

双中频超外差式信号补偿闭环反馈系统的设计

马慧瑾, 刘 收, 胡 晓, 田志昊, 孟 亮

(北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 为补偿搜索雷达发射机探测信号或系统的不稳定性, 提出了一种雷达发射机的双通道信号补偿闭环反馈系统; 该反馈系统采用双中频超外差式结构, 将发射机的高频发射信号两次下变频, 得到的中频信号反馈到雷达发射机前端, 与发射机一起构成闭环控制系统; 中频信号对发射机输入端的中频信号实时检测, 以补偿发射信号的幅度和相位不稳定性, 从而提高了搜索雷达对探测目标的高精度测量; 系统应用结果证明, 该系统方案稳定可靠, 具有一定的实用价值和参考意义。

关键词: 双中频超外差; 雷达; 双通道; 信号补偿; 闭环反馈

Design of Double Superheterodyne Closed-loop Feedback System to Compensate Signal

Ma Huijin, Liu Shou, Hu Liang, Tian Zhihao, Meng Liang

(Beijing Aerospace Measurement & Control Corp., Beijing 100041, China)

Abstract: In order to compensate the instability of detector signals or systems of radar transmitter, it advances a double superheterodyne & double channel closed-loop feedback system to compensate signals of radar transmitter. This system adopts the double superheterodyne framework to secondary mix RF signal and feedback the intermediate frequency to the front of transmitter. They compose a closed-loop feedback system. The intermediate frequency real-timely detect and compensate the amplitude and phase of transmit-signals, and improve explore precision of radar. The application result argues that the system project is stable, credible, practical and advisable.

Keywords: doublesuperheterodyne; doublechannel; signalcompensator; closed-loop feedback; radar

0 引言

搜索雷达通常是指能够连续发射探测信号搜索特定目标, 不断地准确测量并输出目标坐标位置(如目标方向角、目标俯仰角、目标斜距和径向速度等参数)的雷达^[1]。搜索雷达系统对目标检测、参数估值、目标分辨率、杂波抑制以及抗干扰等方面的设计要求越来越高, 同时也对雷达发射机的大功率发射、发射信号质量等方面设计提出了更高的要求^[2]。为保证发射机发射信号满足性能要求, 避免由于开环控制引起的发射干扰信号, 对发射系统进行闭环控制势在必行^[3]。本文提出了一种双中频超外差式双通道信号补偿闭环反馈系统设计, 该反馈系统与发射机一起构成闭环控制系统, 提高发射探测信号的质量, 从而提高搜索雷达对目标探测的精度。

1 系统结构及原理

随着社会的进步和科技的发展, 传统的雷达发射机开环控制和普通超外差接收机无法满足高性能的工业及军事应用。搜索雷达发射机开环控制无法避免各种未知的内部、外部扰动等对探测信号带来的干扰, 导致目标探测分辨率和测量精度降低^[4]。普通超外差接收机结构镜像频率干扰严重, 且变频器会引入众多的组合频率干扰和寄生通道干扰^[5]。双中频超外差方案的频率配置、增益分配灵活, 而且对变频边带选择滤波器和抑镜滤波器要求降低^[6]。针对以上情况, 本文提出双中频超外

差式双通道信号补偿闭环反馈系统的设计结构, 与发射机一起构成闭环控制系统, 来提高雷达发射机发射探测信号的质量和系统稳定性。系统原理图如图 1 所示。

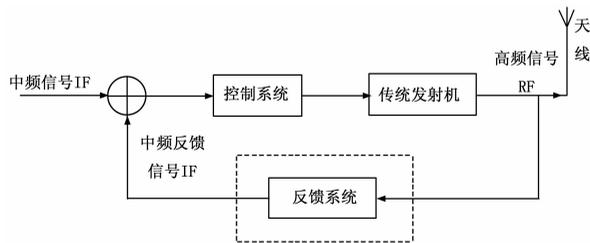


图 1 含反馈系统的雷达发射机原理图

该反馈系统的主要作用是将雷达发射机的高频发射信号 RF 转换为控制系统可识别的中频反馈信号 IF', 通过补偿发射机中频输入信号 IF 的幅度和相位, 提高雷达发射机的系统稳定性。双中频超外差式双通道脉冲补偿闭环反馈系统原理图如图 2 所示。

