



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110149121 B

(45) 授权公告日 2021.01.08

(21) 申请号 201910310353.4

审查员 张婧

(22) 申请日 2019.04.17

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110149121 A

(43) 申请公布日 2019.08.20

(73) 专利权人 北京邮电大学

地址 100876 北京市海淀区西土城路10号

(72) 发明人 吴永乐 王晓成 王卫民 孙少浦

白照京 刘元安

(74) 专利代理机构 北京中政联科专利代理事务

所(普通合伙) 11489

代理人 陈超

(51) Int.Cl.

H04B 1/40 (2015.01)

H04B 1/403 (2015.01)

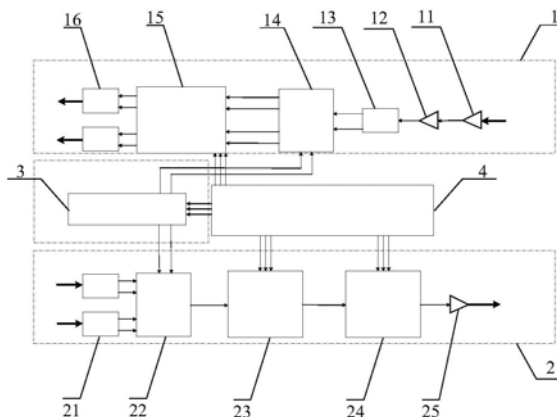
权利要求书2页 说明书6页 附图7页

(54) 发明名称

一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端

(57) 摘要

本发明公开了一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,包括:接收模块、发射模块、本振模块、控制模块和电源模块;接收模块的输入端配置为接收第一射频信号;发射模块的输出端配置为输出第二射频信号;本振模块配置为将本振信号分别发送至发射模块和接收模块;控制模块包括检测单元和控制单元,检测单元与接收模块输入端连接,配置为检测第一射频信号的频率值,并将与第一射频信号所处频段一一对应的检测信号发送至控制单元,控制单元与本振模块电连接,配置依据检测信号调节本振信号的频率值和/或幅度值。本发明通过结合软件无线电技术,实现了依据不同频段实时调整本振频率,调整链路增益和信号带宽,对通信系统适应度较强,传输速率高。



1. 一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,包括:接收模块(1)、发射模块(2)、本振模块(3)、控制模块(4)和电源模块(5);

所述接收模块(1)的输入端配置为接收第一射频信号,其输出端与基带模块输入端连接;所述接收模块(1)包括:依次连接的低噪声放大器(11)、二级放大器(12)、第一巴伦(13)、解调器(14)、可调滤波放大器(15)和第二巴伦(16),所述低噪声放大器(11)配置为接收所述第一射频信号,所述第二巴伦(16)与所述基带模块输入端连接;

所述发射模块(2)的输入端与基带模块输出端连接,其输出端配置为输出第二射频信号;所述发射模块(2)包括:依次连接的第三巴伦(21)、调制器(22)、可调衰减器(23)、第二可变增益放大器(24)和宽带功率放大器(25),所述第三巴伦(21)与所述基带模块输出端连接,所述宽带功率放大器(25)配置为输出所述第二射频信号;

所述本振模块(3)配置为将本振信号分别发送至所述发射模块(2)和所述接收模块(1);

所述控制模块(4)包括检测单元(41)和控制单元(42);

所述检测单元(41)与所述接收模块(1)的输入端连接,配置为检测所述第一射频信号的频率值,并将与所述第一射频信号所处频段一一对应的检测信号发送至所述控制单元(42);

所述控制单元(42)与所述本振模块(3)电连接,配置为依据所述检测信号调节所述本振信号的频率值和/或幅度值。

2. 根据权利要求1所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,

所述本振模块(3)包括第一本振单元(31)和第二本振单元(32);

所述本振信号包括第一本振信号和第二本振信号;

所述第一本振单元(31)配置为将所述第一本振信号发送至所述接收模块(1);

所述第二本振单元(32)配置为将所述第二本振信号发送至所述发射模块(2)。

3. 根据权利要求2所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述第一本振信号和/或所述第二本振信号为差分信号。

4. 根据权利要求2所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述第一本振信号和所述第二本振信号的相位差为 $90^{\circ}$ 。

5. 根据权利要求1所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述控制模块(4)与所述本振模块(3)通过串行外设接口通信连接。

6. 根据权利要求1所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述控制模块(4)与所述可调滤波放大器(15)电连接,还配置为控制所述可调滤波放大器(15)的通带截止频率。

7. 根据权利要求6所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,

所述可调滤波放大器(15)包括:依次连接且互相匹配的预放大器(151)、可编程滤波器(152)和第一可变增益放大器(153);

所述控制模块(4)与所述可编程滤波器(152)电连接,还配置为控制所述可编程滤波器(152)的通带截止频率;

所述电源模块(5)分别与所述第一可变增益放大器(153)和所述控制模块(4)电连接;

所述控制模块(4)配置为通过所述电源模块(5)控制所述第一可变增益放大器(153)的

增益。

8. 根据权利要求1所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述控制模块(4)与所述可调衰减器(23)电连接,还配置为控制所述可调衰减器(23)的增益。

