基于 Cubesat 平台的 874 GHz 冰云探测仪设计

张 欣[1],胡伟东[1],刘瑞婷[1],司炜康[1],李雅德[1],刘芫喽[1],LIGTHART Leo P.[2]
(1. 北京理工大学,北京 100000;2. 代尔夫特理工大学,荷兰 代尔夫特 2628 CN)

摘 要:冰云探测对气候预测有重要价值,但因冰云粒子的影响,传统气象观测方法很难有效观测气候。太赫兹波的信号带宽较宽、波束较窄,在冰云探测上比使用微波毫米波更具优势。太赫兹冰云探测仪作为被动接收设备,具有体积小、功耗小的特点,与成本低、研发周期短、可以实现组网观测的 Cubesat 卫星平台有较高的契合度。以冰云探测为背景,分析太赫兹冰云探测仪系统指标,设计 874 GHz 接收机系统的链路。在确保接收机系统性能的同时注重简化链路,减少体积功耗,以适应 Cubesat 平台,并结合工程经验在链路设计时采取预留增益余量、加入隔离器增强匹配等措施保证工程上的可实现性。最后对接收机链路进行 ADS 仿真,仿真结果能够满足冰云探测仪对接收机指标的需求。

关键词:Cubesat; 太赫兹; 冰云探测仪; 链路设计; 辐射计
中图分类号:P412.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.018

874 GHz Ice Cloud Detector Design Based on Cubesat Platform

ZHANG Xin[1], HU Weidong[1], LIU Ruiting[1], SI Weikang[1], LI Yade[1], LIU Yuanlou[1], LIGTHART Leo P.[2]
(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100000, China; 2. Delft University of Technology, Delft 2628 CN, Netherlands)

Abstract: Observation of ice cloud is of great value to meteorological prediction, but it is difficult to observe ice cloud effectively based on traditional meteorological observation methods due to the characteristics of ice cloud particles. The terahertz wave with wider signal bandwidth and narrower beam has more advantages than microwave and millimeter wave detection in the ice cloud detection. As a passive receiver, terahertz cloud detector with small size and small power consumption suits the Cubesat platform with advantages of low cost, short development cycle and convenient network observation. In this paper, the terahertz ice cloud detector system is analyzed for the application of the ice cloud detection, and some works are done to fit the Cubesat platform with uncompromised performance including the receiver link simplification, the receiver volume compression and the power consumption reduction. Engineering experience ensures the project implementation, such as the reserved gain margin and the use of isolator to enhance matching. The simulation based on the 874 GHz receiver system link through advanced design system (ADS) is completed to meet the requirements of ice cloud detection.

Keywords: Cubesat; terahertz; ice cloud detector; link design; radiometer

0 引言

冰云是完全或几乎由冰晶粒子组成的云,存在于大气对流层上层 8～15 km 处,对地球表面的覆盖率达 30%。冰云可影响地球温度,对地球起保温作用[1]。冰晶颗粒的凝华同样严重影响降水及降雪率[2],在冰晶颗粒加强时,降水量升高,减弱时降水量降低[3]。此外,云水特别是台风中存在的冰粒子影响热带的气体动力学,而大尺度的大气环流趋势和海

收稿日期:2018-01-26;**修回日期**:2018-02-09
基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器项目(61527805);国家自然基金面上项目(41775030);教育部高等学校创新引智计划项目(B14010)
作者简介:张 欣(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向为太赫兹成像系统的系统硬件设计。
通信作者:胡伟东(1975—),男,博士生导师,主要研究方向为空间太赫兹遥感技术。

表面的状态是台风活动的重要影响因素[3]。冰云在大气温度、降水、台风形成等许多领域都扮演着非常重要的角色，故探测冰云非常重要。然而冰云具有尺寸小、颗粒稀疏、易散射等特点，难以探测。现有的激光雷达、微波辐射计、大气临边探测仪等多种气象探测设备均不能准确探测冰云，且冰云的探测极其依赖频率，故低频段的微波探测技术已不能满足要求。日本信息通信研究机构（NICT）研究太赫兹及冰云发现，对尺寸为几百微米的冰云颗粒，用太赫兹频段观测效果最佳[4]。中科院空间科学与应用研究中心（简称中科院空间中心）、西安空间无线电技术研究院、上海航天电子技术研究所、北京航空航天大学等均在研制微波辐射计。中科院空间中心已研制 118，150，183，220，424.763 GHz 辐射计，其中 150，183 GHz 辐射计已应用于风云三号卫星中。但对更高频段 874 GHz的研究相对较少，为获得更精确的冰云粒子相关参数，如尺寸、形状、粒子浓度、冰水含量等，需要研制更高频段的太赫兹冰云探测仪[5]。

