

超宽带多通道接收前端设计与研制

李 翀,舒安刚,胡俊丰,张 磊,余怀强,余昕颖,邓立科

(中国电子科技集团公司 第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:在电子侦察领域,超宽带多通道接收前端对信道接收机起着至关重要的作用。提出了一种超宽带、多通道、低噪声、低灵敏度、大动态范围接收前端的设计方案。通过设计仿真和实物样机的研制测试,验证了该方案的可行性。与传统方案相比,该接收前端样机噪声系数和开关隔离度各提升 20% 以上,实物尺寸为 53 mm×115 mm×9 mm,指标性能达到设计要求。

关键词:接收前端;超宽带;多通道;低噪声;动态范围

中图分类号:TN851 **文献标识码:**A

Design of an Ultra-Wideband and Multi-Channel Receiving Front-End

LI Chong, SHU An'gang, HU Junfeng, ZHANG Lei, YU Huaiqiang, YU Xinying, DENG Like

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The microwave receiving front-end plays an important role in a channel receiver in the field of electronic surveillance. This paper presents a design scheme for an ultra-wideband, multi-channel, low-noise, low-sensitivity, and large dynamic range receiving front-end. Design simulation and prototype testing were used to verify the feasibility of the solution. Compared to traditional schemes, this receiving front-end optimizes the noise figure and switching isolation by 20%. The product size is 53 mm×115 mm×9 mm, and the performance indices meet the design requirements.

Key words: receiving front-end; ultra-wideband; multi-channel; low-noise; dynamic range

0 引言

随着科学技术的飞速发展,信息战在现代战争的军事对抗中占据越来越重要的地位。作为信息战中必不可少的部分,电子侦察主要通过对电磁波信号进行接收、处理、识别和定位来获得敌方有价值的军事信息,为己方军事行动提供支持^[1]。

随着现代战争中电磁环境越来越复杂,电子侦察的信号频率范围也越来越宽,正由传统的频段(2~18 GHz)向 L 波段和 P 波段拓展,逐步覆盖通信、导航等更多频段^[2-3]。电子侦察的向下扩频对接收前端提出了更高的要求,向下扩频导致接收前端中存在更多谐波、杂波等频率分量,需要接收前端具备足够宽的瞬时带宽来处理更多的射频信号。同时,接收前端还需要具备多个超宽带接收通道对电磁目标进行侦察,提高侦察效率和能力。因此迫

切需要研究更先进、更成熟、性能更优异的超宽带多通道接收前端来满足当前复杂电磁环境下的电子侦察任务要求^[4]。

目前,超宽带多通道接收前端通常采用先进封装或多芯片微组工艺(MCM)。先进封装是将多颗射频芯片集成到封装管壳内部,形成子功能单元,再将子功能单元串联起来构成功能电路。与 MCM 工艺相比,体积较小,但制造工艺较复杂,工艺成熟度不高,制造难度较大。此外,由于芯片集成度高,与 MCM 工艺相比,部分电路性能指标恶化。考虑到超宽带多通道接收前端的工艺可制造性、可靠性及更优良的技术指标,采用合理的元器件选型和结构设计,运用目前电子行业成熟稳定的 MCM 工艺,通过优化垂直过渡、开关电路和匹配电路设计,设计并研制出低噪声系数、低灵敏度、大动态范围四通道 0.8~18 GHz 接收前端。

收稿日期:2024-06-14

作者简介:李翀(1991-),男,重庆市人,硕士。

1 接收前端功能简介

图1为常见的超宽带多通道接收机原理框图。由图可见,接收前端内部集成了4路射频接收通道和4路校准通道,与配套的超宽带接收天线、变频模组、本振源、校准源和电源控制共同组成多通道超宽带接收机。接收前端负责对天线接收和校准源产生的射频信号进行预处理,决定了接收机的灵敏度、动态范围、抗干扰能力等重要性能指标。