9. 根据权利要求1所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述控制模块(4)与所述第二可变增益放大器(24)电连接,还配置为控制所述第二可变增益放大器(24)的增益。

10. 根据权利要求1所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,所述电源模块(5)包括第一电源单元(51)、第二电源单元(52)和第三电源单元(53);所述第一电源单元(51)与所述接收模块(1)电连接,配置为给所述接收模块(1)提供第一预设电压;

所述第二电源单元(52)与所述发射模块(2)电连接,配置为给所述发射模块(2)提供第二预设电压;

所述第三电源单元(53)与所述本振模块(3)电连接,配置为给所述本振模块(3)提供第三预设电压。

11. 根据权利要求7所述的可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,其特征在于,

所述电源模块(5)还包括:第四电源单元(54);

所述第四电源单元(54)分别与所述第一可变增益放大器(153)和所述控制模块(4)电连接;

所述控制模块(4)配置为通过所述第四电源单元(54)控制所述第一可变增益放大器(153)的增益。

## 一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端

### 技术领域

[0001] 本发明涉及射频信号领域,特别涉及一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端。

### 背景技术

[0002] 在过去的40年中,无线通信技术以惊人的速度经历了四次主要的技术变革。在此期间,多种通信频段被人为的规定与划分,例如LTE700 (698-787MHz), GSM850 (824-894MHz), GSM900 (880-960MHz), GSM1800 (1710-1880MHz), GSM1900 (1850-1990MHz), UMTS (1920-2170MHz), LTE2300 (2300-2400MHz), LTE2500 (2500-2690MHz)等。随着5G时代越来越近,在不久的将来移动通信系统可能还需要覆盖5G频段,如LTE42/43/46 (3400-3800MHz, 5150-5195MHz),而不同的频段对应于不同的用途与功能。在可以预见的未来很长一段时间,多种通信协议标准还需要共存,当前的通信离不开2G网络,而互联网的应用则离不开3G,4G通信频段的支持。

[0003] 所以,如何用一种统一的技术方案来满足多种通信制式的需要成为了目前广大研究者所亟需解决的问题。对于收发系统来说,所需要满足的并不仅仅是单一的频段,而是在满足技术要求的情况下尽量覆盖较宽的频带,从而适用不同的使用环境。从当今现有的技术方案来说,收发系统实现超宽带覆盖还存在着诸多问题。例如某些频段解调,调制效果不能满足需求,频带利用率过低,某些重要频段不能覆盖等。在不久就要来临的5G时代,超宽带覆盖将变得尤为重要,超宽带收发系统有着更为广泛的应用前景。

[0004] 目前收发系统现有的技术方案大概有以下几种:超外差架构,零中频架构,数字中频架构。本发明使用零中频架构作为最终的技术方案。由于零中频接收机在系统中不存在中频(IF),避免了镜像干扰,节省了镜像滤波器的设计成本;同时,它免去了中频变频模块和中频带通滤波器,大大简化了整个接收机的设计,节约了成本,易于高度集成化和小型化。

[0005] 另外,软件无线电技术的应用可以大大提高系统的灵活性。根据国际电信联盟(ITU)的定义,软件无线电是一个具有开放性、标准化、模块化的通用硬件平台,将各种功能,如调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等用软件来完成,并使宽带A/D、D/A尽可能靠近天线,以研制出具有高度灵活性、开放性的新一代无线通信系统。因此,零中频架构及软件无线电将是发展趋势。

[0006] 如上图所示,现有的零中频架构技术方案囿于当今硬件发展状况,可覆盖频率一般来说较为有限,很难兼顾各种通信制式,特别是未来的5G频段。并且,对于不同的通信标准来说,传统的收发系统不能实时调控,本振频率不可调或者可调范围过小,以至难于适用不同的使用环境。在当今通信制式繁多,对系统的灵活性要求也越来越高,传统单一的收发系统已经远远不能满足当今高速率,高灵活度的使用需求。

## 发明内容

[0007] 本发明实施例的目的是提供一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,通过结合软件无线电技术,实现了依据使用环境来实时调整本振频率,并可调整链路增益,信号带宽,频带利用率高,覆盖频率范围广,灵活性强,可以兼顾各种通信制式尤其是5G频段,对通信系统适应度较强,传输速率高。

[0008] 为解决上述技术问题,本发明实施例提供了一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,包括:接收模块、发射模块、本振模块、控制模块和电源模块;

[0009] 所述接收模块的输入端配置为接收第一射频信号,其输出端与基带模块输入端连接;

[0010] 所述发射模块的输入端与基带模块输出端连接,其输出端配置为输出第二射频信号;

[0011] 所述本振模块配置为将本振信号分别发送至所述发射模块和所述接收模块;

[0012] 所述控制模块包括检测单元和控制单元;

[0013] 所述检测单元与所述接收模块的输入端连接,配置为检测所述第一射频信号的频率值,并将与所述第一射频信号所处频段一一对应的检测信号发送至所述控制单元;

[0014] 所述控制单元与所述本振模块电连接,配置依据检测信号调节所述本振信号的频率值和/或幅度值。

[0015] 进一步地,所述本振模块包括第一本振单元和第二本振单元;