立方体纳卫星（Cubesat）是近年来纳卫星领域的研究热点。立方体纳卫星的主要特点和优势在于其发射接口标准、制造和发射成本低廉。3U 立方体纳卫星 3 年内的设计、建造、发射和管理费用少于 100 万美元[6]，能满足大学、研究机构和商业公司培养航天人才、低成本开展空间科学研究和探索新技术、新器件航天应用的需求，且基于 Cubesat 平台星间组网可降低观测间隔时间，减少观测盲区。

太赫兹频段的波长小，天线、滤波器等器件尺寸小、功耗低，能适应 Cubesat 平台的特点，可利用平台有限的资源完成冰云探测任务。基于以上论述，本文结合太赫兹冰云探测和 Cubesat 平台的优势，分析了 874 GHz 频段在冰云探测方面的优点，确定了冰云探测仪的工作频段和整机关键指标。

针对 Cubesat 平台资源有限的问题，冰云探测仪设计必须优化。本设计使用全功率型辐射计体制简化接收链路，使用介质谐振器（DRO）作为本振（LO）源简化本振链路。在进行链路 ADS（advanced design system）仿真时结合太赫兹半导体厂商的器件指标，增强了可实现性。最后仿真结果既可满足设计指标，又可满足冰云探测需求，对冰云探测向更高的太赫兹频段发展起到了一定的推动作用。

1　太赫兹冰云探测仪设计原理

1.1　太赫兹频段的选择及整机指标确定

研制冰云探测仪的首要问题是通道选择。需要研究大气冰云粒子的辐射特性，分析粒子的大小、分布等特性所导致的在不同频段的极化差异，以及与卷云参数间的关系。通道的选择不仅与冰云粒子辐射相关，同时也应考虑通道对水汽氧气的吸收特性，及硬件技术在相关频段的发展情况所能达到的最佳灵敏度。同时中心频点的选择要确保在中心频点两侧有相似的辐射特性。

如图 1 所示，大气波谱中共有以下几个频段可以观测冰晶粒子的特性，分别为 118，183，220，380，425，643，874 GHz[5]。874 GHz 波段是其中的一个关键通道，874 GHz属窗区通道，利用窗区通道大气透过率高的特点，探测近地表大气参数，且874 GHz 中心频点左右的大气波谱较对称，可提供一个大的通道带宽，以提升冰云探测仪的灵敏度。因此，874 GHz波段对稀薄卷云的探测灵敏性较高，且具有较高的分辨率，对冰云的研究具有非常重要的意义。基于辐射计关键指标灵敏度的考虑，

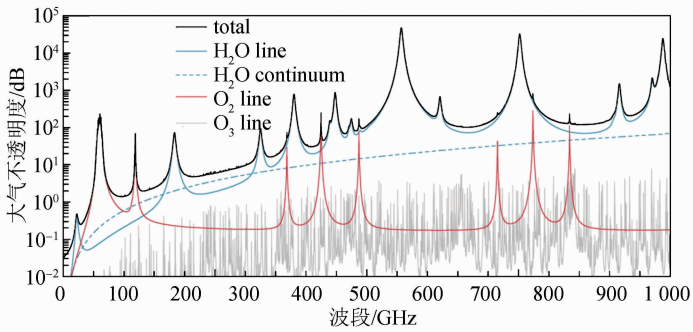


图 1　微波与太赫兹波大气波谱

Fig.1　Microwave and terahertz atmospheric spectrum

874 GHz 冰云探测仪的推荐中心频点为 874.38 GHz，带宽为 5 GHz 以上[5]。根据实际硬件情况，确定设计中心频点为874.38 GHz，带宽为 24 GHz，参照国际辐射计指标及中科院空间中心、上海航天技术研究院等国内研究机构对冰云探测仪的建议，得到的推荐指标如表 1 所示[5,7-8]。

