

光学学报

可见至太赫兹一体化云探测光学系统设计

江海威^{1,2,3}, 钮新华^{1,3*}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 针对全球能量循环及水文循环研究需求,提出了一种适用于可见至太赫兹超宽谱段多通道云探测光谱成像仪的光学系统设计方案。系统以推扫方式成像,获取可见至太赫兹谱段内共 10 个通道的光谱信息。对应 450 km 轨道的刈幅为 100 km,可见、红外、太赫兹星下点分辨率分别为 75 m、100 m、10 km。光学系统采用离轴折反混合结构。太赫兹部分口径为 150 mm, F 数为 3;可见、红外口径分别为 42 mm 和 68 mm, F 数均为 2。通过视场分光实现太赫兹与其他通道的波段分离。在可见、红外后光路单独设置孔径光阑以解决其与太赫兹孔径相差较大带来的问题。设计结果表明:各像面点列图均方根直径小于像元大小,调制传递函数在奈奎斯特空间频率下均接近衍射极限,成像质量良好。经容差分析可得,光学系统可满足原理样机验证成像需求。

关键词 测量; 光谱成像; 云探测; 太赫兹; 红外

中图分类号 TN202

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221433

1 引言

云覆盖超过 60% 的地球表面是地球辐射收支的重要影响因素^[1]。然而,云的时空分布、内部形态都具有复杂多变的特性,对其进行量化极其复杂。云的形成、云辐射之间的相互作用以及云参数的不确定性都给全球气候模型的准确性带来了很大的挑战。

冰晶、云滴等与电磁辐射的相互作用在很大程度上取决于粒径与波长的比值,当二者量级相当时散射作用最强^[2]。因此,不同探测波长最敏感的冰晶粒子大小也有很大的区别。

可见红外光学被动遥感仪器主要通过探测云自身辐射或反射太阳光的能量来实现冰云参数的探测。由于冰云粒子尺度范围较大,而该类仪器的探测波长较短,对小冰云粒子或者薄卷云敏感,对尺度范围较大的大粒子冰云的探测显然能力不足。

太赫兹 (THz) 波长与大多数冰云粒子尺寸 (20~600 μm) 相当,对 20~600 μm 范围的云粒子敏感性最高,可弥补目前研究对较大粒子冰云探测的不足。太赫兹被动冰云探测通过测量低层大气向上辐射的太赫兹波实现。低层大气会向上辐射太赫兹波,在太赫兹波上传播的过程中,如果存在冰云,冰云的散射会

使得辐射计接收到的亮温相比晴空有所降低,降低程度与冰云冰水路径等参数有关^[3],据此就可以反演出冰云的参数。由于水对太赫兹散射作用弱并且吸收作用强,太赫兹波对水云以及混合相云的探测敏感性不足^[4]。

目前可见红外云探测方式和太赫兹冰云探测方式均通过单独载荷实现。可见红外云探测方式发展较早,技术较为成熟,典型载荷有中分辨率成像光谱仪 (MODIS)、甚高分辨率辐射计 (AVHRR)、中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 等^[5]。太赫兹冰云探测发展较晚,但各国一直在积极开展机载、星载实验,以及相应的反演理论等相关研究^[6-7]。美国国家航空航天局 2017 年发射了冰立方 (IceCube) 实验小卫星,以实现星载冰云探测实验^[8]。欧洲航天局经过多年的机载实验,也将在下一代极轨气象卫星搭载冰云成像仪 (ICI),实现全球太赫兹波段冰云探测^[9]。

针对现有测云卫星云粒子探测尺度范围覆盖不足的问题,本文提出了一种适用于可见、红外与太赫兹组合一体化探测的光学系统设计方案,能实现更加全面的云信息探测,并且一体化观测也能为可见、红外以及太赫兹波段云信息的同步反演提供更加充分便捷的观测数据。

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-08-05; 录用日期: 2022-08-22; 网络首发日期: 2022-09-02

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新专项 (CX-324)