[0016] 所述本振信号包括第一本振信号和第二本振信号;

[0017] 所述第一本振单元配置为将所述第一本振信号发送至所述接收模块;

[0018] 所述第二本振单元配置为将所述第二本振信号发送至所述发射模块。

[0019] 进一步地,所述第一本振信号和/或所述第二本振信号为差分信号。

[0020] 进一步地,所述第一本振信号和所述第二本振信号的相位差为 $90^{\circ}$ 。

[0021] 进一步地,所述控制模块与所述本振模块通过串行外设接口通信连接。

[0022] 进一步地,所述接收模块包括:依次连接的低噪声放大器、二级放大器、第一巴伦、解调器、可调滤波放大器和第二巴伦,所述低噪声放大器配置为接收所述第一射频信号,所述第二巴伦与所述基带模块输入端连接;

[0023] 所述控制模块与所述可调滤波放大器电连接,配置为控制所述可调滤波放大器的通带截止频率。

[0024] 进一步地,所述可调滤波放大器包括:依次连接且互相匹配的预防大器、可编程滤波器和第一可变增益放大器;所述控制模块与所述可编程滤波器电连接,还配置为控制所述可编程滤波器的通带截止频率;

[0025] 所述电源模块分别与所述第一可变增益放大器和所述控制模块电连接;

[0026] 所述控制模块配置为通过所述电源模块控制所述第一可变增益放大器的增益。

[0027] 进一步地,所述发射模块包括:依次连接的第三巴伦、调制器、可调衰减器、第二可变增益放大器和宽带功率放大器,所述第三巴伦与所述基带模块输出端连接,所述宽带功率放大器配置为输出所述第二射频信号。

[0028] 进一步地,所述控制模块与所述可调衰减器电连接,还配置为控制所述可调衰减器的增益。

- [0029] 进一步地,所述控制模块与所述第二可变增益放大器电连接,还配置为控制所述第二可变增益放大器的增益。
- [0030] 进一步地,所述电源模块包括第一电源单元、第二电源单元和第三电源单元;
- [0031] 所述第一电源单元与所述接收模块电连接,配置为给所述接收模块提供第一预设电压;
- [0032] 所述第二电源单元与所述发射模块电连接,配置为给所述发射模块提供第二预设电压;
- [0033] 所述第三电源单元与所述本振模块电连接,配置为给所述本振模块提供第三预设电压。
- [0034] 进一步地,所述电源模块还包括:第四电源单元;
- [0035] 所述第四电源单元分别与所述第一可变增益放大器和所述控制模块电连接;
- [0036] 所述控制模块配置为通过所述第四电源单元控制所述第一可变增益放大器的增益。
- [0037] 本发明实施例的上述技术方案具有如下有益的技术效果:
- [0038] 通过结合软件无线电技术,实现了依据不同频段的负荷情况进行实时调整本振频率,并可调整链路增益和信号带宽,频带利用率高,灵活性强,覆盖频率范围广,可以兼顾各种通信制式尤其是5G频段,对通信系统适应度较强,传输速率高。

#### 附图说明

- [0039] 图1是本发明实施例提供的传统零中频收发系统架构的模块示意图;
- [0040] 图2是本发明实施例提供的各模块逻辑连接示意图;
- [0041] 图3是本发明实施例提供的架构示意图;
- [0042] 图4是本发明实施例提供的射频模拟前端的模块示意图;
- [0043] 图5是本发明实施例提供的控制模块的模块示意图;
- [0044] 图6是本发明实施例提供的本振模块的模块示意图;
- [0045] 图7是本发明实施例提供的接收模块的模块示意图;
- [0046] 图8是本发明实施例提供的可调滤波放大器的模块示意图;
- [0047] 图9是本发明实施例提供的发射模块的模块示意图;
- [0048] 图10是本发明实施例提供的电源模块的模块示意图。
- [0049] 附图标记:
- [0050] 1、接收模块,11、低噪声放大器,12、二级放大器,13、第一巴伦,14、解调器,15、可调滤波放大器,151、预防大器,152、可编程滤波器,153、第一可变增益放大器,16、第二巴伦,2、发射模块,21、第三巴伦,22、调制器,23、可调衰减器,24、第二可变增益放大器,25、宽带功率放大器,3、本振模块,31、第一本振单元,32、第二本振单元,4、控制模块,41、检测单元,42、控制单元,5、电源模块,51、第一电源单元,52、第二电源单元,53、第三电源单元,54、第四电源单元。

#### 具体实施方式

- [0051] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明了,下面结合具体实施方式并参

照附图,对本发明进一步详细说明。应该理解,这些描述只是示例性的,而并非要限制本发明的范围。此外,在以下说明中,省略了对公知结构和技术的描述,以避免不必要地混淆本发明的概念。

[0052] 图1是本发明实施例提供的传统零中频收发系统架构的模块示意图。

[0053] 请参照图1,在传统零中频收发系统中,对于接收机部分来说,天线接收的射频信号经过滤波,放大之后与本振信号直接混频,使射频信号直接下变频到基带,经过低通滤波器输出两路相位相差90度的I、Q正交信号;对于发射机部分来说,接收的I、Q正交信号经过低通滤波器之后与本振信号混频,直接上变频为射频信号,经过放大、滤波之后,经由天线发射。