表 1 874 GHz 冰云探测仪推荐指标

Tab.1 Recommended indexes of 874 GHz ice cloud detector

频点/GHz	带宽/GHz	极化方式	通道数	主波束效率/%	灵敏度/K	空间分辨率/km	测温范围/K
874.38	24	H	1	≥90	≤1.5	≤25	3～340

1.2 874 GHz 冰云探测仪体制选择

冰云探测仪通常使用被动接收设备（辐射计）实现。辐射计常用类型有全功率型辐射计和迪克型辐射计。相对迪克型辐射计，全功率型辐射计的优点是设计结构简单，占用星上平台空间、功耗等资源少，可靠性高，在太赫兹频段易实现，能避免迪克型辐射计开关单元带来的误差，且能在全部积分时间内检测待测目标。但全功率辐射计灵敏度易受增益起伏影响，然而以现在的器件发展水平，系统增益起伏可做到 $\Delta G/G<10^{-4}$，增益起伏的干扰基本可忽略[9-10]。为满足立方体纳卫星平台的体积和功耗需求，选择全功率辐射计体制的辐射计，主要由天线子系统、接收机子系统、定标子系统和信号处理系统组成。按照 Cubesat 平台 400 km 轨道预估，天线的增益为 34 dB，3 dB 波束宽度为 3.58°，在 874 GHz 频段使用喇叭天线即可满足指标[11]，设计难度相对较小。信号处理子系统用于对辐射计下变频检波积分后的信号做模数（AD）采样处理，用于后续测试量温的反演并配合平台完成测试数据下传、测试控制、温度补偿、设备监控等功能，信号处理系统的功能在低频段辐射计上已经非常成熟。定标系统的作用是保证观测数据的精度，通常在辐射计内部使用黑体和冷空加以旋转机构进行冷空、可变温度源和热定标源的测量，后经算法反演。辐射计以上的 3 个子系统，在设计和制作上都有一定的经验，本文的侧重点是 874 GHz 全功率型辐射计接收机设计，其接收机原理图如图 2 所示。

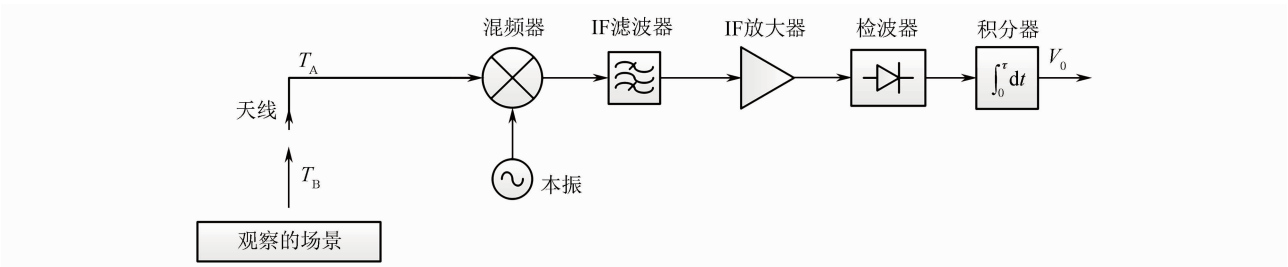


图 2 全功率辐射计接收机原理图

Fig.2 Schematic diagram of full-power radiometer receiver

接收机为工作在常温的超外差式辐射计，包括本振电路、混频器、中频（IF）放大滤波电路、检波器、积分器等。通常为降低接收机的噪声系数（NF），第 1 级为低噪声放大器，但在 874 GHz 频段，由于半导体工艺技术发展的限制，尚没有 874 GHz 低噪声放大器[12]，故链路第 1 级为太赫兹谐波混频器。太赫兹谐波混频器通常使用谐波混频实现，分为多次谐波混频和二次谐波混频两类，二次谐波混频器有变频损耗小的优点。由于谐波混频器的变频损耗决定接收机的噪声系数，为降低接收机噪声系数，应尽量选择二次谐波混频器。