通信作者: *nxh@mail.sitp.ac.cn

2 探测通道设置及光学参数分析

2.1 通道设置

云探测的最终目的是实现云参数的量化,为其反演提供观测数据。云参数主要包括云有效粒子半径、

光学厚度、云(冰)水路径、云顶温度等^[10]。通过不同观测波段的组合,可实现云参数的有效反演。结合云探测要素的反演需求,对成像仪的通道进行设置,结果如表 1 所示。

表 1 通道设置
Table 1 Channel set

Band	Central wavelength / μm	Resolution / m	Utilization
1	0.470	75	True color (blue)
2	0.550	75	True color (green)
3	0.650	75	True color (red), optical thickness
4	0.865	75	Optical thickness
5	1.600	100	Optical thickness, effective particle radius
6	2.100	100	Effective particle radius
7	8.000	100	Cloud phase
8	11.000	100	Cloud phase, cloud top temperature, effective particle radius
9	12.000	100	Cloud phase, cloud top temperature, effective particle radius
10	343.250 (874 GHz)	10000	Ice water path

可见近红外(VNIR)、短波红外(SWIR)波主要用于云光学厚度、有效粒子半径等信息的探测^[11],其主要原理是云在可见波段的反射函数主要是光学厚度的函数,而在短波红外波段则是有效粒子半径的函数,通过 0.650 μm 、0.865 μm 通道分别与 1.600 μm 、2.100 μm 通道组合实现云光学厚度和有效粒子半径的反演;增加蓝绿通道,通过与红色通道组合,实现真彩色合成观测。8 μm 、11 μm 、12 μm 热红外(TIR)通道主要用于云相态以及云顶温度的探测^[12]。

对于太赫兹探测通道的选择,由于大气不透明度等的影响,可选择的频率范围主要集中在 0.1~1.0 THz 之间。在低频通道,亮温衰减较小,敏感性较低;而在高频通道,冰云对太赫兹波有着强烈的衰减,在 900 GHz 附近衰减最为严重,对冰云具有很高的敏感性^[13]。874 GHz 附近的太赫兹波对冰云的敏感性较高,可作为太赫兹波段冰云探测的备选通道,10 km 的地面分辨率也能够满足当前太赫兹波段的冰云探测及反演需求^[3,14]。

2.2 光学参数分析

卫星轨道为 450 km 的太阳同步轨道,地面幅宽为 100 km,则穿轨方向视场角 2ω 为

$$2\omega = 2\arctan \frac{W}{2H}, \quad (1)$$

式中: W 为地面幅宽; H 为轨道高度。视场角计算结果为 12.68°,取一定余量,定为 13.00°。

太赫兹波段地面分辨率拟定为 10 km,可见波段地面分辨率拟定为 75 m,红外波段地面分辨率拟定为 100 m,角分辨率 θ 可表示为

$$\theta = 2\arctan \frac{G_{SD}}{2H}, \quad (2)$$

式中: G_{SD} 为地面分辨率。根据式(2)计算得到对应的角分辨率 θ 分别为 22 mrad、0.17 mrad、0.22 mrad。

根据波段分布及探测器性能,将系统划分为 4 个焦面,分别为可见近红外、短波红外、热红外以及太赫兹。

太赫兹波段探测器选用中国科学院上海技术物理研究所自研的太赫兹光学探测器,可实现高灵敏度、高频率太赫兹冰云探测。系统口径通过信噪比估算得出,太赫兹子系统的信噪比为

$$R_{THz} = \frac{P_{THz}}{D_{NEP} \sqrt{\Delta f}}, \quad (3)$$

式中: R_{THz} 为太赫兹子系统的信噪比; Δf 为等效噪声带宽; D_{NEP} 为探测器等效噪声功率; P_{THz} 为探测器接收到的功率, P_{THz} 可表示为

$$P_{THz} = \tau_a \tau_o L \Omega D_e, \quad (4)$$

式中: τ_o 为光学系统效率; τ_a 为大气透过率; L 为带宽范围内光谱辐亮度; Ω 为瞬时视场立体角; D_e 为系统入瞳面积。对于 L ,由普朗克定律计算得出

$$L = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp[ch/(\lambda kT)] - 1} d\lambda, \quad (5)$$

