

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.008

# 一种雷达与电子侦察一体化 多通道接收组件的设计

丁晨,张慧锋,刘亮

(西安导航技术研究所,西安 710000)

**摘要:**随着近年来现代电子技术的全面发展,针对射频前端单一器件模块级的小型化、高性能研究已初步凸显成效,但从系统层面出发统筹考虑设计低成本、高性能、小型化综合电子系统的研究报道还很少。从雷达和电子侦察基本工作原理出发,根据雷达和电子侦察各自的指标要求,对组件的链路和结构进行设计,提出了一种12通道的雷达与电子侦察一体化接收组件,给出了实物指标测试结果,所有通道噪声系数均小于3 dB,雷达接收通道增益均在 $45 \pm 2$  dB,镜频抑制大于60 dB;电子侦察接收通道增益大于20 dB,相邻通道间的隔离度大于40 dB。此次设计对未来实现更复杂的低成本、小型化高性能综合电子系统有重要意义。

**关键词:**雷达;电子侦察;接收组件;小型化

中图分类号:TN952;V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)01-0048-05

## Design of a multi-channel receiving module integrated radar and electronic reconnaissance

DING Chen, ZHANG Huifeng, LIU Liang

(Xi'an Navigation Technology Research Institute, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In recent years, the research on miniaturization and high performance of single device module level of RF front-end has initially achieved remarkable results with the full development of modern electronic technology. However, there are few research reports on the design of low-cost, high-performance and miniaturized comprehensive equipment from the system level. The link budget and structure of the module are designed firstly on the basis of working principles of radar and electronic reconnaissance. A 12-channel receiving module integrated radar and electronic reconnaissance is proposed according to the respective requirements of radar and electronic reconnaissance in this paper. The final measurement results of the proposed model are given. The noise coefficient of all channels is less than 3 dB, the gain of radar receiving channel is  $45 \pm 2$  dB, and the mirror frequency suppression is greater than 60 dB; The gain of electronic reconnaissance receiving channel is greater than 20 dB, and the isolation between adjacent channels is greater than 40 dB. The work has great significance to realize a more complex low-cost, miniaturized and high-performance integrated electronic system in the future.

**Key words:** radar; electronic reconnaissance; receiving module; miniaturization

收稿日期:2022-04-16; 修回日期:2022-05-10

引用格式:丁晨,张慧锋,刘亮.一种雷达与电子侦察一体化多通道接收组件的设计[J].空间电子技术,2023,20(1):48-52.

DING C, ZHANG H F, LIU L. Design of a multi-channel receiving module integrated radar and electronic reconnaissance [J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(1): 48-52.

## 0 引言

现代电子技术的全面发展,促使各种类型的作战装备都朝着多功能、高可靠性、小型化的方向发展,使其能够适应现代复杂作战环境下的作战需求。经过研究工作者多年的共同努力,器件模块级的低成本、高性能、小型化研究已日趋成熟<sup>[1-4]</sup>,更有部分研究成果已经在现役装备上得到使用和验证<sup>[5-6]</sup>,目前从系统层面出发统筹考虑设计综合电子系统的研究主要集中在航天领域,且侧重点偏向后端统筹设计<sup>[7-8]</sup>,针对地面装备低成本、高性能、小型化综合电子系统的研究报道还很少。雷达与电子侦察设备同为现代战争中战场情报获取不可或缺的元素,由于工作原理不尽相同,雷达与电子侦察设备在载体平台上往往是各自独立作用的两种设备,然而随着电子信息技术的发展,对电子设备的设计也提出了更高的要求,新型的设备往往要求可以尽可能的利用系统公共资源(时间、空间、计算能力等)集成多种设备功能。雷达与电子侦察设备虽然作战任务不同,但其共通点在于均依靠接收电磁波来分析和探测目标<sup>[9]</sup>,接收前端的性能直接影响装备整体性能,因此设计一款可同时满足雷达与电子侦察需求的高性能接收组件成为实现雷达与电子侦察一体化综合电子系统的前提,对未来实现更复杂的低成本、小型化高性能综合电子系统有着重要意义。本文提出了一种 X 波段高性能的 12 通道雷达与电子侦察一体化接收组件,实现了雷达与电子侦察接收组件一体化高集成度、高性能的设计,并给出了最终实物的测试结果。