1.3 指标分解

1）灵敏度。灵敏度是辐射计最重要的指标，两种误差会影响全功率辐射计的灵敏度，一种为测量亮温时系统噪声引起的误差，另一种为由系统增益变化 ΔG_S 引起的误差。

噪声起伏导致的误差是一个随机的过程，噪声功率变化为周期性变化。积分器同低通滤波器的作用类似，可平滑中频检波电压 V_0 中大于 $1/\tau$ 的频率分量波纹。剩余误差可表示为

$$\Delta T_N=\frac{T_A+T_R}{\sqrt{B\tau}} \tag{1}$$

式中：T_A 为天线口面噪声温度；T_R 为接收机噪声

温度；B 为接收机带宽；τ 为积分时间；ΔT_N 为系统噪声引起的误差。

第二种误差由系统增益的变化 ΔG_S 引起。分别由检波前的射频放大器、混频器和中频放大器引起。则因系统增益变化引起的误差可表示为

$$\Delta T_G = (T_A + T_R)\frac{\Delta G_S}{G_S} \tag{2}$$

式中：ΔG_S 为系统增益波动；G_S 为系统增益。

辐射计总误差即系统灵敏度 ΔT_{min}，两种误差影响相互独立，则辐射计总误差可表示为

$$\Delta T_{min} = [(\Delta T_N)^2 + (\Delta T_G)^2]^{\frac{1}{2}} = (T_A + T_R)\sqrt{\frac{1}{B\tau} + \left(\frac{\Delta G_S}{G_S}\right)^2} \tag{3}$$

本设计中 874 GHz 冰云探测仪系统带宽为24 GHz，$\Delta G/G < 10^{-4}$，故式(3)中第 2 项对灵敏度的影响较小，提升系统灵敏度，关键是降低接收机自身噪声温度，即接收机的噪声系数。设积分时间为 1 s，为满足接收机 1.5 K 的灵敏度，可得接收机噪声系数应小于 51.6，即小于 17.1 dB。

2）检测线性度。指标主要与检波器的线性度有关，根据现有半导体厂商的检波器指标，线性度可达 0.99。

3）链路增益分配及稳定性考虑。检波器在线性范围的输入功率至少为－50 dBm，接收链路增益应大于 40 dB，前端混频器变频损耗为 15 dB，考虑实际应用中应留有余量，中频放大器的增益应为 60 dB以上。

经以上分析，接收机具体技术指标如表 2 所示。

表 2　874 GHz 接收机接收模块指标

Tab.2　Receiving module indexes in 874 GHz receiver

参数	值
工作频率(中心频点)/GHz	874.38
带宽/GHz	24
中频频率/GHz	6～12
增益/dB	≥40
中频放大器增益/dB	≥60
噪声系数/dB	≤15
频率稳定度	20×10^{-6}
输入驻波	≤1.5

2　仿真及结果分析

2.1　本振链路的设计

放大器的增益及输出功率参考 Analog Device 等半导体厂商在相应波段的芯片指标和参数，倍频链路参考 VDI 公司的太赫兹倍频器指标，借鉴国外 874 GHz 冰云探测仪链路的设计经验。

本振链路的设计要点如下：

1）尽量简化链路结构和倍频链路输入源。874 GHz本振模块由 24.278 GHz 的谐振器通过倍频滤波电路实现混频器所需频率和功率。由锁相环产生的 24.278 GHz 信号通常需使用更低频率的基波信号倍频产生或将 24.278 GHz 信号分频进入鉴相器鉴相。倍频或分频产生的谐波分量需增加滤波器使用量滤除，而低频滤波器尺寸较大，会占用 Cubesat 平台较多的空间，且基波频率为 12.139 GHz，靠近中频频率，靠滤波器抑制很难滤除，容易干扰中频接收。由于 DRO 具有相位噪声低、谐波数量少、无需数字 SPI 总线控制的优点，能减少功耗和接收机体积，因此本设计采用 DRO 输出24.278 GHz的基波信号作为倍频链路的输入。

2）因为 Cubesat 平台上提供的直流电源种类有限且能提供的最大功率也有限，选型时应尽量减少直流电源使用种类，并注重减少器件功耗，如尽量选取高效放大器。

3）倍频链路的选择要结合相应频段的倍频效率和其倍频输入所能达到的最大功率，通常 3 倍频的效率比 2 倍频低，但 2 倍频器的输入频率高，在 2 倍频器输入太赫兹波段较难达到需求的输入功率。