作为雷达发射机的反馈系统, 该系统的构架与雷达接收机的构架一致。反馈系统最前端为大范围步进可凋衰减器, 用来在出现大目标回波时进行动态范围扩展, 通过后级部件的增益压缩和互调或交调失真最小可以处理大信号。双通道微波转换开关的主要作用是对高频信号 RF 进行通道 1 和通道 2 选择。在集中选择滤波器之前, 通道 1 和通道 2 射频链路相同, 其中一条链路为备选链路, 提高系统可靠性。因普通超外差接收机的镜像频率干扰严重, 且变频器会引入众多的组合频率干扰和寄生通道干扰, 需要具有很高 Q 值的窄带滤波器对信号进行滤波, 但如此高 Q 值的窄带滤波器不易实现且造价太高。为解决上述问题, 发射机反馈系统采用双中频超外差式结构, 对

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2016-07-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(A0420132302)。

作者简介: 马慧瑾(1985-), 女, 河北保定人, 工程师, 主要从事微波系统测试与诊断, 及微波系统集成等方向的研究。

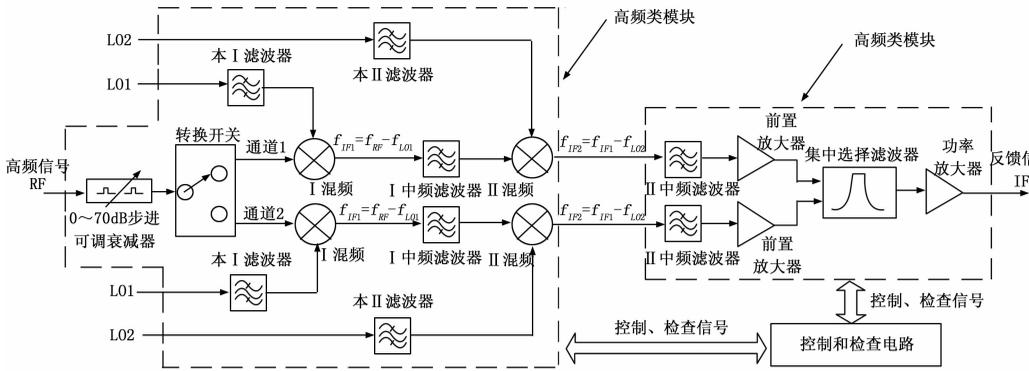


图 2 双中频超外差式双通道脉冲补偿闭环反馈系统

高频信号 RF 进行两次下变频。本振信号 LO1 和 LO2 进入混频器之前, 先经过本 I 和本 II 滤波器滤除杂波。高频信号 RF 经过 I 混频下变频, 输出高中频信号 $f_{IF1} = f_{RF} - f_{LO1}$, 再经过采用高中频值的 I 中频滤波器进行信道选择, 利于抗系统镜频干扰。高中频信号 IF1 再经过 II 混频二次下变频, 输出低中频信号 $f_{IF2} = f_{IF1} - f_{LO2}$, 再经过采用低中频值的 II 中频滤波器进行信道选择, 利于提取有用信道、抑制邻道干扰。前置放大器和功率放大器主要提供额外的增益来补偿功率损失, 将信号放大到后端处理需要的电平值。集中选择滤波器主要用来抑制无用信号和设置接收机模拟处理的带宽。

2 系统各模块的设计

2.1 控制、检查电路的设计

控制、检查电路主要实现对反馈系统内微波转换开关、混频器、前置放大器等各模块的供电、控制和检查功能。该电路主要由电源稳压模块、信号检查电路、逻辑分析模块和驱动、显示电路组成, 其原理图如图 3 所示。

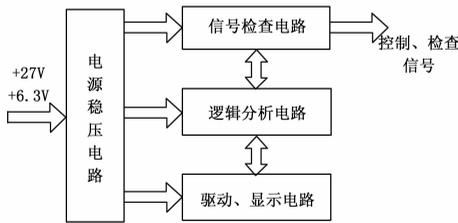


图 3 控制、检查电路原理图

电源稳压电路主要通过可调稳压芯片 LM317 对输入的电源进行调节稳压, 以满足后续电路的供电需求。信号检查电路是对反馈系统内微波转换开关、混频器、前置放大器等各模块进行信号控制和状态检查。逻辑分析电路是整个电路的核心, 在 EPM7128S (CPLD) 芯片内部通过编程实现相关逻辑功能, 主要对控制、检查电路输出的零散检查结果进行运算分析, 输出检查或故障信号, 这样可节省布局空间, 反复擦写编程, 降低了设计难度。驱动、显示电路主要通过驱动发光二极管对逻辑运算电路输出的故障信号进行显示。

2.2 微波转换开关的设计

双通道微波转换开关的主要作用是对高频信号 RF 进行通道 1 和通道 2 选择, 双通道的设计主要是微波信号有备选通道, 提高系统的可靠性。双通道微波转换开关原理图如图 4 所示^[7]。