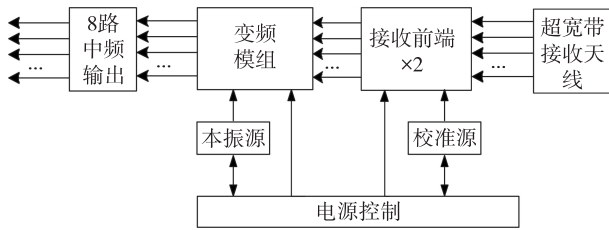


图1 超宽带多通道接收机原理框图

2 接收前端电路设计

2.1 接收前端架构设计

接收前端包含4个完全相同的接收通道,每个通道包含A、B两路天线和一路校准源输入接口。接收链路主要包含限幅器、射频开关、分段放大、数控衰减器、预分选开关滤波器组、宽带低噪声放大器、均衡器和低通滤波器,原理图如图2所示。开关滤波器组将信号分为7段,避免前级放大器产生谐波信号落入带内形成干扰,影响接收机正常工作,分段信息如表1所示。

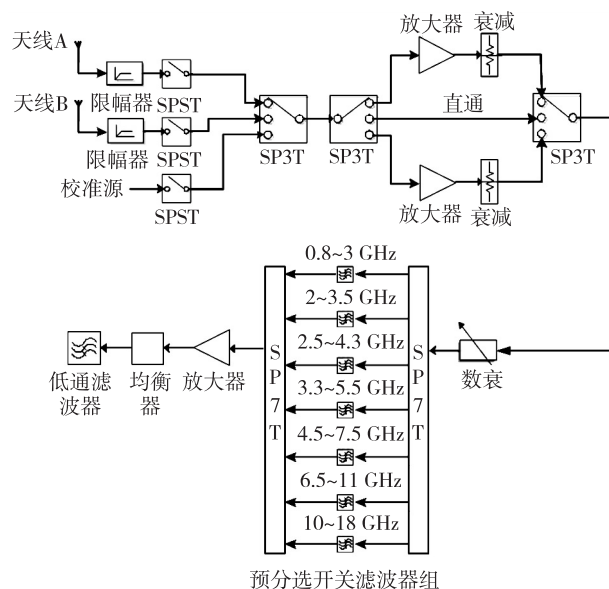


图2 超宽带多通道接收前端单个接收通道原理框图

表1 开关滤波器组各通带频段划分情况表

通带	通带频率/GHz
1	0.8~3
2	2~3.5
3	2.5~4.3
4	3.3~5.5
5	4.5~7.5
6	6.5~11
7	10~18

2.2 低噪声接收前端研究与设计

为了实现超宽带接收前端低灵敏度和大动态范围的目标,基于接收前端架构,本文从垂直过渡结构、开关电路、匹配电路等方面进行低噪声接收前端研究与设计。

2.2.1 低损耗垂直过渡设计

接收前端输入接口均采用SMP连接器,连接器针芯穿过RO5880基板进行焊接,形成垂直过渡结构。为了实现接收前端低噪声特性,要求射频信号在进入接收机前的损耗尽可能小。因此,利用HFSS软件设计了超宽带低插入损耗的垂直过渡模型。

为了增加垂直过渡结构的工作带宽,采用了渐变式高低阻抗微带线模型。高低阻抗线一端与50 Ω 微带线相连,另一端与SMP针芯垂直互连。基于垂直互连焊接可靠性和互连特性,提出了一种水滴型类同轴垂直过渡结构与高低阻抗线相连,并与普通类同轴结构进行了对比。两种结构如图3所示。

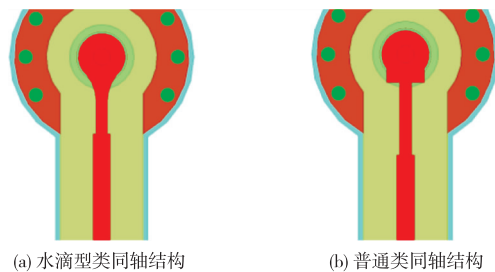


图3 水滴型类同轴和普通类同轴垂直过渡结构

图4为水滴型与普通类同轴结构的S参数仿真对比图。由图可见,在0~26 GHz频段内,水滴型类同轴垂直过渡模型插入损耗 ≤ 0.24 dB,回波损耗 ≤ -16 dB;普通类同轴垂直过渡模型插入损耗 \leq

