

导读:我国在 2018 年宣布开始研究 6G(即第六代移动通信技术)。要实现 6G 的宏伟愿景,需要应用全频谱通信、空天地一体化、通信感知计算一体化、分布式超大规模 MIMO、智能超表面等一系列新技术。为了加强 6G 中微波毫米波技术应用研究的交流,《电子技术应用》杂志 2022 年第 10 期推出“6G 微波毫米波技术”主题专栏,论文内容包括通信导航一体化技术、北斗高精度定位中的天线设计技术和电磁超材料表面技术等,论文作者都来自一线科研院所,期望这一专栏能够促进国内微波毫米波同行之间的交流探讨。



特约主编:谢拥军,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为天线与微波技术、计算电磁学及其应用、电磁兼容等。目前主持多项国家纵向和企业横向科研项目。发表学术论文 200 余篇(其中 SCI 论文 70 余篇),主编(或参编)《HFSS 原理与工程应用》《简明微波》等专著 8 本。

CNI 系统 L 波段接收机射频前端综合化设计方案探讨

张宇晖

(中国西南电子技术研究所,四川 成都 610036)

摘要:针对通信导航识别系统(Communiction, Navigation and Identification,CNI)中 L 波段多功能射频综合化的需求,对 L 波段接收机射频前端电路进行综合化设计。通过分析 CNI 中航管、塔康、精密测距等 L 波段功能对接收机的性能需求,结合接收机主要工作原理和技术指标选取二次变频超外差接收机结构作为实现方案,并对接收机射频前端下变频电路和中频电路进行设计,通过复用前级下变频电路,在中频放大电路中分功能处理实现射频前端综合化设计。计算了两种放大模式下各级器件的增益、噪声系数等指标,结论表明各项指标满足功能设计需求,该射频前端综合化设计方案可以满足 CNI 系统 L 波段接收机射频综合化需求。

关键词:通信导航识别系统;L 波段接收机;射频前端;综合化设计

中图分类号: TN492

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.223018

中文引用格式: 张宇晖. CNI 系统 L 波段接收机射频前端综合化设计方案探讨[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10):1-4, 8.

英文引用格式: Zhang Yuhui. Discussion on integrated design scheme of RF front-end for CNI L-band receiver[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10):1-4, 8.

Discussion on integrated design scheme of RF front-end for CNI L-band receiver

Zhang Yuhui

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: In this paper, according to the needs of L-band multi-function RF integration of CNI, the integrated design of the L-band receiver RF front-end circuit is carried out. By analyzing the performance requirements of L-band functions such as ATC, TACAN and DMEP on the receiver, combined with the main working principle and technical indicators of the receiver, the structure of the dual-conversion superheterodyne receiver is selected as the implementation scheme. The RF front-end down-conversion circuit and IF circuit of the receiver are designed, and the integrated design of the RF front-end is realized by multiplexing the down-conversion circuit and dividing the functions in the IF circuit. The gain, noise figure and other indicators of the devices at all levels under the two amplification modes are calculated. The conclusion shows that the indicators meet the design requirements of the functions, and the RF front-end integrated design scheme in this paper can meet the RF integration requirements of the CNI system L-band receiver.

Key words: CNI; L-band receiver; RF front-end; integrated design

0 引言

通信导航识别系统(Communication, Navigation and Identification, CNI)是一种采用综合化设计方案的多功能航电设备,主要完成载机与地面的话音及数据通信、无线电导航、精密测距、航管及监视识别等功能^[1]。由于CNI集功能较多,如果为每个功能单独设计射频信道,系统硬件设计势必会过度冗余,超额的重量、功耗是载机无法接受的。因此,为了满足CNI系统高集成度需求,在设计射频信道时需要从顶层设计出发,以相近频段的功能需求为基础,根据各功能信号的工作频段、信号带宽、接收灵敏度、动态范围等特征进行综合化设计,实现射频信道多功能通用化,优化系统硬件架构,减少系统重量和功耗。同时,综合化设计后射频信道可在系统动态配置下支持多功能重构,提高功能任务可靠性和系统战训能力^[2]。本文以航管、塔康、精密测距3个功能为例,对CNI中L波段接收机的射频前端综合化设计进行研究和讨论。

