

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.07.015

引用格式:张先荣.超宽带毫米波接收前端设计[J].电讯技术,2016,56(7):799-803.[ZHANG Xianrong. Design of an ultra-wideband millimeter wave receiver front-end[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(7): 799-803.]

超宽带毫米波接收前端设计*

张先荣**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对传统超宽带射频前端组合杂波干扰过多和体积过大的问题,提出了将射频前端通过采用毫米波二次变频的设计方案,使得输入中频和输出射频之间的频率间隔加大,削弱了混频导致的频率组合、杂散和本振反向辐射等干扰。通过对器件功率及电平的合理配置,实现了低噪声、宽频带、大动态的输出,在大于4 GHz的接收频段内,其噪声系数小于3.6 dB,动态范围大于55 dBm。该接收前端还具备低成本、结构紧凑、重量轻等特点,可广泛应用于电子对抗、宽带侦察接收系统。

关键词:毫米波接收前端;超宽带;大动态范围;二次变频

中图分类号:TN85 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)07-0799-05

Design of an Ultra-wideband Millimeter Wave Receiver Front-end

ZHANG Xianrong

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

Abstract: To solve the problem of the combined frequency interference and large size in conventional wide-band receiver front-end, a millimeter wave double conversion scheme is proposed in this paper, which expands the interval between input intermediate frequency and output radio frequency so as to weaken the combination frequency interference, output spur and back radiation of local oscillator decrease. By configuring power and supply voltage of device properly, low noise, wideband and large dynamic range at output is realized with noise figure ≤ 3.6 dB and dynamic level ≥ 55 dBm in bandwidth > 4 GHz. The designed front-end is featured by low cost, compact structure and light weight and it can be widely applied in electronic countermeasure, wideband reconnaissance system and other fields.

Key words: millimeter wave receiver front-end; ultra-wideband; large dynamic range; double conversion frequency

1 引言

随着电子信息技术的快速发展,密度越来越高的各类信号所占用的电磁频谱越来越宽,使得频谱资源日益紧张。如何在利用有限资源的同时又能提高整个系统的质量,一直是射频工程师们努力的方向。因不同频率及传输速率的系统能在宽频带内同时使用,使得超宽带接收机在提高频谱利用率的同时还具备更大的信号容量,使系统得以简化和实现更快的传输速率。在此情况下,超宽带接收技术应

运而生。射频接收前端作为接收系统中的重要组成部分,其性能的优劣往往直接影响着整个系统的性能,具备超宽带、大动态、小型化的接收前端便成为了一个研究热点。

一般来讲,当信号带宽与中心频率的比值超过25%或者带宽大于1.5 GHz,即称之为超宽带(Ultra-Wideband, UWB)信号,1%~25%之间则称之为宽带,小于1%时通常称之为窄带;而在通信领域中,如果侦察的频率覆盖范围超过1 GHz,通常就可以

* 收稿日期:2015-12-29;修回日期:2016-06-08 Received date:2015-12-29;Revised date:2016-06-08

** 通信作者:zxrhappy205@126.com Corresponding author:zxrhappy205@126.com

认为是超宽带。在此情况下,具备跨越倍频程的宽频带侦察与截获能力的侦察接收机引起了业界的广泛关注。

目前文献报道的传统宽带、超宽带接收系统主要采用开关矩阵和滤波器组来对信号进行分段选频和滤波,其射频和中频均集中于微波频段^[1-4]。这样的超宽带接收系统中中频和射频相距较近,给混频后形成的各类组合波干扰处理带来很大困难。文献[3]对接收信道中各类组合波的干扰问题进行了较为详细的阐述;同时由于使用了多组开关矩阵和滤波器组不仅存在体积过大的问题,而且还带来成本的增加。

由于毫米波介于微波、红外和可见光之间,具备波长短、可用频带宽、抗干扰性强、设备尺寸小等特点。近年来,毫米波系统无论在精确制导、通信技术还是在电子对抗、无线电侦测等方面都得到了极大的应用和发展。