[0054] 图2是本发明实施例提供的各模块逻辑连接示意图。

[0055] 图3是本发明实施例提供的架构示意图。

[0056] 图4是本发明实施例提供的射频模拟前端的模块示意图。

[0057] 图5是本发明实施例提供的控制模块的模块示意图。

[0058] 请参照图2、图3、图4和图5,本发明实施例提供了一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,包括:接收模块1、发射模块2、本振模块3、控制模块4和电源模块5。接收模块1的输入端配置为接收第一射频信号,其输出端与基带模块输入端连接。发射模块2的输入端与基带模块输出端连接,其输出端配置为输出第二射频信号。本振模块3配置为将本振信号分别发送至发射模块1和接收模块2。控制模块4包括检测单元41和控制单元42;检测单元41与接收模块1的输入端连接,配置为检测第一射频信号的频率值,并将与第一射频信号所处频段一一对应的检测信号发送至控制单元42;控制单元42与本振模块3电连接,配置为依据检测信号调节本振信号的频率值和/或幅度值。

[0059] 其中,第一射频信号为可调超宽带零中频收发机射频模拟前端接收的射频信号,第二射频信号为可调超宽带零中频收发机射频模拟前端发射的信号。

[0060] 图6是本发明实施例提供的本振模块的模块示意图。

[0061] 请参照图6,本振模块3包括第一本振单元31和第二本振单元32。本振信号包括第一本振信号和第二本振信号。第一本振单元31配置为将第一本振信号发送至接收模块1。第二本振单元32配置为将第二本振信号发送至发射模块2。

[0062] 在本发明实施例的一个实施方式中,本振模块3的输出频率范围为137.5MHz-4400 MHz,且输出幅度可调,输出频率和输出幅度由控制模块4依据使用环境进行实时调节。

[0063] 可选的,控制模块4与本振模块3通过串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)接口通信连接。

[0064] 可选的,第一本振信号和/或第二本振信号为差分信号。

[0065] 可选的,第一本振信号和第二本振信号的相位差为90°。

[0066] 控制模块4采用数字控制模式,将控制程序下载至单片机中,通过SPI连接至接收模块1、发射模块2和/或本振模块3。在使用过程中,通过修改程序控制接收模块1、发射模块2和/或本振模块3的工作模式,以实现实时控制,可以依据不同的使用环境调整工作状态,使用范围广,频带利用率高。

[0067] 图7是本发明实施例提供的接收模块的模块示意图。

[0068] 请参照图7,接收模块1包括:依次连接的低噪声放大器11、二级放大器12、第一巴

伦13、解调器14、可调滤波放大器15和第二巴伦16,低噪声放大器11配置为接收第一射频信号,第二巴伦16与基带模块输入端连接。控制模块4与可调滤波放大器15电连接,还配置为控制可调滤波放大器15的通带截止频率。

[0069] 图8是本发明实施例提供的可调滤波放大器的模块示意图。

[0070] 请参照图8,可调滤波放大器15包括:依次连接且互相匹配的预防大器151、可编程滤波器152和第一可变增益放大器153。可编程滤波器152和第一可变增益放大器153互相匹配。控制模块4与可编程滤波器152电连接,还配置为控制可编程滤波器152的通带截止频率;电源模块5分别与第一可变增益放大器153和控制模块4电连接;控制模块4配置为通过电源模块5控制第一可变增益放大器153的增益。

[0071] 具体的,可调滤波放大器15包括正交的两路差分信号,每一路均包括一个预防大器151、可编程滤波器152和第一可变增益放大器153。第一可变增益放大器153的增益浮动范围为50dB,增益范围为-5dB-45dB,由电源模块5的第四电源单元53提供输入电压,输出电压的范围为0.6V-1.8V,步长为10MV,控制模块4通过第四电源单元53控制第一可变增益放大器153的增益值。输入电压与增益为正比例关系,具体比例值约为30MV/dB。

[0072] 在本发明实施例的一个实施方式中,射频模拟前端接收到的信号先经过低噪声放大器11,在尽可能抑制噪声的情况下将信号放大13dB。二级放大器12继续放大信号,放大增益约为13dB。二级放大器12输出的信号进入第一巴伦13,第一巴伦13的阻抗比为1:1,将接收到的阻抗为50 $\Omega$ 的单端信号转换为两路阻抗均为50 $\Omega$ 的差分信号,单端信号转换为差分信号可以有效抑制多频带信号的共模干扰。第一巴伦13输出的差分信号与本振模块3输出的两路本振差分射频信号在解调器14中混频,得到正交差分信号。解调器14输出的正交差分信号依次进入预放大器151/可编程滤波器152和第一可变增益放大器153。可编程滤波器152和第一可变增益放大器153可提供-5dB至45dB的增益;此外,可编程滤波器152在控制模块4的控制下实现通带截止频率可调,通带截止频率的调整范围为1MHz-30MHz,调整步进为1MHz。