1 设计需求分析及架构选择

首先对功能需求进行分析,航管、塔康、精密测距功能工作频率及主要作用如下:

(1)航管功能接收频率为1 030 MHz,主要接收地面航管雷达的询问信号,并向地面发回飞机代号、飞行高度、特殊识别等应答信息,实现空中交通管制。

(2)塔康功能接收频率为962 MHz~1 213 MHz,测量飞机相对于塔康地面信标台的方位、距离,同时可以相互配套进行询问应答,完成相互间的距离测量。

(3)精密测距接收频率为同样为962 MHz~1 213 MHz,通过询问和接收DME/P地面信标台的应答信号,经过精密处理,完成飞机到地面信标台距离的精密测量,保证驾驶员根据该精确距离和微波着陆设备提供的航向道、下滑道数据操纵飞机安全着陆。

根据功能需求,塔康和精密测距工作频段一致,并覆盖航管工作频点,接收射频信道可进行综合化设计^[3-5],表1为各功能对接收信道的设计需求。

明确功能需求后,根据表1综合考虑功能需求进行接收机架构选择。3个功能虽然都工作于L波段,但每

表1 各功能接收信道设计需求

指标	航管	塔康	精密测距
接收频率/MHz	1 030±0.2	962~1 213	962~1 213
放大特性	对数放大	线性放大	线性放大
输入信号范围/dBm	-80~-20	-80~-5	-80~-5
动态范围/dB	≥60	≥90	≥90
输出信号功率/dBm	≥0	≥10	≥10
输出中频频率/MHz	70	70	70
噪声系数/dB	≤6	≤8	≤8
接收信号带宽/MHz	8±1	0.8±0.2	IA: 0.8±0.2 FA: 3.5±0.5
镜频抑制/dB	70	70	70

个功能对接收信道均有特定要求,例如航管要求接收机为对数放大,塔康和精密测距功能为了保证测距精度,需要接收机具备线性放大能力,塔康功能空空测距模式下长机需要对近距离僚机(大信号)和远距离僚机(小信号)轮询测距,接收机需要具备AGC控制能力,同时3个功能接收信号带宽不同。因此,接收信道需要设计较宽的工作频段及较高的动态范围,具备对数放大和线性放大两种模式,并保证良好的中频选择性。接收信道常用的拓扑结构有零中频结构、低中频结构和超外差结构3种,其中超外差式结构应用比较广泛,其最大优点是具有极佳的选择性,同时由于多次进行变频,不存在直流补偿和本振泄露问题,通过适当地选择中频和滤波器可以获得精确的选择性和灵敏度^[6]。可见超外差接收机相对于零中频接收机具有更高的抗干扰能力和更好的选择性,因此本文接收信道选择超外差式架构。

进一步分析,塔康及精密测距功能接收频率范围一致,并且覆盖航管功能接收频率,通过选择宽频段射频滤波器,接收信道前端放宽,3个功能接收信道可以共用下变频电路,中频信号根据功能配置分别送入对数通道和线性通道进行放大和中频滤波,实现接收信道的多功能应用^[7]。同时为了便于系统后端数字处理平台统一选择AD芯片进行采样,对数通道和线性通道输出中频统一设计为70 MHz,接收信道原理框图如图1所示。

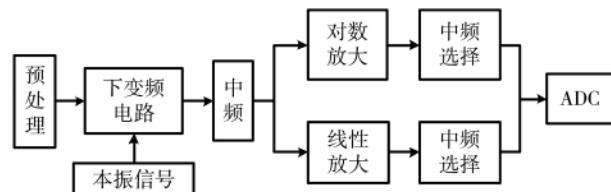


图1 接收信道原理框图

2 电路设计

2.1 下变频电路设计

下变频电路主要通过两次混频,将射频信号移到模拟70 MHz中频,同时完成低噪声放大、镜频抑制等功能。该部分电路主要包括射频带通滤波器、数控衰减器、低噪声放大器混频器、中频滤波器等器件^[8],原理框图如图2所示。