4）宽带器件为达到目标带宽，输出功率受限，效率变低，且有可能放大本振的其他谐波信号，会干扰测试，因此在选型时尽量选择窄带器件。

综上所述，在 ADS 中建立本振链路，如图 3 所示。链路选择 18 倍频方案，DRO 产生的 24.278 GHz信号经预留增益调试衰减器后进入滤波器，滤除 DRO 模块内产生的各次谐波，再经过隔离器改善驻波后，信号进入 3 倍频器，频率达 72.834 GHz的信号经功放放大到 100 mW 左右[13]后进入最后的 6 倍频链路，由于太赫兹高频段的 3 倍频的效率低于 2 倍频，但输入频率低易达到较大的输入功率，最后选择了先 2 后 3 的方案，链路设计完成后仿真链路谐波平衡参数，仿真结果如图 4 所示。

谐振器输出功率为 10 dBm 的 24.278 GHz 信号，经滤波抑制谐波后，再经过 3 倍频器得到频率为 72.834 GHz 的信号 VOUT1，3 倍频器输出－1.8 dBm功率的信号 VOUT2，如图 4(b)所示。

放大信号后，得到信号 VOUT3，如图 4(c)所示，最后进入 6 倍频器，其中 2 倍频的效率为 35%，3 倍频效率为 8%，总效率为 2.8%，最后输出功率为 2.2 dBm，如图 4(d)所示。本振源的输出功率达到二次谐波混频器的本振驱动功率要求，且链路前端留有用于增益补偿的衰减网络，可用于增益调整。