[0073] 图9是本发明实施例提供的发射模块的模块示意图。

[0074] 请参照图9,发射模块2包括:依次连接的第三巴伦21、调制器22、可调衰减器23、第二可变增益放大器24和宽带功率放大器25,第三巴伦21与基带模块输出端连接,宽带功率放大器25配置为输出第二射频信号。

[0075] 在本发明实施例的一个实施方式中,阻抗为50 $\Omega$ 的正交基带模块分别进入第三巴伦21,转换为正交差分信号;其中第三巴伦21的阻抗比为8:1,差分信号的阻抗为400 $\Omega$ 。正交差分信号与本振模块输出的正交差分信号在调制器22中进行混频,将基带的正交差分信号上变频为正交差分射频信号。射频信号进入可调衰减器23,可调衰减器23最大可提供31.5dB的衰减量,增加了整个链路的动态范围。然后,可调衰减器23输出的射频信号进入第二可变增益放大器24,第二可变增益放大器24可提供31.5dB的增益动态范围。第二可变增益放大器24输出的射频信号进入宽带功率放大器25,宽带功率放大器25可提供大约15dB的增益。

[0076] 综上,接收模块1可提供总计63dB的动态范围,发射模块2可提供总计50dB的动态范围,传输频率范围为0.6GHz-3.9GHz,涵盖0.915GHz、2.45GHz和3.5GHz等重要频段。接收模块1和发射模块2的误差向量幅度(Error Vector Magnitude,EVM)预计在8%以下,收发



带内平坦度优于3dBp-p,相邻信道功率比(Adjacent Channel Power Ratio,ACPR)优于-50dBc。控制模块4与可调衰减器23电连接,还配置为控制可调衰减器23的增益。

[0077] 控制模块4与第二可变增益放大器24电连接,还配置为控制第二可变增益放大器24的增益。

[0078] 在本发明实施例的一个实施方式中,可调滤波放大器15、可调衰减器23、第二可变增益放大器24、本振模块3和第四电源单元54均设置有不同位数和数量的数据寄存器,控制模块4通过调整数据寄存器的数值以控制本振模块3、第二可变增益放大器24、可调衰减器23和可滤波放大器15的工作模式。

[0079] 图10是本发明实施例提供的电源模块的模块示意图。

[0080] 请参照图10,电源模块5包括第一电源单元51、第二电源单元52和第三电源单元53;第一电源单元51与接收模块1电连接,配置为给接收模块1提供第一预设电压;第二电源单元52与发射模块2电连接,配置为给发射模块2提供第二预设电压;第三电源单元53与本振模块3电连接,配置为给本振模块3提供第三预设电压。

[0081] 电源模块5还包括:第四电源单元54。第四电源单元54分别与第一可变增益放大器153和控制模块4电连接。

[0082] 控制模块4配置为通过第四电源单元54控制第一可变增益放大器153的增益。

[0083] 在本发明实施例的一个实施方式中,第一电源单元51和第二电源单元52的输出信号为5V直流稳定电压,第三输出单元53的输出电压为3.3V直流稳定电压,第四电源单元54的输出电压范围为0.6-1.8V。

[0084] 本发明实施例旨在保护一种可调超宽带零中频收发机射频模拟前端,包括:接收模块、发射模块、本振模块、控制模块和电源模块;接收模块的输入端配置为接收第一射频信号,其输出端与基带模块输入端连接;发射模块的输入端与基带模块输出端连接,其输出端与配置为输出第二射频信号;本振模块配置为将本振信号分别发送至发射模块和接收模块;控制模块包括检测单元和控制单元;检测单元与接收模块的输入端连接,配置为检测第一射频信号的频率值,并将与第一射频信号所处频段一一对应的检测信号发送至控制单元;控制单元与本振模块电连接,配置依据检测信号调节本振信号的频率值和/或幅度值。上述方案具备如下有益的技术效果:

[0085] 通过结合软件无线电技术,实现了依据不同频段的负荷情况进行实时调整本振频率,并可调整链路增益和信号带宽,频带利用率高,频带利用率高,覆盖频率范围广,灵活性强,可以兼顾各种通信制式尤其是5G频段,对通信系统适应度较强,传输速率高。

[0086] 应当理解的是,本发明的上述具体实施方式仅仅用于示例性说明或解释本发明的原理,而不构成对本发明的限制。因此,在不偏离本发明的精神和范围的情况下所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。此外,本发明所附权利要求旨在涵盖落入所附权利要求范围和边界、或者这种范围和边界的等同形式内的全部变化和修改例。