下变频电路设计中首先需要选择中频频率和本振频率,为了避免混频器等非线性器件带来的虚假信号干扰,

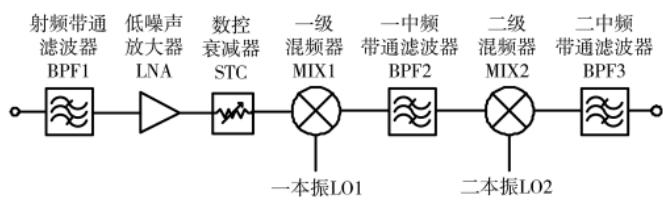


图2 下变频电路框图

第一中频的选取应该使镜像干扰和中频干扰远离接收频段^[9], 同时落入 70 MHz 中频的组合频率干扰越少, 本设计由接收射频信号与输出频率为 1 640 MHz~1 904 MHz 的一本振信号混频得到 680 MHz 一中频信号, 二本振采用 750 MHz 点频, 与一中频信号混频后得到模拟 70 MHz 信号。工程设计中 MIX1 可选用器件 LT5522EUF, MIX2 可选用器件 ADE-12。

实际工程应用中接收信道带内会收到空间多个回波信号, 例如塔康功能空空测距模式下长机需要支持对近距离(大信号)和远距离(小信号)僚机分别完成测距的能力, 而近距离信号强回波信号会使接收信道过载饱和, 因此在下变频电路中设计数控衰减器, 接收到大信号时系统控制衰减器衰减值, 保证大信号到达 LNA 输入端时电平不会使 LNA 及后端器件饱和, 大幅度扩展系统接收动态范围。但同时需要注意, 因为 STC 衰减器放置在接收信道前端, 会提高整个接收信道的噪声系数, 从而降低接收灵敏度, 影响信号输出信噪比。因此, 工程设计中数控衰减器必须选用插损器件, 在实现动态范围扩展的同时尽量避免对接收灵敏度的影响^[10-11]。

2.2 中频电路设计

中频电路主要由对数放大、线性放大、数控衰减和中频滤波器等电路组成。中频电路原理框图如图 3 所示。中频放大电路设计中需要注意, 应该先进行对数或线性放大, 再进行中频滤波^[12]。如果先进行中频滤波, 再进行放大, 放大器会对滤波后的中频信号中干扰信号也进行放大, 导致脉冲波形会发生畸变, 造成中频信号有拖尾等现象, 影响后级灵敏度及功能解算, 对于塔康和

精密测距等有精度要求的功能, 测距精度将无法保证。

根据对数放大电路性能需求和现有器件能力, 对数放大电路中放置一个对数放大器即可满足信道使用要求, 可选用对数放大器 AD8309, 其输入动态范围为 -78 dBm~+22 dBm, 可以满足对数放大 60 dB 的要求, 同时 AD8309 线性误差只有 ± 0.4 dB, 对数线性度能够满足要求。

线性放大电路中通过两级数控衰减器来实现中频电路所要求 60 dB 增益控制范围^[13], 数控衰减器步进都为 2 dB, 控制精度为 ± 0.4 dB。实际设计中两级 AGC 衰减器放置在不同的结构腔体中, 保证大信号下能衰减到足够深度和精度。同时, 为了获得较好对数精度和动态范围, 线性放大电路中放大器选用 SBF-5089, 该器件 $P_{-1}=21$ dB, 可保证最末级放大器输出饱和前, 接收通道前面所有器件均未达到压缩状态^[14]。

中频带宽选择性通过设计相应带宽的中频滤波器来达到系统要求, 对数通道由于中频信号带宽较宽采用 LC 滤波器, 在满足通道中频选择性的前提下, 减少滤波器时延; 线性通道中频信号带宽较窄, 采用声表滤波器。根据功能设计需求, 中频滤波器指标设计见表 2。