为了解决上述问题,研制出高性能、小体积的接收前端,本文提出了将超宽带射频输入信号先上变频到毫米波后再下变频至微波频段的二次变频方案,并只使用一组滤波器,以此来设计一种性能优良的超宽带毫米波接收前端。

2 系统整体方案

在整体的系统方案设计过程中,通过对零中频、射频数字接收机以及超外差式几种接收体系架构的比较,为了获得良好的宽带噪声系数和动态范围指标,选择了通过二次变频的超外差式体系架构。

整个接收前端主要由上下变频和本振两个模块以及输入和输出接口组成。上下变频模块由三部分组成,主要包括上变频单元、放大滤波单元、下变频单元。第一次是先将射频输入信号通过上变频到 Ka 频段并进行放大滤波;然后通过下变频将 Ka 频段信号再变频至微波段输出,这种方式在两次变频中各有用射频和中频信号相互之间的频带分布间隔较远,可有效减少射频、本振和中频之间的相互干扰。接收前端整体方案组成框图如图 1 所示。

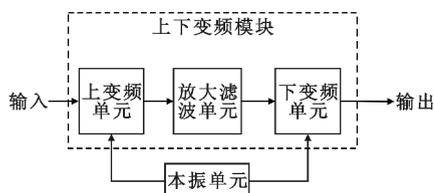


图 1 接收前端系统框图

3 接收前端设计

一般来讲,接收组件主要由信号接收通道及本振两部分组成。对于传统的超宽带接收机设计,其混频前后的中频和射频工作频率均位于微波频段,主要采用开关滤波器组来进行分段选频,这样的混频方式使得组合波与有用信号间隔较近,给后续的杂波抑制带来困难。为了利用毫米波的优良特性和减少体积以及提高接收前端性能,本文所设计的超宽带接收前端采用跳频本振,将接收信号先上变频至毫米波频段的超外差式模式,大大增加射频和中频之间的频率间隔,从而减少组合波对有用信号造成的干扰,在此过程中也只使用一组固定带宽的滤波器。

3.1 总体电路设计

针对超宽带接收前端难以实现高增益、大动态和高线性度等问题,并为了解决镜像频率和寄生通道的干扰信号,采用了二次混频的方案。

上变频单元将接收的超宽带信号从微波频段上变频至 Ka 频段后,还要对毫米波频段信号进行放大、滤波等处理。下变频在将毫米波信号下变频至微波频段后,仍需要对信号进行放大、滤波、均衡等处理后再进行输出。为了避免大脉冲功率信号对器件的影响,在接收前端设置了限幅器来提供限幅保护。输入输出接口采用 K 接头。

对于覆盖($f_1 \sim 5f_1$) GHz 多个频段的射频输入信号,需要对输入信号进行分段处理。如果采用传统的方法,在混频后通过单刀多掷开关组进行时分分段切换,相应地就需要配置多个不同频段的滤波器,这样将使得无论电路还是结构设计都变得比较复杂,同时也会大大增加产品的体积和重量。

为了解决这个问题,经过比较和方案优化,本文采取了本振 1 为跳频本振、本振 2 为固定本振的方案。通过控制信号将射频输入信号分为带宽 1 GHz 的 4 个不同频段,即 $f_i \sim (1+f_i)$, $i=1,2,3,4$; 将跳频本振 1 的各本振点 LO_1、LO_2、LO_3、LO_4 与之对应的输入频段信号混频,得到 Ka 频段 RF 信号来实现固定瞬时带宽为 1 GHz 的动态变频功能。下变频采用一路固定点频信号 LO2 与 Ka 频段射频信号下混频至微波频段,经过放大滤波、再放大、均衡等输出($f_2 \sim (1+f_2)$) GHz 的固定中频输出信号。整个接收前端链路器件组成如图 2 所示。