式中: λ 为探测波长; λ_1 和 λ_2 分别为探测波长上、下限,可由探测频率换算得到; h 为普朗克常量; k 为玻尔兹曼常数; c 为光速; T 为观测目标温度,以 150 K 作为最低计算温度。当温度给定后,结合探测带宽即可求出到达系统的光谱辐亮度。

Δf 由系统积分时间决定,最长积分时间可由卫星星下点速度和地面分辨率共同决定,可表示为

$$\Delta f = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{v}{G_{SD}}, \quad (6)$$

式中： v 为卫星下点速度，在 450 km 轨道，其值为 7.089×10^3 m/s；地面分辨率 G_{SD} 在太赫兹波段为 10 km。

当所有参数给定后，系统信噪比仅与口径有关，据此可对系统信噪比进行初步估算并确定合适的系统口径，最终系统口径定为 150 mm。

相比于太赫兹波段，可见与红外波段的能量要高很多，因此，对口径的要求自然也会低很多。可将可见、红外子系统的孔径光阑设在各自后光路上，子系统孔径大小根据实际探测需求设置，这样可大大减小整个系统的光路尺寸。对于系统的焦距 f' ，则需要根据轨道高度 H 、探测器尺寸 D_d 以及地面分辨率 G_{SD} 求出：

$$f' = \frac{HD_d}{G_{SD}} \quad (7)$$

可见通道探测器尺寸选定为 14 μm ，红外通道探测器尺寸选定为 30 μm ，结合式(7)，可计算出可见通道的焦距为 84 mm，两红外通道的焦距为 135 mm。

对于可见红外信噪比估算，计算思路大体与太赫兹通道相似。可见，近红外和短波红外系统的信噪比可分别表示为

$$R_{VNIR} = \frac{I_s}{I_n} = \frac{P_{VNIR}\eta}{\sqrt{2q(I_s + I_d)\Delta f}} \quad (8)$$

表 2 系统设计指标

Table 2 Design parameters of system

Parameter	THz	VNIR	SWIR	TIR
F number	3	2	2	2
Wavelength / μm	324.680-364.080 [(874 \pm 50) GHz]	0.470-0.865	1.600-2.100	8.000-12.000
Input aperture / mm	150	42	68	68
IFOV (instantaneous field of view) / mrad	22.00	0.17	0.22	0.22

3 光学方案设计

对于总体方案，整个系统焦面较多，采用主光学系统与后光路组合的方式来实现宽谱段多焦面探测。主光学系统收集所有波段的光谱信息，之后经各自后光路实现各谱段信息的探测成像。

系统探测波谱范围广，透射式光学系统显然不能满足该要求，因此主光学系统采用全反射式结构。同轴两反和同轴三反系统无色差，满足宽波谱范围的探测需求，但视场一般较小，且存在一定的中心遮拦，同样无法满足系统的探测需求。离轴三反式结构在同轴三反的基础上经离轴实现，无中心遮拦，光学效率高，能最大限度地减小太赫兹波段的能量损失，相比于同轴系统，离轴三反结构能实现更大的视场，满足主光学系统的任务需求^[16]。

常见的离轴三反式系统可分为有中间像面和无中

$$R_{SWIR} = \frac{D^* P_{SWIR}}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad (9)$$

式中： R_{VNIR} 和 R_{SWIR} 分别为可见近红外以及短波红外信噪比； I_s 和 I_n 分别为信号电流和噪声电流； q 为电子电荷； I_d 为暗电流； η 为探测器的响应率； D^* 为探测器的比探测率； A_d 为探测器的像元面积； P_{VNIR} 和 P_{SWIR} 分别为可见近红外和短波红外接收到的功率，其计算公式与太赫兹波段相同，其到达系统的光谱辐亮度数值通过大气辐射传输计算软件 modtran 模拟计算获得。

热红外子系统的噪声等效温差的计算公式为

$$D_{NETD} = \frac{4\sqrt{A_d \Delta f}}{D_e^2 D^* \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{\partial L_\lambda(T)}{\partial T} d\lambda \Omega \tau_a \tau_0} \quad (10)$$