3 关键技术指标分析

3.1 各级器件指标分配

根据上述设计情况, 各级器件的噪声系数 P_{-1} 、增益及输出、输出电平见表 3 及表 4。

可以看出, 对数通道放置的对数放大器的动态范围为 60 dB, 满足航管功能接收通道 60 dB 动态范围要求; 线性通道的 90 dB 动态范围可以通过前级射频电路的 30 dB 数控衰减器和中频放大电路的两级数控衰减器实

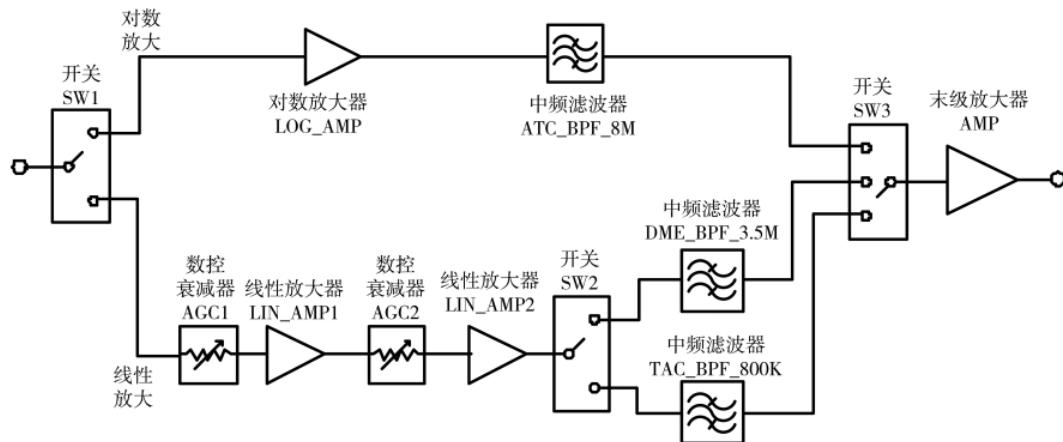


图 3 中频放大电路框图

表 2 中频滤波器关键设计指标

参数	BPF4 滤波器	BPF6 滤波器	BPF7 滤波器
工作中心频率/MHz	70	70	70
3 dB 带宽/MHz	8	3.5	0.8
频率选择性	BW60 dB/BW3 dB ≤ 3.3	BW60 dB/BW3 dB ≤ 2.3	BW60 dB/BW3 dB ≤ 2.8
中心插损/dB	≤ 4	≤ 10	≤ 6

表 3 对数通道指标分配

器件	噪声系数	P_{-1}/dBm	G/dB	输入电平/ dBm	输出电平/ dBm
BPF1	1	-	-1	-80	-81
LNA	0.8	19	19	-81	-62
STC	2	-	-2	-62	-64
MIX1	11	15	-1	-64	-65
BPF2	5	-	-5	-65	-70
MIX2	11	10	-1	-70	-71
BPF3	3	-	-3	-71	-74
LOG_AMP	4	10	60	-74	-14
ATC_BPF	4	-	-4	-14	-18
AMP	4	5	25	-18	7

表 4 线性通道指标分配

器件	噪声系数	P_{-1}/dBm	G/dB	输入电平/ dBm	输出电平/ dBm
BPF1	1	-	-1	-80	-81
LNA	0.8	19	19	-81	-62
STC	2	-	-2	-62	-64
MIX1	11	15	-1	-64	-65
BPF2	5	-	-5	-65	-70
MIX2	11	10	-1	-70	-71
BPF3	3	-	-3	-71	-74
LIN_AMP1	4	10	20	-74	-54
AGC1	2	-	-2	-54	-56
LIN_AMP2	4	5	27	-56	-29
AGC2	2	-	-2	-29	-31
LIN_AMP3	4	5	27	-31	-4
TACAN_BPF	6	-	-6	-4	-10
DMEP_BPF	10	-	-10	-4	-14
AMP	4	5	25	-10/-14	15/11