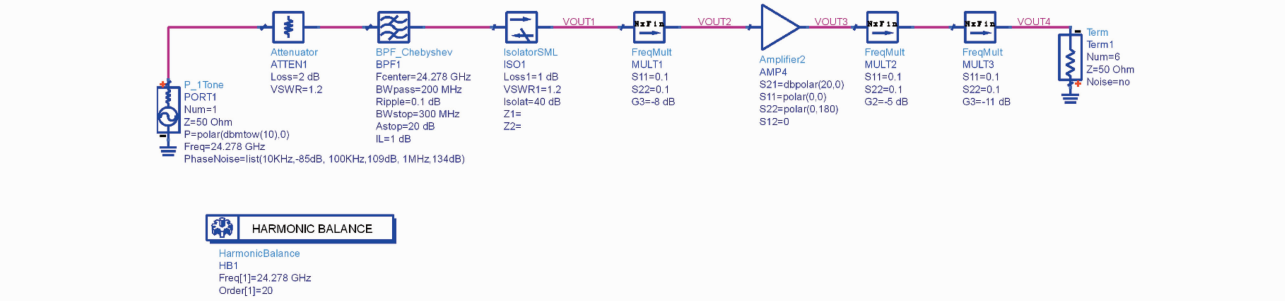


图 3　874 GHz 本振模块链路图

Fig.3　Schematic diagram of LO module link for 874 GHz

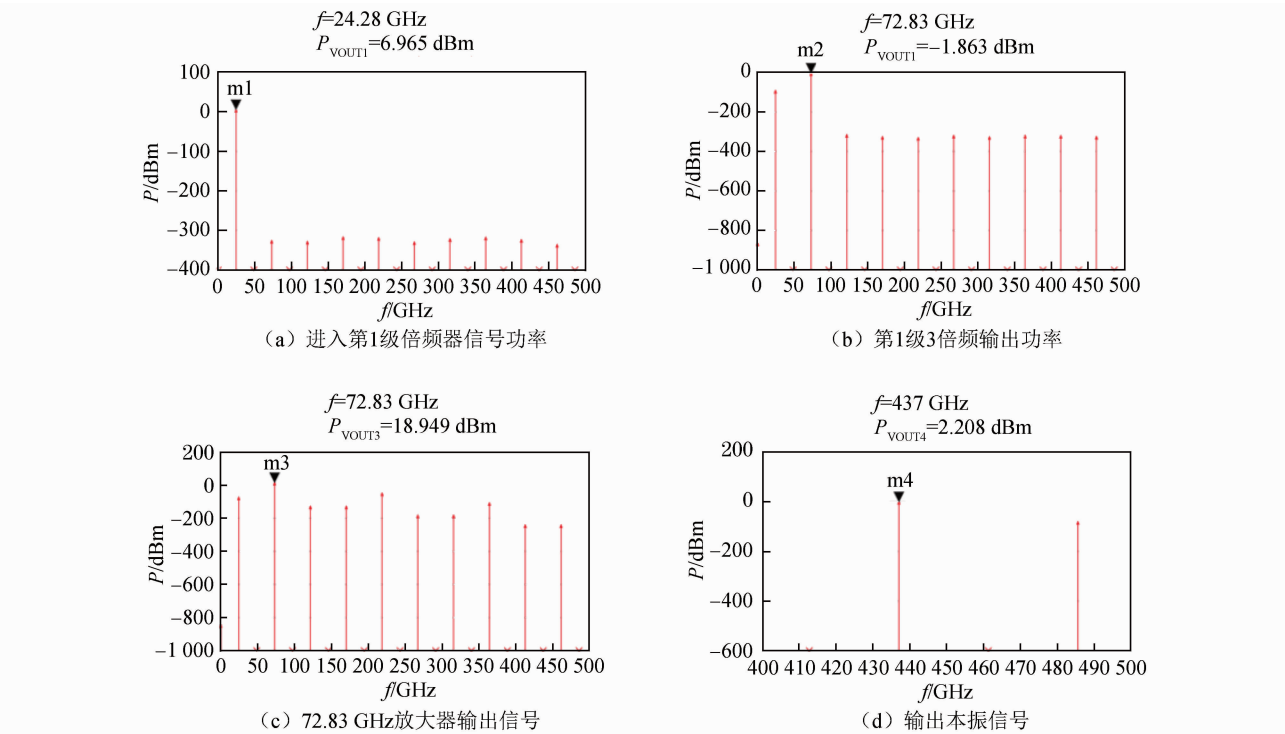


图 4　本振模块链路谐波平衡仿真结果

Fig.4　Results of LO module link harmonic balance simulation

本振链路具体设计采用型号如表 3 所示。

2.2　接收变频链路设计

混频器选用双边带混频器改善接收机的噪声系数。若混频器在双边带性质基本一致，则双边带混频器相对于单边带混频器噪声系数改善 3 dB。图 5 给出了 874 GHz 接收的 ADS 链路仿真模型，混频器的指标参考了 VDI Subharmonic Mixer 相应产品[14]，中频放大器以及检波器参考了 Analog Device HMC-ALH444-Die[15]低噪声放大器和 Macom MA40215-120[16]检波器芯片等相关产品指标，此处放大器选用裸芯片的原因是塑封芯片不满足苛刻的工作环境的要求，且使用裸芯片可缩小模块尺寸，达到控制接收机体积的目的。

表 3　本振模块链路具体使用器件

Tab.3　Specific chips used in LO module link

名称	供电电压/电流	用途	型号
DRO	+5 V，55 mA	源	LO-245-EC
E 波段放大器	+5 V，450 mA 15 V，偏置	72.834 GHz 信号放大器	HMC7543
3 倍频器	无源	24.278 GHz 信号 3 倍频	WR13×3
6 倍频器 （先 2 后 3）	无源	6 倍频器输出 437 GHz 信号	WR1×6

天线接收信号直接进入次谐波混频器与本振混频得到 6～12 GHz 中频信号，变频后的中频信号经低噪声放大器放大，通过滤波器后再次放大，并通过衰减器得到输出信号后进入检波器，再经积分处理，将输出信号传给信号处理子系统处理和反演。

中频增益太大易导致链路不稳定和中频放大器增益平坦度恶化，故在设计链路时在放大器级间加入 3 dB 衰减器，以增强链路稳定性并预留调试余量，加入 6 dB 衰减器是为幅度均衡器预留位置，方便实际设计中优化平坦度。