式中： D_{NETD} 为系统噪声等效温差； $\frac{\partial L_\lambda(T)}{\partial T}$ 为黑体微分辐亮度， T 值取 300 K^[15]， $L_\lambda(T)$ 为黑体辐亮度。

对于系统口径，根据信噪比计算公式[式(8)~(10)]，结合探测器性能，将可见系统口径定为 42 mm，红外系统口径定为 68 mm。在选定口径下，计算得出的太赫兹子系统的最低信噪比优于 100，可见近红外和短波红外各通道的最低信噪比优于 300，热红外各通道噪声等效温差优于 0.1。光学系统的主要设计指标如表 2 所示。

间像面两种^[17]。有中间像面的离轴三反系统可在中间像面加视场光阑，杂散光抑制能力强，但视场较小，难以满足系统 13° 的探测需求。无中间像面的离轴三反系统虽然杂散光抑制能力较弱，但其视场可以很大，能满足系统的视场探测需求。因此，主光学系统采用无中间像面离轴三反系统。

系统探测波段范围从可见延伸至太赫兹，波段跨度大，对各谱段的分离也提出了较高的要求，尤其是将太赫兹与可见红外的分离。较为普遍的方式是采用分色片实现多谱段的分离，但是，各通道经过分色片的反射或透射后都会有不同程度的损失，太赫兹波段能量较弱，应尽量减少其能量的损耗。而视场分光是通过视场偏移来实现不同谱段的分离，偏视场的分光方式会使得体积的占用稍有增大，但没有使用分色片能减少各通道能量的损失，因此，可考虑使用视场分光与分色片组合实现。通过视场分光将可见红外与波长相差

较远的太赫兹分离,之后再传统分色片实现分光。太赫兹整个光路均采用反射结构,可以最大限度减少能量的损失。

对可见近红外、短波红外和热红外采用二次成像。太赫兹口径较大,若同样采用二次成像会进一步增大整体的体积和重量。因此,综合考虑体积和重量的限制,太赫兹波段经望远镜系统直接成像,其焦面即为离轴三反望远镜系统像面。

整个光学系统主要分为两部分:前置望远镜系统和可见近红外、短波红外以及热红外后光路系统。前置望远镜系统采用离轴反射式结构,望远系统主要对太赫兹波段进行成像,可见、红外部分对望远镜系统进行二次成像。

系统焦平面较多,波段范围大,并且体积有限,需要在有限的空间实现多波段探测成像,具有一定的难

度。因此,在设计优化时,除了保证成像质量外,还需考虑各光路的排布,并且尽量压缩各子系统体积以满足整个系统的尺寸要求。

4 光学系统设计

4.1 离轴三反主光学系统设计

离轴三反系统可在同轴三反的基础上经过离轴得到,因此离轴三反初始结构与同轴三反相同,其结构如图 1 所示^[18-19]。同轴三反的结构参数为:三个反射镜的半径(R_1, R_2, R_3);主镜(PM)与次镜(SM)的距离(d_1)以及 SM 与三镜(TM)的距离(d_2);三个反射镜的非球面系数($-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$);SM 对 PM 的遮拦比 α_1 , TM 对 SM 的遮拦比 α_2 ; SM 的放大率 β_1 , TM 的放大率 β_2 。