双通道微波转换开关包括开关控制电路和两个窄带腔体滤波器。开关电路在控制信号 A 和控制信号 B 的作用下对衰减

过的输入高频信号 RF 进行通道选择, 两路加载集总电容的三阶方杆梳状窄带腔体滤波器, 对高频信号 RF 进行窄带选频、滤波。两路三阶方杆梳状腔体滤波器装有 3 个调谐螺钉, 调谐螺钉端面与滤波器梳状方杆端面之间形成加载集中电容, 通过调节调谐螺钉的深度, 即改变调谐螺钉端面 and 滤波器梳状方杆端面的间距大小, 实现调谐滤波器的输出谐振中

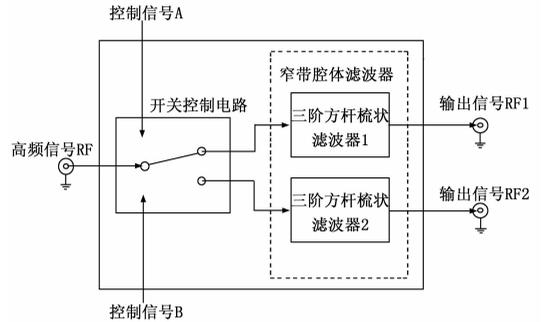


图 4 双通道微波转换开关原理图

心频点。通过配合调节调谐螺钉深度, 使得输出信号 RF1 和 RF2 相同。

2.3 I、II 混频器的设计

I 混频器的作用是将输入的高频信号 RF 和 I 本振信号 LO1 进行混频, 下变频得到高中频信号 IF1。其工作原理图如图 5 所示。

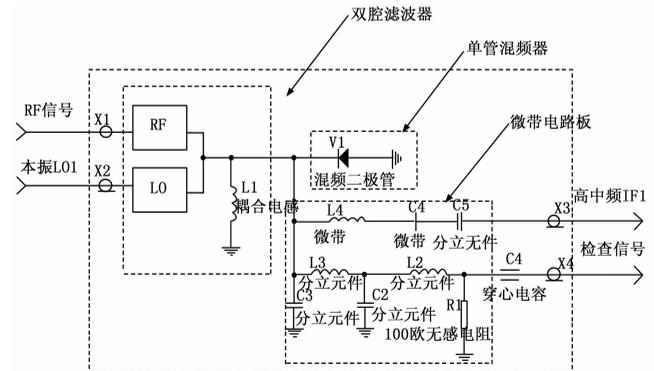


图 5 混频器 I 工作原理图

为满足控制和检查电路的需要, 混频器 I 采用单二极管混频技术, 由高频 RF 腔体滤波器、本振 LO1 腔体滤波器、混频二极管、耦合电感和输出滤波器分立元件构成。高频信号 RF 和本振信号 LO1 分别经过各自的腔体滤波器滤波后, 通过混频二极管进行混频, 下变频得到的高中频信号 IF1。检查信号由输出滤波器端输出给控制和检查电路。II 混频器的设计原理与 I 混频器大致相似, 在此不再赘述。

2.4 滤波器的设计

滤波器主要对输入信号进行滤波, 抑制杂波、外部干扰和噪声等。以 II 本振滤波器设计为例^[8], 如图 6 所示, 采用圆杆

梳状线窄带滤波器结构，由 4 个耦合线平行阵列构成，每个耦合线为一个 TEM 谐振器，谐振器间的耦合是通过平行耦合线间的电磁场耦合传递的。正对于谐振杆开路端中心处设置调谐螺钉，通过调整调谐螺钉的深度来调谐得到中心频率。输入输出信号采用探针耦合方式。其余滤波器的设计原理与 II 本振滤波器大致相似，在此不再赘述。

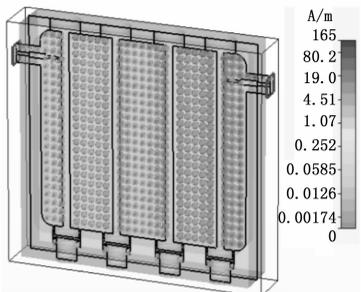


图 6 II 本振滤波器电磁结构图

2.5 前置放大器的设计

前置放大器功能电路主要提供额外的增益来补偿功率损失，将信号放大到后端处理需要的电平值。前置放大器原理图如图 7 所示。

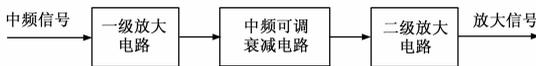


图 7 前置放大器原理图

前置放大器主要由一级放大电路、中频可调衰减电路和二级放大电路组成。一级放大电路主要由前端的滤波电路和宽带放大器 RAM-6 组成。中频可调衰减电路主要由长尾型差分电路变换而来，同时增加了增益调整和关闭功能。二级放大电路主要由宽带放大器 RAM-6、放大器偏置电路和输出滤波电路组成。宽带放大器 RAM-6 放置在 1 级和 2 级放大电路中，其主要作用就是对信号进行放大，每个增益为 20 dB，可满足 40 dB 的增益要求。