## 1 通道链路设计

根据雷达和电子侦察各自的电气性能指标要求,首先进行通道链路设计,整体的设计思路为尽可能在实现高集成度、高可靠性的同时降低成本,在分别满足雷达与侦察支路指标要求的同时尽可能多设计公共链路,减少芯片数量。

12 通道雷达与电子侦察一体化接收组件原理图如图 1 所示。系统中雷达和电子侦察通道共用一组超宽带天线,位于通道最前端的耦合器、限幅器、低噪声放大器及滤波器为接收通道公共部分,为保证能够同时覆盖雷达与侦察所需的工作频段,所有器件均选用超宽带器件。对于多通道的雷达和电子侦察接收组件,通道功能自检是必要的,但通道

自检只需检测通道功能是否正常,无需考虑对自检信号的特殊处理,因此雷达和电子侦察所需的自检信号可以设计为同一种信号,从而通道自检信号可通过一个一分十二的功分检测网络由通道公共端馈入各个通道,经各通道后独立输出,采用这种设计可以极大简化通道功能自检信号网络。由于电子侦察对信号的处理方式不同于雷达,因此在对接收到的信号经过初步的限幅放大后,需要将信号分为雷达和侦察两路。本文在低噪声放大器(LNA)后设计宽带功分器,将前级接收放大后的信号分为两路,一路直接去电子侦察后端,一路去雷达端进一步变频滤波处理。

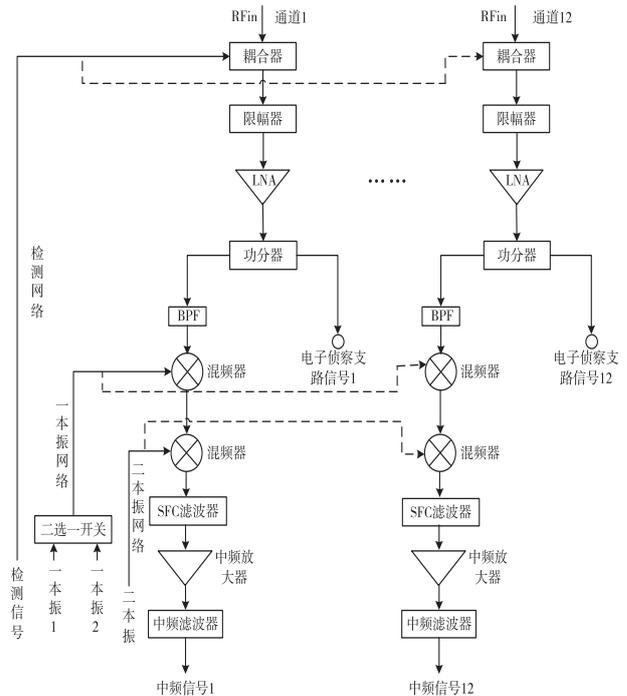


图 1 雷达与电子侦察一体化接收组件原理图

Fig. 1 Principle block diagram of receiving module integrated radar and electronic reconnaissance

雷达端的信号需要进一步滤波以滤除掉雷达工作频带外的无用信号,之后进行两次变频后至中频信号。出于对雷达抗干扰设计的考虑,一次变频的本振信号设计了两种,可根据实际使用情况通过开关切换选择,一本振和二本振网络采用与检测网络类似的一分十二功分网络。为防止近距离大目标回波信号将后端 AD 采集通道顶饱和,对变频后的中频信号设计了具有特殊响应曲线的 SFC (suppression frequency control, SFC) 滤波器,响应曲线如图 2 所示。其中  $f_0$  代表中频信号频率,再对经过 SFC 滤波器后的中频信号进行放大滤波,即可输出