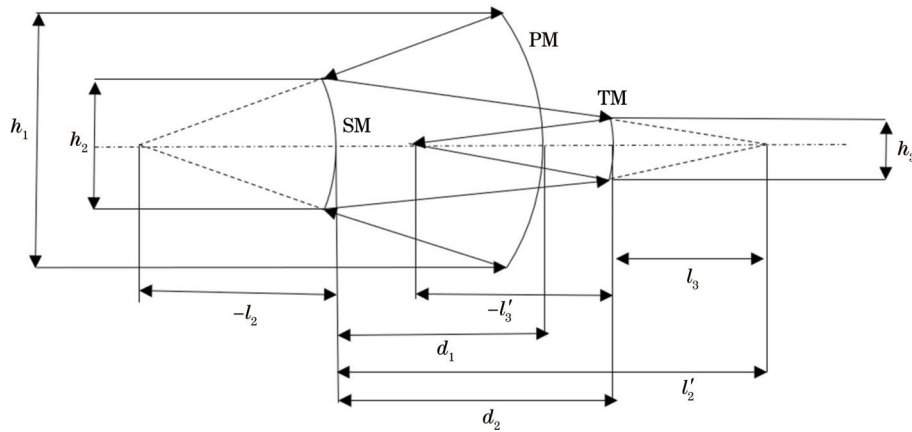


图 1 同轴三反初始结构

Fig. 1 Initial structure of coaxial three-mirror system

当焦距 f' 确定后,设置适当的遮拦比和放大率,各反射面的曲率半径为

$$R_1 = \frac{2f'}{\beta_1\beta_2}, \quad (11)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1 f'}{(1 + \beta_1)\beta_2}, \quad (12)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2 f'}{1 + \beta_2}. \quad (13)$$

反射镜间的距离为

$$d_1 = \frac{(1 - \alpha_1)f'}{\beta_1\beta_2}, \quad (14)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)f'}{\beta_2}. \quad (15)$$

结合初级相差公式,并且令球差 S_I 、慧差 S_{II} 、像散 S_{III} 、场曲 S_{IV} 均为 0,求出三个面的非球面系数,即可完成整个初始结构参数的求解,具体求解过程可参考文献[20]。

离轴三反结构的跨轨视场设为 13.0° ,可见红外波

段沿轨视场为 0.5° ,太赫兹波段沿轨视场为 1.3° ,并增加视场分光间隔,沿轨总视场为 4.3° 。由于太赫兹波段对像质的要求相对于可见红外波段要低很多,在优化时,可适当放宽太赫兹波段的像质要求。受限于体积要求,需要对三反系统的尺寸进行限制:控制主镜与次镜、次镜与三镜的间距;对系统纵向尺寸即主镜和三镜的垂直距离进行限制;对系统的总长也进行进一步限制,使结构尽量紧凑,为后续光路留出空间,以满足尺寸要求;同时尽可能加大后截距,为太赫兹焦面留出足够的距离。

最终优化结果如图 2(a)所示,主镜和三镜为偶次非球面,次镜为椭球面且为孔径光阑,各镜间距离都控制在一定范围之内,结构较为紧凑。可见红外视场点列图如图 2(b)所示,弥散斑最大均方根半径小于 $2 \mu\text{m}$;太赫兹视场像质如图 2(c)所示,虽然稍差于可见红外视场,但仍远小于所需探测器尺寸,满足成像质量要求。