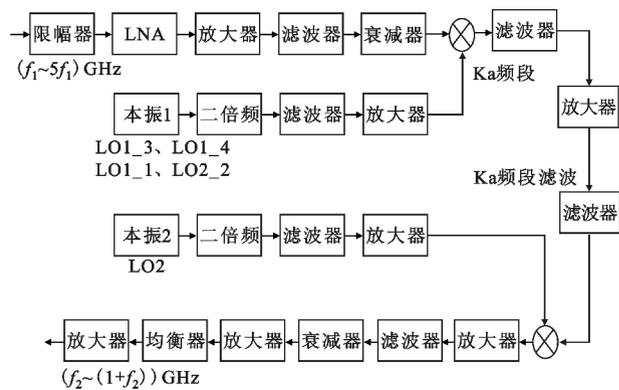


图 2 接收前端器件链路组成图

Fig. 2 Schematic diagram of receiver front-end module

3.2 关键技术指标分析及设计

(1) 噪声系数

噪声系数大小直接影响着射频前端系统的性能指标,由于系统采用的是多个器件的级联,而多级级联的噪声系数可通过公式(1)进行计算^[6]:

$$F_{\text{cas}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (1)$$

式中: G_1 、 G_2 和 F_1 、 F_2 ...分别为第一级和第二级的增益和噪声系数。从公式(1)中可以看出,采用级联的方式来设计整个系统,则其总的噪声系数指标主要受前几级器件的影响,而第一级器件的增益和噪声性能几乎对系统起到决定性的影响。因此,设计时选了一个宽带高增益的低噪声放大器。

(2) 组合频率干扰

超外差结构存在的固有的缺点为组合频率分量较多,设计时的一个难点在于如何满足宽带信号接收时带来的高次谐杂波抑制制度。在混频过程中,为了减少上下变频谐杂波分量对系统的影响,一方面通过合理的频率选择,将输入射频信号的频率与本振频率之间的频率间隔拉大,将本振信号二次倍频至 Ka 频段。这样($f_i \sim (1+f_i)$) GHz 的输入信号与对应的 LO_1、LO_2、LO_3、LO_4 混频至 Ka 频段后,除有用信号以外,其余落入有用频带内的组合波均超过 7 阶以上,大大减少了对有用信号的干扰。另一方面,上下变频均选用了隔离度高、能有效抑制偶次谐波分量和本振噪声的有源双平衡混频器。

对于本振信号中的相噪或杂散与接收通带外的无用信号产生的倒易混频干扰,采用本振信号倍频后加滤波器再进行混频的方式给予有效抑制。

同时,在大动态范围内,各射频信号之间的电磁兼容性也是需要着重考虑的问题:一方面选择高隔离度的器件,并在传输通道中放置滤波器以减少传

导耦合干扰;另外在结构设计时,将各器件和传输通道分别放置在不同的金属腔内,防止信号相互间的耦合串扰。

(3) 三阶交调干扰

该指标通常用来反映器件和信道多个信号的线性度指标。宽带系统与传统的系统相比较,多个大信号同时输入通带内的概率较大,由此引起的互调影响将大为增加。由于多级级联后系统的三阶截断点总功率会小于单级器件的三阶互调功率,同时由于进入后级的输入电平经过前级放大后会恶化相应的指标,为此,设计时通过合理的增益分配,尽可能使放大器工作于线性区,并且在下变频后采用了 3 个高增益、高三阶的放大器件,并将大动态放大器放置于末级以提高三阶交调指标。