2.6 功率放大器的设计

功率放大器是整个反馈系统的最后一环，主要作用是对中频信号进行功率放大，同时需要满足输出端口阻抗匹配要求。其功能框图如图 8 所示。



图 8 功率放大器原理图

功率放大器由一级放大、50 欧姆阻抗衰减器、二级放大和检波电路构成，由于需要较高的放大倍数，采用单级放大电路无法满足设计需求，因此使用两级放大电路进行实现。

一级放大电路主要由隔直电容和宽带放大器 RAM-6 组成，二级放大电路主要由集成宽带放大器 HE861 和相关外围电路构成。同时为了避免过大的信号功率影响系统，在两级放大电路中间引入阻抗衰减器，对信号进行可调衰减。检波电路主要中频信号进行检波，得到最终中频反馈信号。

3 系统测试与结果分析

作为雷达发射机的反馈系统，其主要功能是将输入的高频信号变频为中频反馈信号输出，并且可对输出的中频反馈信号功率大小进行调节，同时还具备对内部各模块工作状态的检查

功能。因此，实际系统的验证测试构成也主要针对以上方面进行，表 1 为在不同的输入信号功率组合下，测得的中频反馈信号输出功率范围。

表 1 低压电力线载波通信多径信道模型参数

输入信号组合			输出功率=(输入功率-衰减量+放大量-一线损误差)/dBm
输入功率/dBm	衰减量/dB	放大量/dB	
-80	0	80	-0.27
-35	0	25	-10.73
-35	0	60	21.72(饱和)
-35	-10	70	21.73(饱和)
-35	-10	80	21.55(饱和)
-35	-45	0	-78.92
-35	-60	5	-90.20
-35	-60	5	-89.50

由表 1 和图 9 可以看出，经过系统实际测试，该反馈系统的增益范围为 -60~+80 dB，且输出功率不大于 22 dBm，满足实际指标需求。同时系统可以对相关故障进行报警灯提示，如无本振信号、无输入高频信号、系统无输出信号等故障。

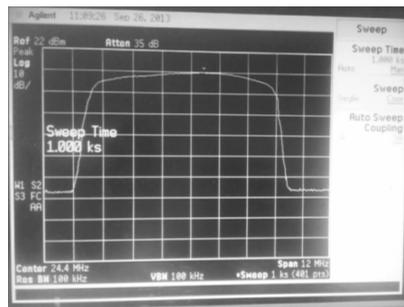


图 9 反馈系统测试结果

4 结论

为补偿搜索雷达发射机探测信号或系统的不稳定性，本文基于传统雷达发射机系统，提出了一种雷达发射机的双通道信号补偿闭环反馈系统。该反馈系统基于雷达接收机的设计理念，采用双中频超外差式结构。文中给出了该反馈系统的总体原理框架，和各模块的设计原理。测试结果表明，系统性能稳定、可靠，该反馈系统产品已在某型搜索雷达中得到实际应用。

参考文献：

- [1] 王雪松, 李 盾, 等. 雷达技术与系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] Merrill I. Skolnik 主编, 南京电子技术研究所译. 雷达手册 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [3] 毕建国, 吴千秋, 等. 基于外差式的雷达发射机反馈系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 3083-3086.
- [4] 杨宜康, 祝转民, 等. 利用射频误差信号提高脉冲雷达的角跟踪精度 [J]. 信号处理, 2003, 19 (1): 1-5.
- [5] 雷振亚, 明正峰, 等. 微波工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 吴俊晨. 一体化二次变频微波收发信机电磁兼容研究 [J]. 电磁场与微波, 2006, 36 (5): 42-52.
- [7] 马慧瑾, 田志昊, 等. 一种可调谐的 S 波段分波道微波转换开关 [P]. 专利申请号: 201310716728X.
- [8] 马慧瑾, 刘忠健, 等. 一种可调谐的窄带圆杆梳状腔体滤波器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (12): 2421-3432.