4.2 可见红外后光路光学设计

经视场分光后,可见红外子系统后光路对前置望

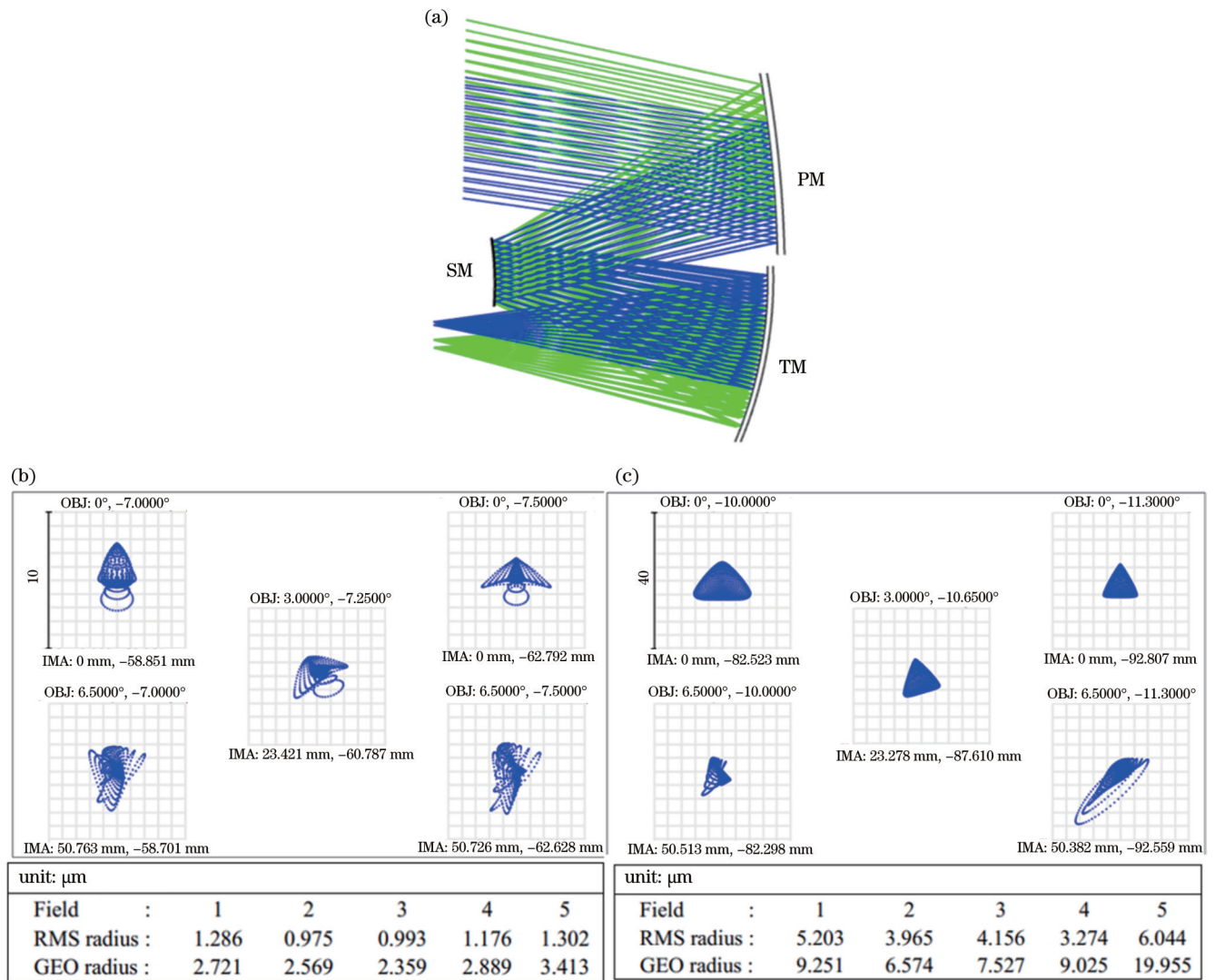


图 2 离轴三反系统的设计结果。(a)离轴三反系统光路图;(b)可见红外点列图;(c)太赫兹点列图

Fig. 2 Design results of off-axis three-mirror system. (a) Optical layout of off-axis three-mirror system; (b) visible and infrared spot diagrams; (c) THz spot diagram

远镜系统的像进行二次成像,后光路一共有三个焦平面。采用分色片实现不同波段的光谱分离。

4.2.1 可见近红外子光路

由于可见近红外系统口径较小,可见近红外子系统再次采用离轴三反结构,离轴三反结构较为紧凑,有利于后续光路的排布。可见近红外系统的焦距为 84 mm,望远镜系统的焦距为 450 mm,因此可求得可见近红外系统的放大率为 0.187。在优化时,利用 zemax 宏语言控制垂直方向光线间的距离,避免光路遮挡的同时减小系统体积的占用。可见近红外后光路与前置望远镜系统之间的距离较大,为镜片的安装留下足够空间。整个系统结构如图 3(a)所示,第一片面为分色片,用以反射可见近红外、透射短波红外和热红外,可见近红外后三镜与主三反次镜的距离较远,各反射镜垂直方向的距离也保持在较小范围,其调制传递函数(MTF)曲线如图 3(b)所示,可见近红外子系统的像元大小为 $14 \mu\text{m}$,该尺寸下奈奎斯特频率为