至后端 AD 进行采样处理。

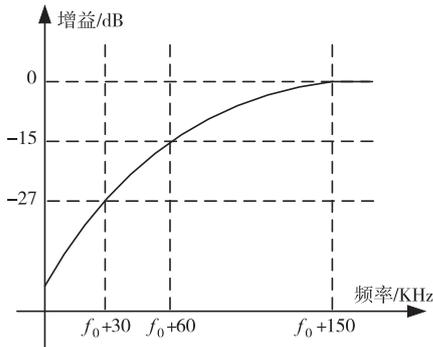


图 2 SFC 滤波器响应曲线  
Fig.2 SFC filter response curve

### 2 组件结构设计

由于组件的使用及安装空间限制,组件整体设计为扇形状,如图 3(a)所示。对于使用多通道组件的系统,复杂的连接关系往往要求简单可靠地互连设计,因此本文所设计的一体化组件所有前面板及上面板射频连接器均选用可直接插拔且可盲插的 SMP 连接器;后面板射频连接器均选用可直接插拔的 SBMA 连接器;供电插头选用带锁紧设计的微矩形连接器。天线接收到的信号从组件前面板输入,雷达支路的中频信号从组件上面板输出,电子侦察支路信号由组件后面板输出,通道检测信号、本振信号以及组件供电均由组件后面板输入。采用这样的设计可在保证连接可靠性的前提下极大的减少组件与系统其它部分连接所需使用的同轴电缆,降低连接复杂度的同时减小由线缆引入的损耗。

通常具有高集成度特点的系统设备由于各组成部分互连复杂且模块安装空间紧凑<sup>[10-15]</sup>,在设备出现故障时,其可维修性相比低集成度的设备较差,甚至有些结构设计较差的设备会出现因个别模块失效无法维修更换,导致整个设备报废的情况。因此在设计之初,良好的可维修性是必须要考虑的因素。本文设计的一体化组件在充分考虑系统的使用要求及安装空间限制后,为便于组件在系统上的安装拆卸更换,在组件前面板上设计了辅助天线安装的定位孔,如图 3(b)所示。这样可确保在系统上使用每次拆装组件后天线与对应组件通道的连接相对位置不发生变化,可最大程度保证组件拆装前后系统的一致性;组件后面板上设计有盲插定位销,如图 3(c)所示。配合系统结构件可实现组件

后面板连接器的精确盲插连接,极大地简化了组件与系统的连接,同时可规避多次插拔组件可能带来的连接不可靠隐患。同样,出于方便插拔安装考虑,利用组件的边缘空间设计了前轨道锁紧装置,解决了组件与系统结构件间的紧固问题。