0.48 dB, 回波损耗 ≤ -11 dB。相比之下, 在 25 GHz 以下, 两种结构仿真结果接近; 在 25 GHz 以上, 水滴型类同轴结构具有更优良的垂直互连特性。仿真得到 SMP 针芯焊盘直径为 $\varnothing 1.02$ mm, 在满足工艺要求的同时保证了水滴型类同轴垂直过渡结构的优良性能。

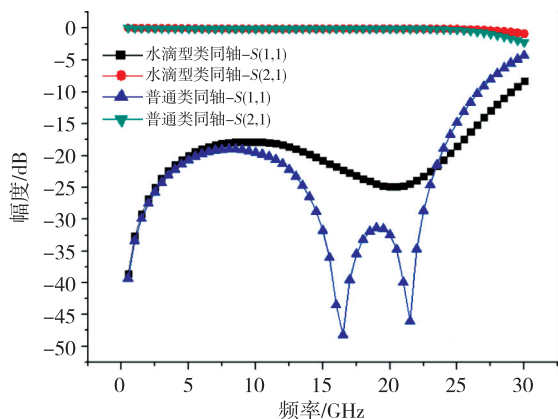


图4 水滴型与普通类同轴过渡结构仿真结果对比

2.2.2 低损耗开关电路设计

由图2可知, 第一级低噪放前存在一级单刀单掷开关和两级单刀三掷开关。由噪声系数计算公式可知, 开关损耗过大会直接影响接收前端噪声系数, 从而导致接收机的噪声系数、灵敏度严重恶化。

为了实现超宽带低损耗开关特性, 本文摒弃了传统 FET (Field Effect Transistor) 开关的设计方式, 采用了 PIN (Positive Intrinsic-Negative) 开关芯片搭配锥形电感的方案。表2为 18 GHz 下 FET 和 PIN 开关插入损耗对比。由表2可知, 相比于 FET 开关, PIN 开关芯片具有更低的插入损耗。

表2 FET 和 PIN 开关插入损耗对比

器件名称	FET 开关损耗/dB	PIN 开关损耗/dB
单刀单掷开关	1.1	0.4
单刀三掷开关	2	0.8

配合 PIN 开关使用的锥形电感能在 10 MHz~40 GHz 频段内工作, 其测试曲线如图5所示, 在 18 GHz 处的插入损耗为 0.4 dB。因此, 本文选用的单刀单掷和单刀三掷 PIN 开关搭配锥形电感方案在 18 GHz 总损耗分别为 0.8 dB 和 1.2 dB。相比于 FET 开关, 三级 PIN 开关级联后能减小 2~3 dB 损耗。

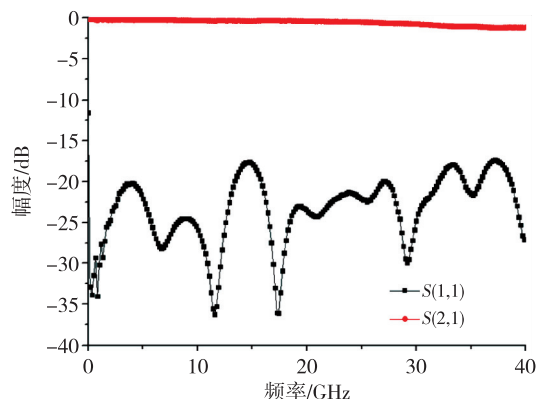


图5 锥形电感测试曲线

2.2.3 低损耗“T”型匹配支节设计

在接收前端电路中, 芯片与微带线之间存在大量金丝键合, 而金丝的引入会带来寄生参数, 影响链路传输特性。为了弱化其影响, 减小芯片和微带线之间的传输损耗, 提出了一种“T”型匹配结构, 可抵消金丝键合引入的寄生参数影响, 优化微带线和芯片在不同频段的匹配特性。匹配结构如图6所示。