36 lp/mm,各视场 MTF 曲线均大于 0.9,接近衍射极限;其点列图如图 3(c)所示,各视场光斑尺寸均小于艾里斑大小,像质良好。

4.2.2 短波红外

短波红外系统不需要考虑冷光阑匹配等问题,因此其孔径光阑也不需要放在整个光路的后方。为压缩体积,短波红外光路要经过两次折叠,分别为分色片 2 的向下反射和一次折镜侧方折叠。因此,短波红外系统与第一分色片的距离也应适当加长。短波红外光路结构如图 4(a)所示,系统采用五片式结构,使用硅和宽波段硫化锌两种材料,透镜第二面和第六面为偶次非球面,第一片透镜与后透镜之间留有较大距离以放置折镜,后四片透镜紧凑排布,孔径光阑位置在第三、四片透镜之间。对应的 MTF 曲线和点列图分别如图 4(b)、(c)所示,在对应奈奎斯特频率下,各视场 MTF 曲线均大于 0.85,点列图尺寸均小于艾里斑大小,像质良好。

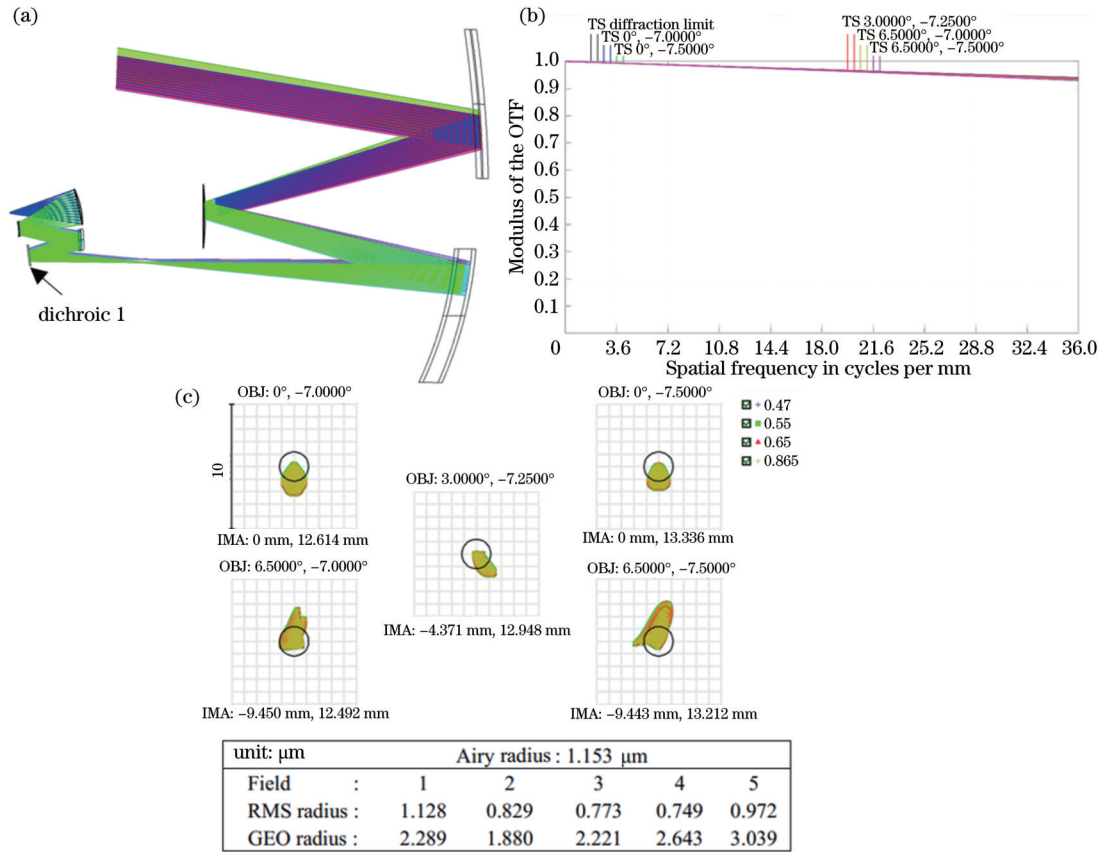


图 3 可见近红外设计结果。(a)光路图;(b)MTF 曲线;(c)点列图
Fig. 3 Design results of VNIR. (a) Optical layout; (b) MTF curves; (c) spot diagram