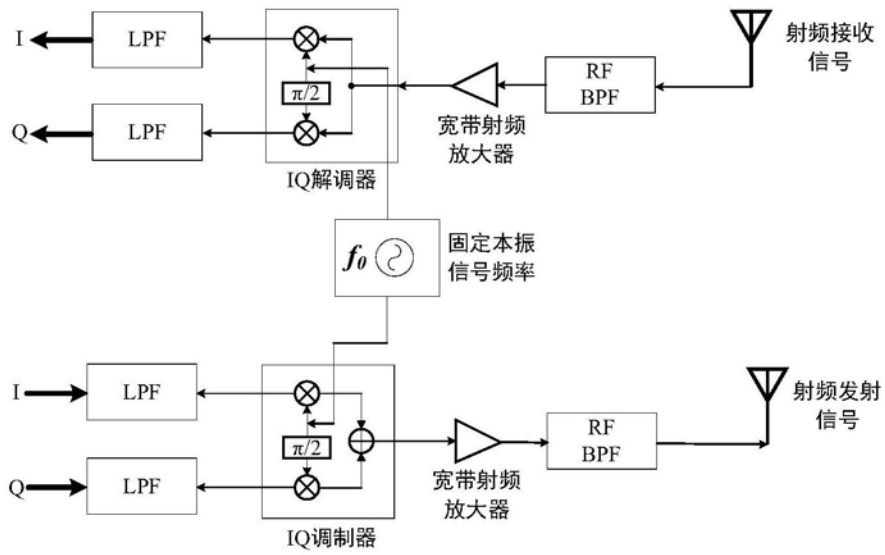


图1

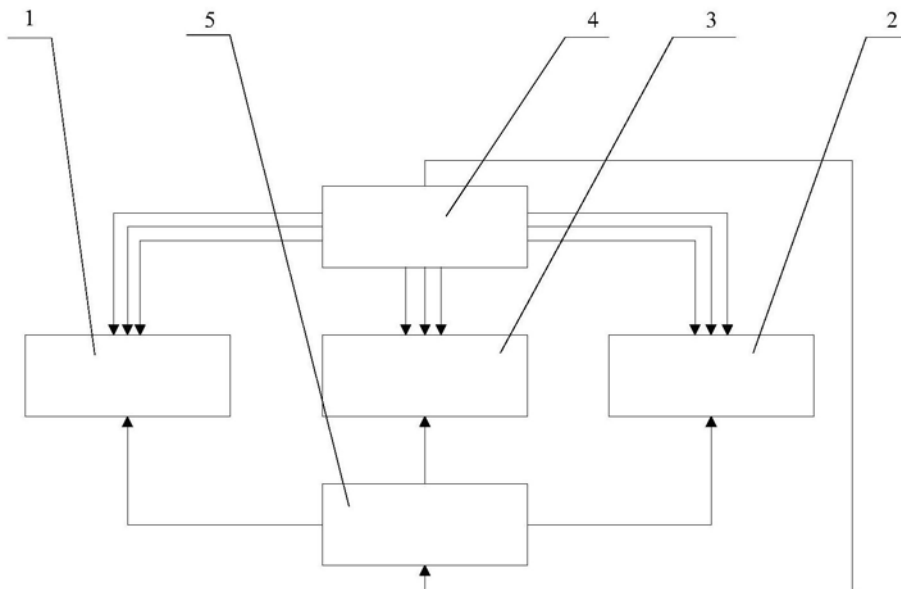


图2

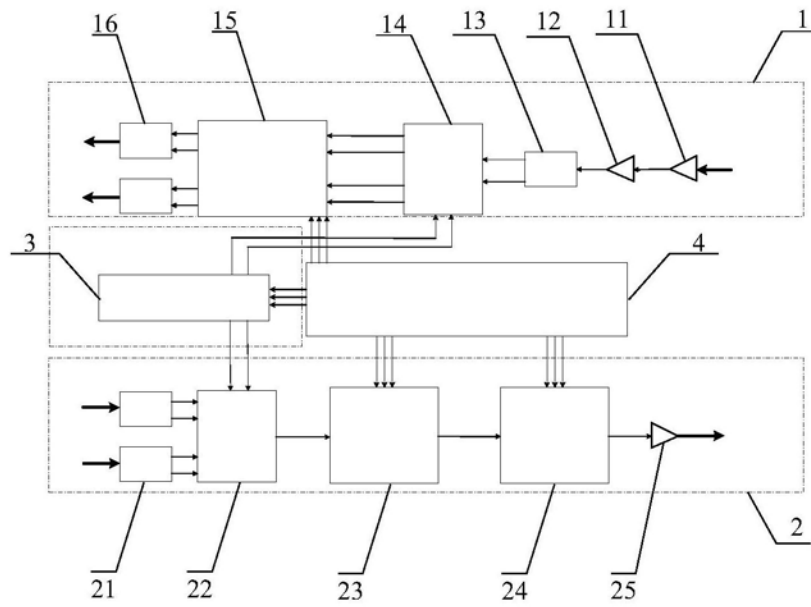


图3