现。整个接收信道在小信号下系统各级器件未饱和,大信号下可通过前端灵敏度控制和 AGC 调整链路电平^[15],使接收信道工作在对数或线性放大范围内,输出信号幅度满足设计要求。

3.2 噪声系数

接收机射频前端由多级电路级联组成,系统噪声系数计算公式如下:

$$\text{NF} = \text{NF}_1 + \frac{\text{NF}_2 - 1}{G_1} + \frac{\text{NF}_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{\text{NF}_i - 1}{G_1 G_2 \cdots G_{i-1}} \quad (1)$$

式中, NF_i 为第 i 级器件的噪声系数, G_{i-1} 为第 $i-1$ 级器件的增益。根据设计情况可计算出对数和线性通道噪声系数分别为 5.50 dB 和 5.51 dB,两个通道噪声系数数值基本相等,主要原因是接收机的噪声系数主要取决于前端元器件的噪声系数。因此为了降低系统噪声,接收前端采用高增益低噪声放大器。

3.3 镜频抑制

由频率规划可知,接收通路有两个镜频频率:(1)一镜频为(射频+2×高中频)2 320 MHz~2 584 MHz;(2)二镜频为(高中频+2×低中频)820 MHz。

镜频抑制主要通过两级滤波器实现,其中射频滤波器 BPF1 的主要作用是抑制一镜频信号,同时限制接收信号带宽,抑制进入接收信道的带外干扰: $\geq 40 \text{ dBc}$ @1 530 MHz, $\geq 40 \text{ dBc}$ @620 MHz。BPF2 滤波器主要抑制 820 MHz 镜频、本振泄露,混频交调,以及带外抑制: $\geq 45 \text{ dBc}$ @750 MHz, $\geq 45 \text{ dBc}$ @610 MHz, $\geq 75 \text{ dBc}$ @820 MHz。因此,射频信号镜频抑制 $\geq 85 \text{ dB}$,二镜频 820 MHz 抑制 $\geq 75 \text{ dB}$,满足指标要求。

3.4 指标符合性

根据设计情况对照表 1 各功能接收信道设计需求,综合化设计射频前端指标符合性表,见表 5。

4 结论

本文讨论了通信导航识别系统中 L 波段射频接收信道的综合化设计,综合化设计后射频接收信道具备对数和线性两种工作模式,可支持同频段多功能动态配置使用,各项指标符合功能使用需求。

参考文献

- [1] 张雪莲.多功能综合射频技术发展研究[J].现代雷达,2020,42(7):78~81.
- [2] 董大鹏.机载通信导航识别系统综合检测设备设计与实现[J].电讯技术,2021,61(9):1080~1086.
- [3] 孔令全.综合化机载塔康测距的双天线分集接收设计与实现[J].电子测量技术,2021,44(8):1~6.
- [4] 李亚军.机载塔康无源定位方法研究[J].无线电工程,2019,49(3):229~233.

表 5 各功能接收信道设计需求

指标	设计值	是否符合设计要求
接收频率/MHz	962~1 213	是
放大特性	具备对数放大、线性放大两种放大通道	是
动态范围	对数通道 $\geq 60 \text{ dB}$,线性通道 $\geq 90 \text{ dB}$	是
输出信号功率	对数通道 7 dBm, 线性通道 15/11 dBm	是
输出中频频率/MHz	70	是
噪声系数/dB	5.51	是
接收信号带宽	见表 2	是
镜频抑制/dB	≥ 85	是

(下转第 8 页)

有效地将带宽提高到 39%。仿真结果表明，在 140 GHz 工作时，3 dB 轴向比可以达到 54 GHz 的带宽，插入损耗小于 5 dB。在后续的设计中，将采用多层堆叠的方式进一步增加带宽，并且尝试增加匹配层以减小插入损耗。