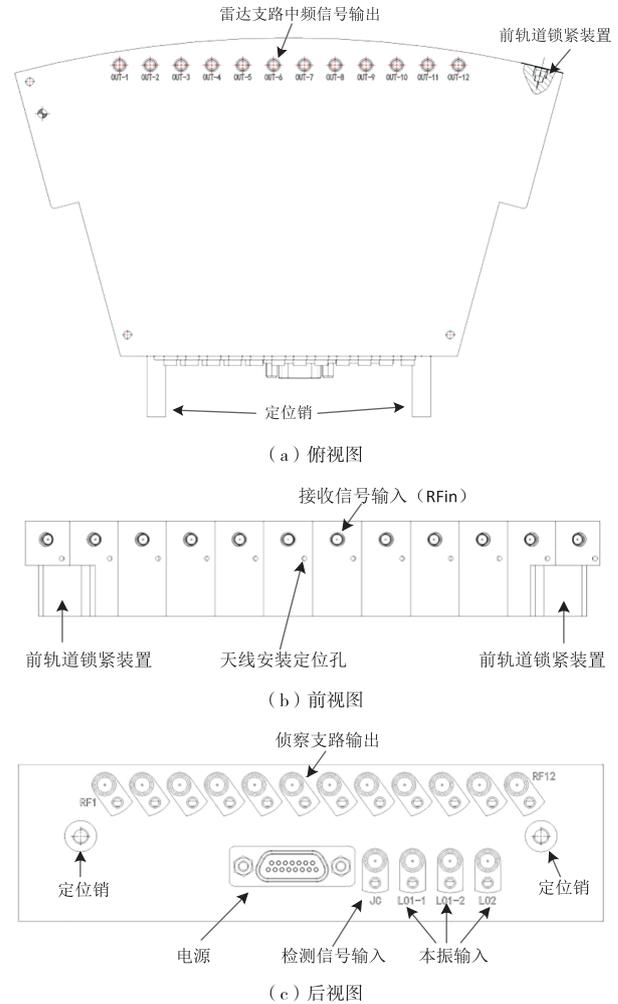


图 3 雷达与电子侦察一体化接收组件结构图  
Fig.3 Structure diagram of receiving module integrated radar and electronic reconnaissance

### 3 组件实物及测试结果

本文设计的雷达与电子侦察一体化接收组件实物图如图 4 所示。雷达接收通道工作在 9.3 ~ 9.5 GHz,增益指标为 45 dB ± 2 dB,测试结果如表 1 所列,可以看出所有通道的带内增益起伏均在 2 dB 以内,通道间一致性良好;噪声系数指标不大于 3 dB,测试结果如表 2 所列;通道镜频抑制比指标不低于 60 dB,测试结果如表 3 所列,所有通道镜频抑制制度实测均在 63 dB 以上。电子侦察接收通道增益指标不低于 20 dB,测试结果如表 4 所列,通道在整

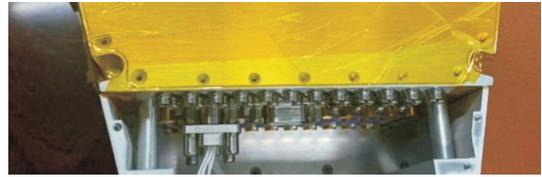
个 X 波段的增益均大于 21 dB,不同通道的增益起伏均在 2 dB 以内,通道一致性良好;工作频段内相邻通道间隔离度指标不低于 40 dB,测试结果如表 5 所列。由表中的测试数据可以看出本文设计的一体化接收组件满足设计要求。



(a) 俯视图



(b) 前视图



(c) 后视图

图 4 雷达与电子侦察一体化接收组件实物图

Fig.4 The proposed receiving module integrated radar and electronic reconnaissance

表 1 雷达支路通道增益测试结果 (dB)

Tab.1 Measurement results of radar channels' gain (dB)

频点 / GHz	通道号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9.3	46.6	45.6	46.4	46.3	45.8	46.1	45.5	45.6	45	45.6	46	44.8
9.4	46.2	45.4	46.4	46.2	46.4	45.3	46.2	44.9	45.6	46.4	45.8	45.9
9.5	45.1	45.2	45.2	45.5	45.3	45.9	46.1	44.9	45.9	44.8	45.5	45.6

表 2 雷达支路通道噪声系数测试结果 (dB)

Tab.2 Measurement results of radar channels' noise figure (dB)

频点 / GHz	通道号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9.3	2.5	2.7	2.5	2.7	2.6	2.7	2.6	2.9	2.5	2.7	2.5	2.7
9.4	2.5	2.8	2.8	2.8	2.5	2.9	2.8	2.5	2.5	2.7	2.5	2.6
9.5	2.6	2.8	2.5	2.6	2.5	2.4	2.4	2.7	2.5	2.7	2.8	2.8

表 3 雷达支路通道镜频抑制比测试结果 (dB)

Tab.3 Measurement results of radar channels' mirror frequency rejection ratio (dB)

频点 / GHz	通道号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9.3	69.6	63.7	66.5	63.4	63.2	70.6	70.2	67.3	67.7	68.9	63.7	71.5
9.4	67.7	67.6	68.6	65.3	72.4	69.2	67.8	72.1	67.3	64.7	66.1	71
9.5	71	64.7	70.4	68.8	68.8	66.4	69.1	66.3	72.9	70.4	66.9	72.7