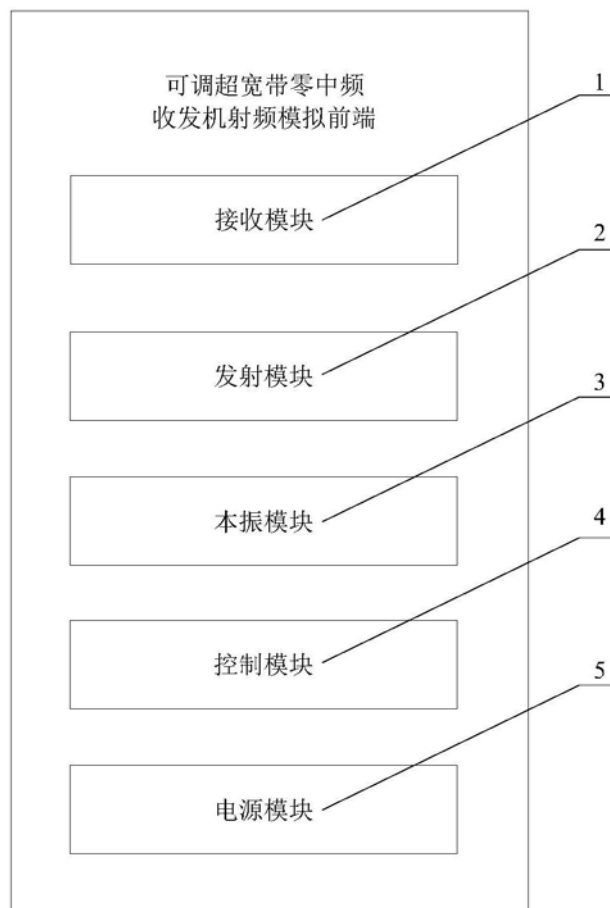


图4

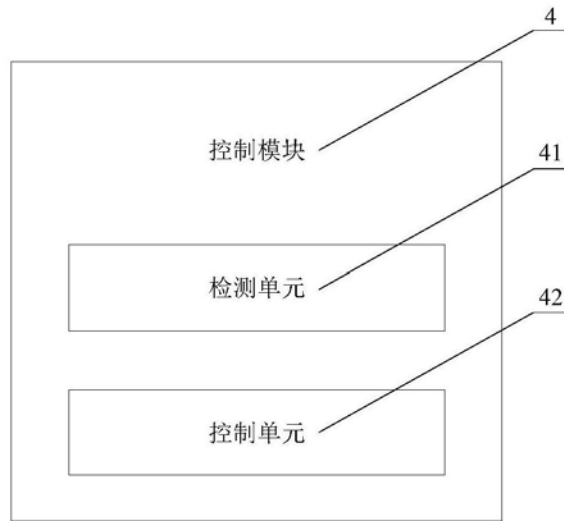


图5

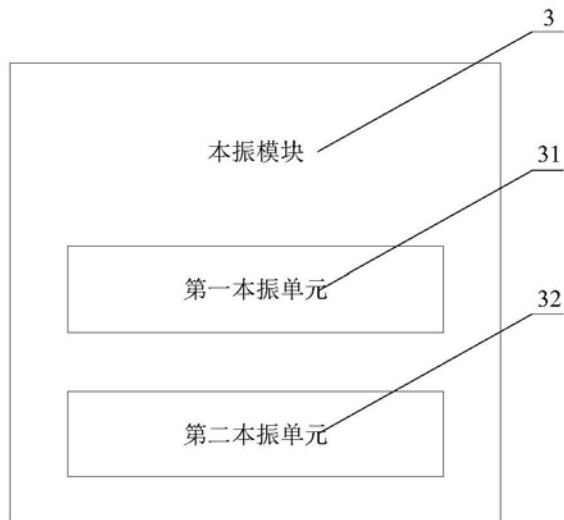


图6

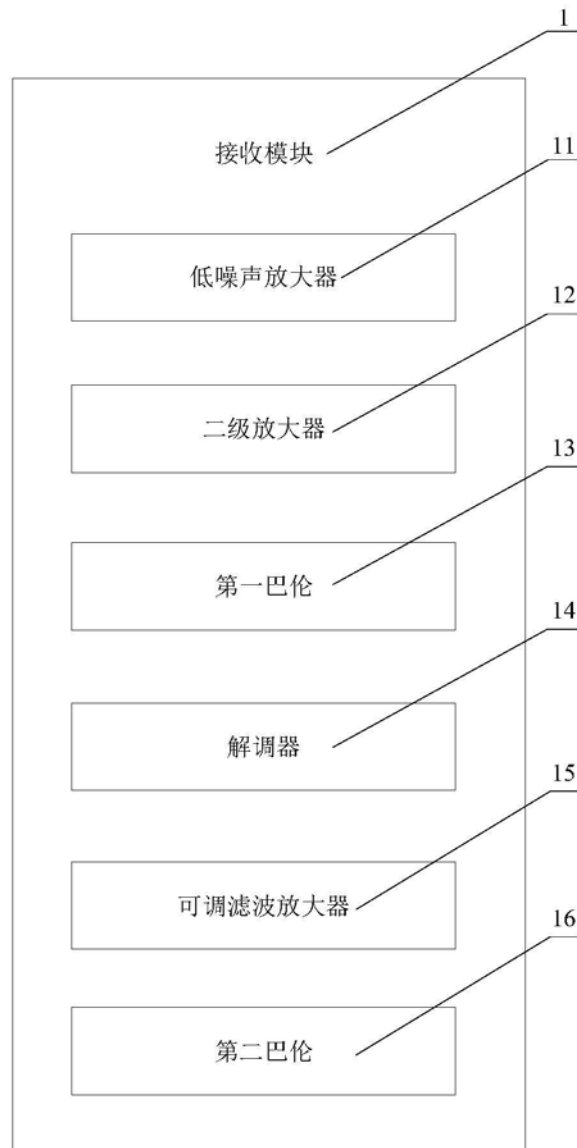