参考文献

- [1] LI W , XIA S , HE B , et al . A reconfigurable polarization converter using active metasurface and its application in horn antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation , 2016 , 64(12) : 5281–5290.
- [2] LI Y , ZHANG J , QU S , et al . Achieving wide-band linear-to-circular polarization conversion using ultra-thin bi-layered metasurfaces[J]. Journal of Applied Physics , 2015 , 117(4) : 44501.
- [3] NGUYEN T , NGUYEN T , NGUYEN T , et al . Simple design of a wideband and wide-angle reflective linear polarization converter based on crescent-shaped metamaterial for Ku-band applications[J]. Optics Communications , 2021 , 486(6138) : 126773.
- [4] CHEN Z , GONG Y , DONG H , et al . Terahertz achromatic quarter wave plate: design, fabrication, and characterization[J]. Optics Communications , 2013 , 311(2) : 1–5.
- [5] LI J , WANG G , YUE Z , et al . Dynamic phase assembled

terahertz meta-lens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization[J]. 光电进展(英文), 2022 , 5(1) : 24–34.

- [6] TANG B , REN Y . Tunable and switchable multi-functional terahertz metamaterials based on a hybrid vanadium dioxide-graphene integrated configuration[J]. Physical Chemistry Chemical Physics , 2022(14) : 8408–8414.
- [7] YE L , CHEN X , ZHU C , et al . Switchable broadband terahertz spatial modulators based on patterned graphene and vanadium dioxide[J]. Optics Express , 2020 , 28(23) : 33948.
- [8] Ma Xiaoliang , Huang Cheng , Pu Mingbo , et al . Multi-band circular polarizer using planar spiral metamaterial structure[J]. Optics Express , 2012 , 20(14) : 16050–16058.

(收稿日期: 2022-09-21)

作者简介:

侯佳(1996-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 5G 无线通信。

周秀杰(1988-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 5G 通信系统及关键技术、核心网。

李艳芬(1983-), 女, 硕士, 主要研究方向: V2X、5G、天线。



扫码下载电子文档

(上接第 4 页)

- [5] 李枢, 杜世勇, 唐川. 一种二次监视雷达接收机灵敏度的自动测量方法[J]. 电子世界 , 2021(3) : 63–64.
- [6] 王帅, 张杰, 张彦峰. 射频接收机中自动增益控制电路建模与设计[J]. 无线电通信技术 , 2019 , 45(4) : 419–424.
- [7] 丁萍, 方南军, 胡善祥. S 波段宽带 16 通道射频接收模块设计[J]. 火控雷达技术 , 2021 , 50(2) : 93–97.
- [8] 马韬. 一种应用于大功率导引头的小型化接收前端[J]. 无线电工程 , 2020 , 50(6) : 519–522.
- [9] 卿晨. 一种小型化大动态范围的接收机信道设计与测试[J]. 电子技术应用 , 2021 , 47(1) : 16–20.
- [10] 周伟中, 王晶晶, 吴治霖. 宽带射频接收通道的设计与实现[J]. 通信技术 , 2021 , 54(2) : 492–497.
- [11] 唐晓, 丁肇宇, 吴志鹏, 等. 微波功率放大器三阶交调特

性与实验测量[J]. 电视技术 , 2019(2) : 92–97.

- [12] 魏鋆宇, 陈泽宗, 赵晨, 等. S 波段船载测波雷达接收机设计及实现[J]. 科学技术与工程 , 2021 , 21(17) : 7174–7179.
- [13] 王晓光. 一种高动态双模抗干扰接收机设计方法[J]. 无线电工程 , 2019 , 49(3) : 219–223.
- [14] 庞子鸿. 基于射频收发机的通信系统的研究与设计[J]. 电子测试 , 2019(11) : 98–99.
- [15] 曲韩宾, 高思鑫, 张晓朋, 等. 一种高线性无源双平衡混频器[J]. 半导体技术 , 2019(6) : 421–425 , 432.

(收稿日期: 2022-05-25)

作者简介:

张宇晖(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 航空电子技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所