输入信号功率设为 −60 dBm 时，分析链路 BUDGET，仿真结果如图 6 所示。

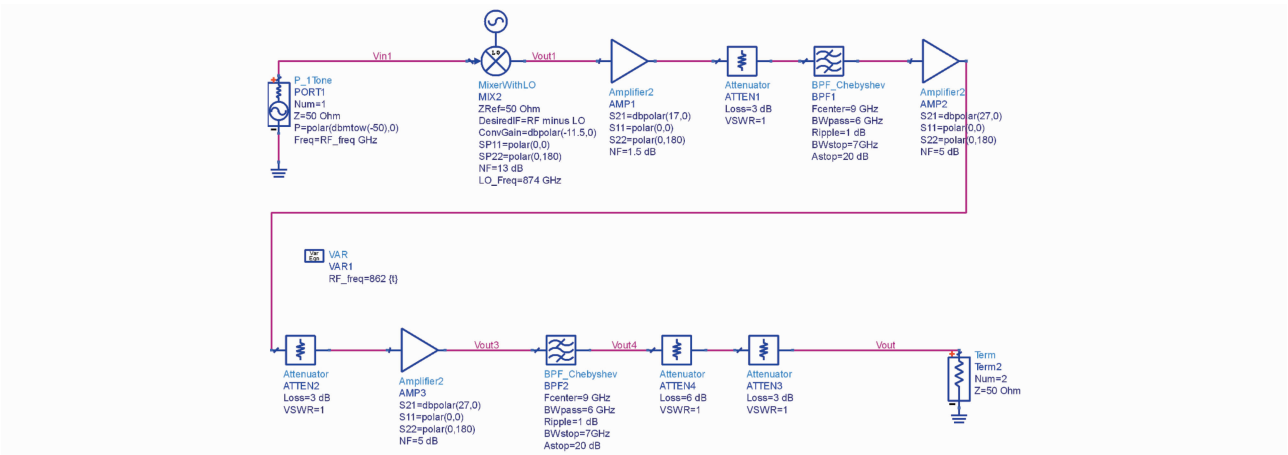
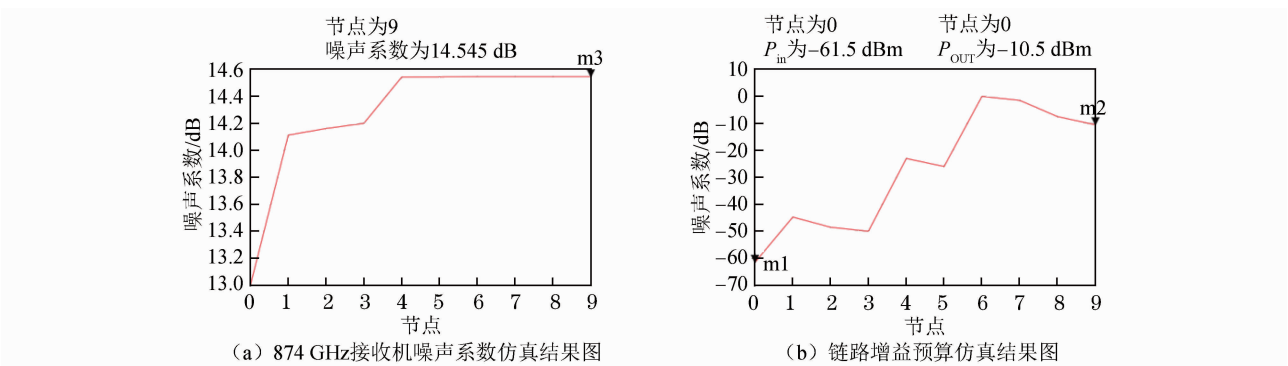


图 5　874 GHz 接收链路图

Fig.5　Schematic diagram of 874 GHz receiver link



（a）874 GHz接收机噪声系数仿真结果图　　（b）链路增益预算仿真结果图

图 6　接收链路仿真结果图

Fig.6　Results of receiver link simulation

通过仿真结果可见，最终结果得到了14.545 dB 的链路噪声系数（等效噪声温度为 3 915 K），50 dB 的链路增益；输出信号功率为 −10.5 dBm，能进入检波器的线性检波范围，仿真数值符合指标要求。接收变频链路具体设计采用型号如表 4 所示。

3　结束语

本文介绍了冰云对于大气探测的重要作用，分析了太赫兹频段冰云探测的优势和意义。Cubesat 平台具有体积小、功耗低、成本低、研发周期短等优

表 4 接收链路具体使用器件

Tab.4 Specific chips used in receiver link

名称	供电电压/电流	用途	型号
低噪声放大器	+5 V,55 mA	中频低噪声放大器	HMC-LH444
Ku 增益模块	+5 V,270 mA	中频信号放大器	ZX60-183A+
谐波混频器	无源	双边带混频	WR1.2SHM