通过对以上关键技术指标的分析,再进行相应的器件选择和电路布局,在输入功率为 -25 dBm 的情况下,具体的链路增益、噪声分配、三阶交调等参数如表 1 所示。

表 1 射频前端级联参数值

Tab. 1 The parameters of cascaded receiver front-end

名称	NF/dB	Gain/dB	OIP3/dBm	P_{out} /dBm
限幅器	0.70	-0.7	100.0	-25.7
放大器 1	1.70	16.0	27.0	-9.7
放大器 2	5.50	12.0	40.0	2.3
低通滤波器	1.00	-1.0	100.0	1.3
衰减器	8.00	-8.0	100.0	-6.7
混频器 1	9.00	-9.0	19.0	-15.7
滤波器 2	2.00	-2.0	100.0	-17.7
放大器 3	2.80	15.0	23.0	-2.7
滤波器 3	3.00	-3.0	100.0	-5.7
混频器 2	9.00	-9.0	19.0	-14.7
放大器 4	2.50	14.5	44.0	-0.2
滤波器 4	2.00	-2.0	100.0	-2.2
衰减器	8.00	-8.0	100.0	-10.2
放大器 5	1.50	14.5	44.0	4.3
均衡器	3.00	-3.0	100.0	1.3
放大器 6	2.50	14.5	44.0	15.8
级联结果	3.77	40.8	38.4	

3.3 无源电路设计

滤波器作为系统中一种不可或缺的重要无源器件,直接影响着接收前端的选频、带外杂散等无用信号的抑制等指标,其指标的好坏将直接影响着系统的性能。为了使接收机射频前端的性能达到最佳效果,滤除接收机中各种干扰信号,保留有用信号,必须在接收机前端适合的位置放置滤波器。为此,需

要单独设计一款性能优良的滤波器。

在滤波器的选择过程中,波导滤波器虽然具有 Q 值高、传输损耗小的优点,但其体积大,虽然可以采用消失模、双模或者电容加载等方式实现小型化,但始终与平面电路难以实现有效的集成^[7-9]。采用软基片结构的毫米波滤波器平面集成虽然容易,但其存在介质损耗过高的缺点,无法满足毫米波高性能滤波器的要求。为此,本文采用了介电常数为 9.6、介质损耗角 0.015% 的陶瓷滤波器,介质厚度设置为 0.254 mm,其具有微米量级的加工精度,整体技术指标均比软基片材料高了一个量级。因此,采用该材料来设计的毫米波滤波器具有加工精度高、体积小、传输损耗低等优点,非常适合在本方案中的毫米波频段使用。通过利用电磁仿真软件 HFSS 进行仿真,同时为了补偿仿真、加工及装配工程中误差带来的影响,仿真时将带宽往高低端各扩展了 200 MHz,具体的滤波器结构及 S 参数仿真曲线如图 3 所示。图中标识的 m3 为距离通带最近的本振点 LO_1 所在频率位置,其抑制达到 40 dB,满足指标要求。

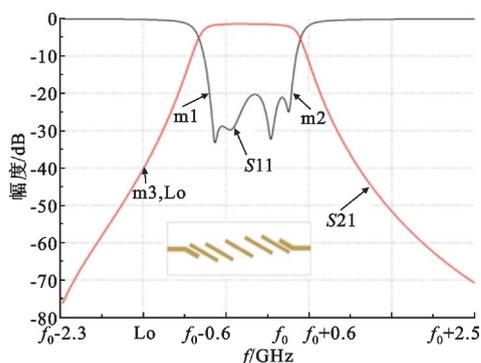


图 3 滤波器仿真 S 参数图

Fig. 3 Simulated S-parameters of the filter

为了满足单双音动态范围,以及抑制下混频后的组合波干扰,在第二次混频放大后还采用了一个表贴滤波器来对信号进行处理。

考虑到整个系统采用的器件多、频带较宽、各器件在整个频带内的增益平坦度各不相同等特点,会对整个通带内的增益平坦度造成额外的影响,最后在末级输出放大器之前设计了一个无源均衡器。在产品调试的过程中通过改变枝节的阻抗来调整整个频带内的增益斜率,以获得满足指标的增益平坦度。

4 测试结果

整个毫米波超宽带接收前端安装在一个 6U 的

标准机盒内,控制和电源信号通过安装在机盒背面的低频连接器与外部相连;输入和输出 SMA 接口则分别安装在机盒的前面和背面。整个接收前端实物如图 4 所示。



图 4 实物测试图

Fig. 4 Photo of testing platform

整个接收前端在常温、常压环境下利用信号源、频谱仪、噪声仪等进行指标测试。测试内容包括工作频段、瞬时带宽、噪声系数、线性增益、增益平坦度、输出 P_{-1} 、单音动态范围、双音动态范围等指标。从实际测试结果来看,整个接收工作频率范围超过两个频段,分段瞬时带宽也超过 1 GHz,满足超宽带的要求。具体的测试指标如表 2 所示。

