, 19(01): 91-95.