点,但对载荷的体积功耗有严格限制。本设计使用全功率型冰云探测仪以适应平台,依据现有研究情况,确定了 874 GHz 冰云探测仪的指标和其射频链路部分的具体工作参数。针对应用需求及平台的供电和体积限制,接收机链路设计在保证指标的前提下尽量少用器件,减少电源种类,使其适应 Cubesat 平台。在完成链路器件选型后利用 ADS 仿真软件,验证分析 874 GHz 频段接收机的链路设计。从仿真结果可见:在仅使用+5,−15 V 两组直流电源的情况下完成了器件指标选型和链路设计,设计指标能满足目标性能参数,可作为冰云 874 GHz 冰云探测仪的接收机链路使用。而通常在实际情况下,半导体厂商生产的半导体器件或者模块的参数与指标标称参数有一定差异,如放大器增益、驻波、饱和输出功率等都会有一定偏差。设计链路时考虑到这种情况,在链路仿真时留出一定的链路增益预算用于实际调试,在驻波性能较差的功率放大器前加入隔离器来增强匹配,同时在链路中也预留了幅度均衡器为调整中频带宽的增益平坦度。本文设计虽然以仿真为主,但在链路分析和选型设计时借鉴了大量射频工程经验,具有一定的工程意义,为后期 874 GHz冰云探测仪的工程化作铺垫。

Cubesat 平台能提供给载荷的空间十分有限,故在较小空间内摆放所有器件并防止信号串扰,是以后工作的重点。同时需根据实际测试情况不断调整链路参数。

参考文献

[1] 孙楠. 利用冰云能给地球降温吗[N]. 河北日报, 2015-08-10(5).

[2] BRYERTONE W, HESLER J L, RETZLOFF S A, et al. 874-GHz heterodyne CubeSat receiver for cloud ice measurements-flight model data[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 5553-5555.

[3] 邓军英, 丁明月, 王文彩, 等. 冰云粒子微物理属性在一次强降雨过程中的垂直分布[J]. 干旱区地理, 2016, 39(3): 590-599.

[4] 史兰红. 超强登陆台风"桑美"冰云微物理属性垂直分布特征研究[C]// 中国气象学会. 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S13 热带海洋气象, 2013: 11.

[5] 何杰颖, 张升伟. 亚毫米波冰云成像仪通道选择[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(2): 180-185.

[6] 李军予, 伍保峰, 张晓敏. 立方体纳卫星的发展及其启示[J]. 航天器工程, 2012, 21(3): 80-87.

[7] ZHANG Z, MONOSMITH B. Dual-643 GHz and 874 GHz airborne radiometers for ice cloud measurements[C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Massachusetts, USA, 2008: 1172-1175.

[8] 倪伟. 我国新一代静止轨道气象卫星风云四号发射成功[J]. 太空探索, 2017(1): 5.

[9] 冯凯. 全极化微波辐射计系统设计与测温精度分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

[10] 曾文辉. W 波段测量辐射计接收机设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[11] WUD L, ESPER J, EHSAN N, et al. Icecube: spaceflight validation of an 874 GHz submillimeter wave radiometer for ice cloud remote sensing[C]// American Geophysical Union, Fall Meeting, 2014: A22F-02.

[12] 周扬帆. 高性能太赫兹无源器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[13] Analog Devices. 71 GHz to 76 GHz, E-band power amplifier with power detector: HMC7543[EB/OL]. (2016-11-23)[2017-02-23].http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC7543.pdf.

[14] VDI. Frequency Multipliers (WR and D Series)[EB/OL]. (2014-04-02)[2017-12-22]. http://vadiodes.com/en/frequency-multipliers.

[15] Analog Devices. GaAs HEMT MMIC LOW NOISE AMPLIFIER, 1-12 GHz: HMC-ALH444[EB/OL]. (2012-08-06)[2017-04-04].http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc-alh444.pdf.

[16] Macom. Schottky detector diodes: MA40215-120[EB/OL].(2008-06-02)[2013-08-10].https://cdn.macom.com/datasheets/Schottky_%20Detector_%20Diodes.pdf.