表 2 射频前端测试指标

Tab. 2 Measured parameters of the receiver front-end

指标	测试结果
工作频段/GHz	$f_1 \sim 6.1f_1$
动态范围/dBm	>55
噪声系数/dB	3.6
瞬时带宽/GHz	≥ 1.2
线性增益/dB	40 ± 1.2
增益平坦度/dB	$< \pm 1$
单音动态范围 dBc	>57
双音动态范围/dBc	>53

5 结论

为了减小传统宽带接收前端混频前后频率相隔较近,使得混频后有用信号与组合波之间的相互干扰处理困难的问题,本文提出了将接收前端的微波频段宽带中频输入信号利用数字控制进行分段处理,与跳频本振上混频到固定带宽的毫米波频段,而后再下变频到微波频段作为输出的超外差方式二次变频方式。这种方式使得混频后的组合波与有用信

号相距较远,有效地减少了各类组合波带来的干扰,提高了接收前端的性能,使得成本更低,结构更加紧凑并减小了系统的重量。

通过测试,整个接收带宽频率覆盖范围超过了两个频段,在整个有用频带内,其噪声系数只有 3.6 dB,动态范围超过 55 dBm,瞬时带宽达到 1.2 GHz 以上。该接收前端具备低噪声、宽频带、大动态的特性且性能优良,可广泛应用于超宽带电子对抗、侦察接收系统等领域。

参考文献:

- [1] 漆家国,曹广平. 一种射频宽带接收机的设计[J]. 电讯技术,2007,47(2):88-91.
 QI Jianguo, CAO Guangping. Design of a RF wideband receiver[J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(2): 88-91. (in Chinese)
- [2] 马岸英,杨军超,司昕璐. 宽带高分辨率无线电信号侦察接收机[J]. 探测与控制学报,2005,27(2):1-4.
 MA Anying, YANG Junchao, SI Xinlu. Wideband radio signal reconnoitering receiver with high resolution[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(2): 1-4. (in Chinese)
- [3] 陈国宇. 大动态范围宽带接收机射频前端设计与实现[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
 CHEN Guoyu. Design and realization of RF front-end of the high dynamic range broad band receiver[M]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [4] 卢建平. 超宽带大动态雷达接收机设计[M]. 西安:西安电子科技大学,2009.
 LU Jianping. Design of ultra-wideband and large dynamic-range radar receiver[M]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)

- [5] 刘宾容. 接收前端信道设计中的一些考虑[J]. 电讯技术,2004,44(3):120-123.
 LIU Binrong. Some consideration on the design of receiver front end channel[J]. Telecommunication Engineering, 2004, 44(3): 120-123. (in Chinese)
- [6] POZAR D M. Microwave engineering[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [7] ZHANG Q, ITIOH T. Computer-aided design of evanescent-mode waveguide filter with nontouching E-plane fins[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1988, 36(2): 404-412.
- [8] WU L S, ZHOU X L, YIN W Y. Evanescent-mode band-pass filters using folder and ridge substrate integrated waveguide (SIW) [J]. IEEE Microwave and Wireless Components, 2009, 19(3): 161-163.
- [9] ZHANG X R, WANG Q Y, HAN W, et al. A novel capacity loaded dual-mode band-pass filter[C]//Proceedings of 2012 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology. Chengdu: IEEE, 2012: 65-67.

作者简介:



张先荣(1975—),男,四川富顺人,分别于 2009 年和 2013 年获电子科技大学硕士学位和博士学位,现为工程师,主要研究方向为毫米波电路与系统、微系统等。

ZHANG Xianrong was born in Fushun, Sichuan Province, in 1975. He received the M. S. degree and the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009 and 2013, respectively. He is now an engineer. His research concerns millimeter wave circuit and system, microsystem, etc.

Email: zxrhappy205@126.com