表 4 电子侦察支路通道增益测试结果 (dB)

Tab.4 Measurement results of electronic reconnaissance channels' gain (dB)

频点 / GHz	通道号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	21.5	22.4	21.4	23.1	21.4	22.4	22	22.2	22.2	22.2	21.7	23.2
9	22.2	21.4	23.3	23	22.9	22.9	22.9	21.6	23.2	22.9	21.5	22.5
10	23.3	23.2	22.3	23.2	21.8	21.8	22.2	22.5	22.4	22.6	22	21.9
11	22.4	23.1	21.6	21.8	22.3	22.8	21.5	21.9	21.4	22.3	22.3	22.5
12	22.8	21.9	22.5	22.3	21.8	22.4	22.5	22.4	22	22.9	21.5	23

表 5 电子侦察支路相邻通道隔离度测试结果 (dB)

Fig.5 Isolation of adjacent electronic reconnaissance channels (dB)

频点 / GHz	通道号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8 ~ 12	44	51	48	47	48	50	51	50	48	45	46	46

## 4 总结

随着近年来现代电子技术的全面发展,针对射频前端单一器件模块级的小型化、高性能研究已初步凸显成效,更有部分研究成果已在现役装备上得到应用验证,但针对地面装备将不同作战使命的装备统筹考虑设计的研究还鲜有报道。本文从雷达和电子侦察基本工作原理出发,根据雷达和电子侦察各自的指标要求,对组件的链路和结构进行设计,提出了一种 12 通道的雷达与电子侦察一体化接收组件,给出了实物指标测试结果,为解决雷达与电子侦察一体化综合电子系统前端提供了一种解决思路,对未来实现更复杂的低成本、小型化高性能综合电子系统有重要意义。本文的研究成果希望能给后续研究工作者提供一些有用的参考,共同推进综合小型化高性能电子系统的全面研究。

### 参考文献:

- [1] 方杨佳. Ka 波段 T/R 组件关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [2] 文磊. 硅铝合金 TR 组件封装外壳制造技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [3] 王云秀. 无线通信系统中小型化微带滤波器的研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
- [4] 张红. 腔体耦合多工器的研究与设计[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [5] 彭高森,金家富. C 波段高功率 T/R 组件设计[J]. 雷达科学与技术,2011,9(3):277-280.
- [6] 李俊生,蒙林,张德智. X 波段高功率 T/R 组件的设计与制作[J]. 现代电子技术,2009,32(19):59-61.
- [7] 王连国. 高性能一体化空间综合电子技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2019.
- [8] MA Q, LEENAERTS D M W, BALTUS P G M. Silicon-based true-time-delay phased-array front-ends at ka-band [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2015,63(9):2942-2952.
- [9] LIU Z H, WU M Y. Technical trends and challenges of integration of microsystems function modules[J]. Electronic Technology. 2015,36(4):195-198.
- [10] 王鑫,王慧. T/R 组件一体化组装工艺技术[J]. 空间电子技术,2021,18(6):69-74.
- [11] 刘媛萍,张成果,王晓龙,等. 星载 T/R 组件自动组装关键工艺研究[J]. 空间电子技术,2021,18(6):80-85.
- [12] 李仪,黄涛,汪子琦. 射频组件测试数据建模与自动配对方法研究[J]. 电子工艺技术,2019,40(1):48-49+57.
- [13] 石海然,张涛,薛欣,等. Ka 频段八波束接收组件的设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2019,17(2):252-257.
- [14] 林富平,潘鸣. W 波段宽带辐射计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2019,17(2):269-273.
- [15] 王向晖,朱坤,蔡文超,等. 适应未来精确打击的柔性化飞行器射频装备研究[J]. 战术导弹技术,2019(1):42-49.

作者简介:丁晨(1991—),陕西富平人,硕士,工程师。主要研究方向为雷达总体技术。E-mail:dingchen614@foxmail.com