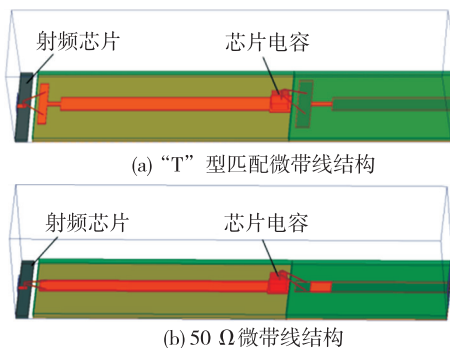


图6 “T”型匹配微带线和 50 Ω 微带线结构

如图7所示, 利用 HFSS 软件对 S 参数进行仿真对比, 发现在 0~26 GHz 频段内, “T”型匹配结构插入损耗 ≤ 0.23 dB, 回波损耗 ≤ -21 dB。而 50 Ω 微带线结构插入损耗 ≤ 0.75 dB, 回波损耗 ≤ -8 dB。

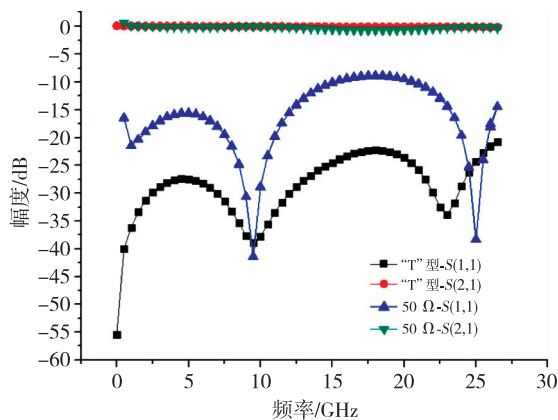


图7 “T”型微带线和 50 Ω 微带线测试结果对比图

由图 7 可见,“T”型匹配结构能大幅降低链路损耗,对优化接收前端噪声系数起着至关重要的作用。

2.2.4 接收链路指标计算

为了提高通道隔离度、动态范围和抗干扰能力,接收前端拥有多级开关、数控衰减器、滤波器等损耗器件。通过链路计算工具发现,接收前端增益需要大于 30 dB 才可忽略变频噪声对链路噪声系数的影响^[5]。通过链路计算得到接收前端工作频率为 18 GHz 时部分指标计算结果,如图 8 所示。接收前端设计增益为 32 dB,噪声系数为 5.59 dB,输入 $P_{-1\text{ dB}}$ 可达到 18 dBm。

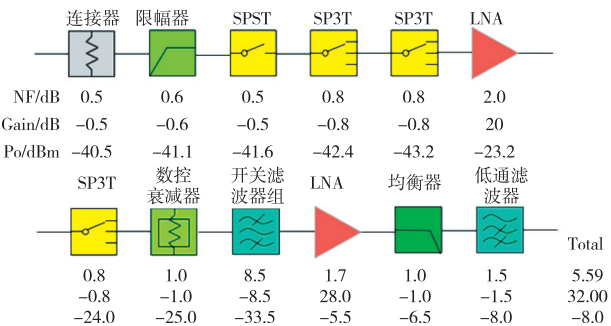


图 8 接收前端部分指标计算

3 接收前端实物测试

超宽带多通道接收前端实物如图 9 所示。运用矢量网络分析仪、信号源、频谱仪和噪声系数仪对接收前端 4 个通道各个指标进行测试。



图 9 超宽带多通道接收前端实物

接收增益测试结果如图 10 所示。由图可看出,接收前端输入回波损耗均小于 -9.5 dB;接收增益范围为 30.2~33.4 dB,高频增益较高。在 0.8~18 GHz 频率范围内,接收增益呈现正斜率趋势,可以弥补后级变频电路高频损耗较大的不足,从而优化接收机增益平坦度。