图7

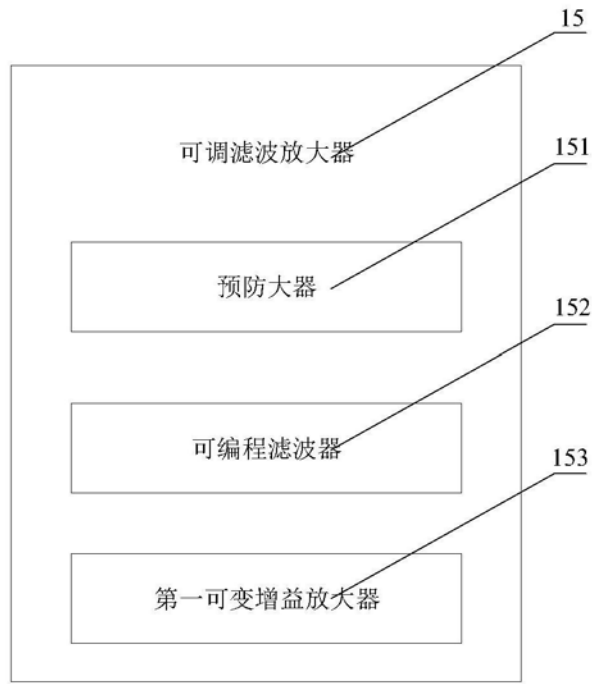


图8

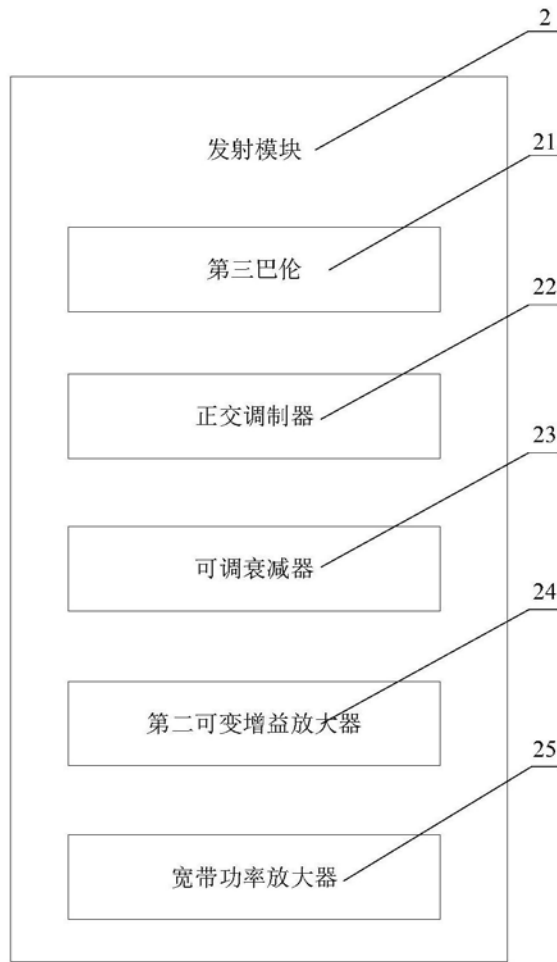


图9

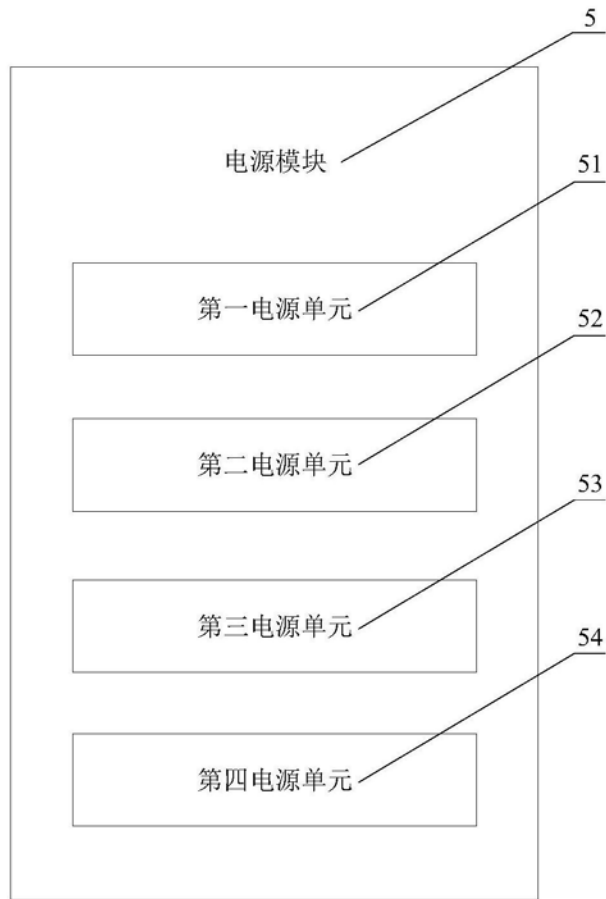


图10