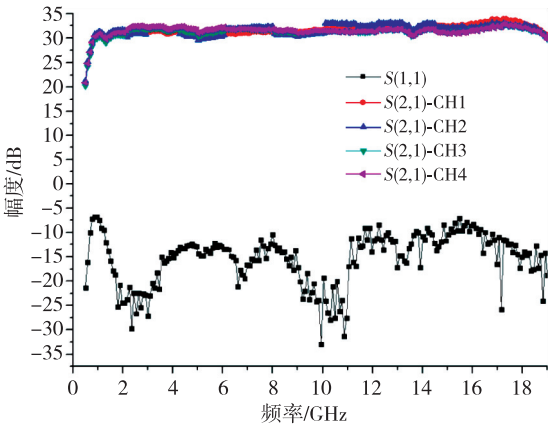


图 10 不同通道的接收增益测试结果

噪声系数测试结果如图 11 所示。由图可看出,随着频率增高,噪声系数逐渐变大,在 18 GHz 处噪声系数最大(为 6 dB)。

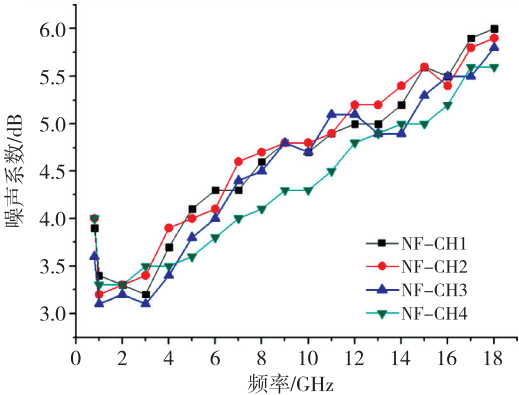


图 11 不同通道的噪声系数测试结果

表 3 为样机测试指标与其他类似产品指标^[6-7]对比。由表可看出,样机的噪声系数、开关隔离度、高度等各项参数优于同行业其他类似产品。

表 3 超宽带多通道接收前端主要技术指标测试性

参 数	本文样机	文献[6]产品	文献[7]产品
工作频率/GHz	0.8~18	2~18	0.38~18
接收增益/dB	30.2~33.4	26~30	30~31.8
噪声系数/dB	6	6.5	13
开关隔离度/dB	60	40	60
幅度不一致性/dB	±0.75	±1.2	±0.9
高度/mm	9	15	9.5

4 结束语

本文运用低损耗垂直过渡设计、低损耗开关电路设计、低损耗“T”型匹配支节设计以及成熟、稳定、可靠的 MCM 工艺实现了超宽带、多通道、低噪

声四通道接收前端,工作频率覆盖 0.8~18 GHz,接收增益为 30.2~33.4 dB,噪声系数 ≤ 6 dB,开关隔离度 ≥ 60 dB,尺寸仅为 53 mm \times 115 mm \times 9 mm。与现有同类产品相比,该产品在实现了接收前端轻薄化的同时,大幅优化了噪声系数和开关隔离度,对应用于电子侦察领域的低灵敏度、大动态范围信道接收机研发有重要意义,未来也将在超宽带、多通道信道接收机项目中得到广泛应用。

参考文献:

- [1] SCHROER R. Electronic warfare[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, 18(7):49-54.
- [2] 王亚涛,王昊飞. 复合调制雷达波形低截获性能分析[J]. 四川兵工学报, 2019, 40(12):120-124.
- [3] 王培章,邵尉,余同彬,等. 宽带一体化接收前端技术的研究[J]. 微波学报, 2012(增 2):319-321.
- [4] FAN G, SHEN D, WAN J, et al. A 1-6 GHz ultra broadband multiple-channel integrated receiver[C]// Nanjing, China: IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, 2016:1-3.
- [5] 李夏琴. 本振相位噪声对宽带接收机噪声系数的影响[J]. 电子技术应用, 2020, 46(2):36-42.
- [6] 张越成. 新型小型化超宽带微波接收前端设计[J]. 电子科技, 2017, 30(5):101-104.
- [7] 唐霆宇. 小型化四通道宽带接收前端的设计[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(2):189-192.