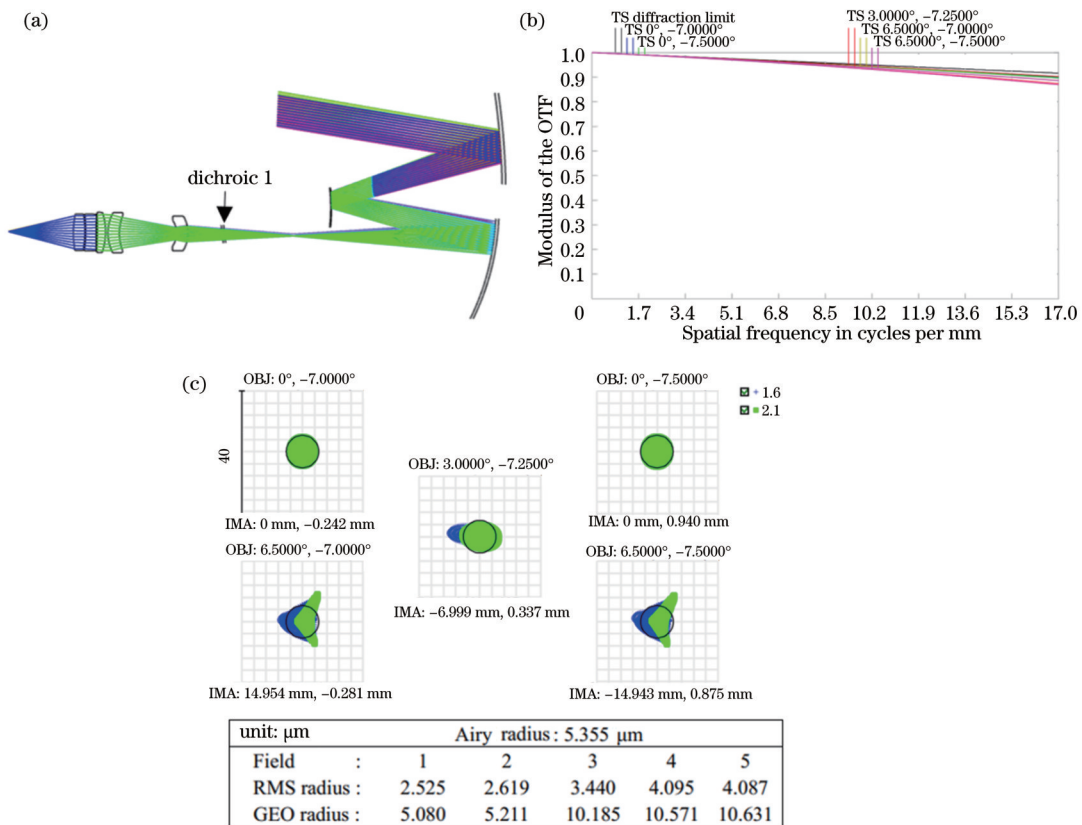


图 4 短波红外设计结果。(a)短波红外系统光路图;(b)MTF 曲线;(c)点列图
Fig. 4 Design results of SWIR. (a) Optical layout of SWIR system; (b) MTF curves; (c) spot diagram

4.2.3 热红外子光路

热红外因制冷需求,需考虑冷光阑匹配问题,因此孔径光阑设在整个光路后方。后透镜与第二分色片相隔较大距离,以便中间放置折镜,光线经两次分色片透射后进入热红外后光路。热红外光路结构如图 5(a)所示,

后光路采用锗和硒化锌两种材料共四片透镜,透镜第八面为椭球面。各透镜之间的距离压缩在较小范围内,使得结构尽可能紧凑。MTF 曲线如图 5(b)所示,在奈奎斯特频率下均优于 0.45;各视场点列图如图 5(c)所示,像点均小于艾里斑大小,满足成像质量要求。

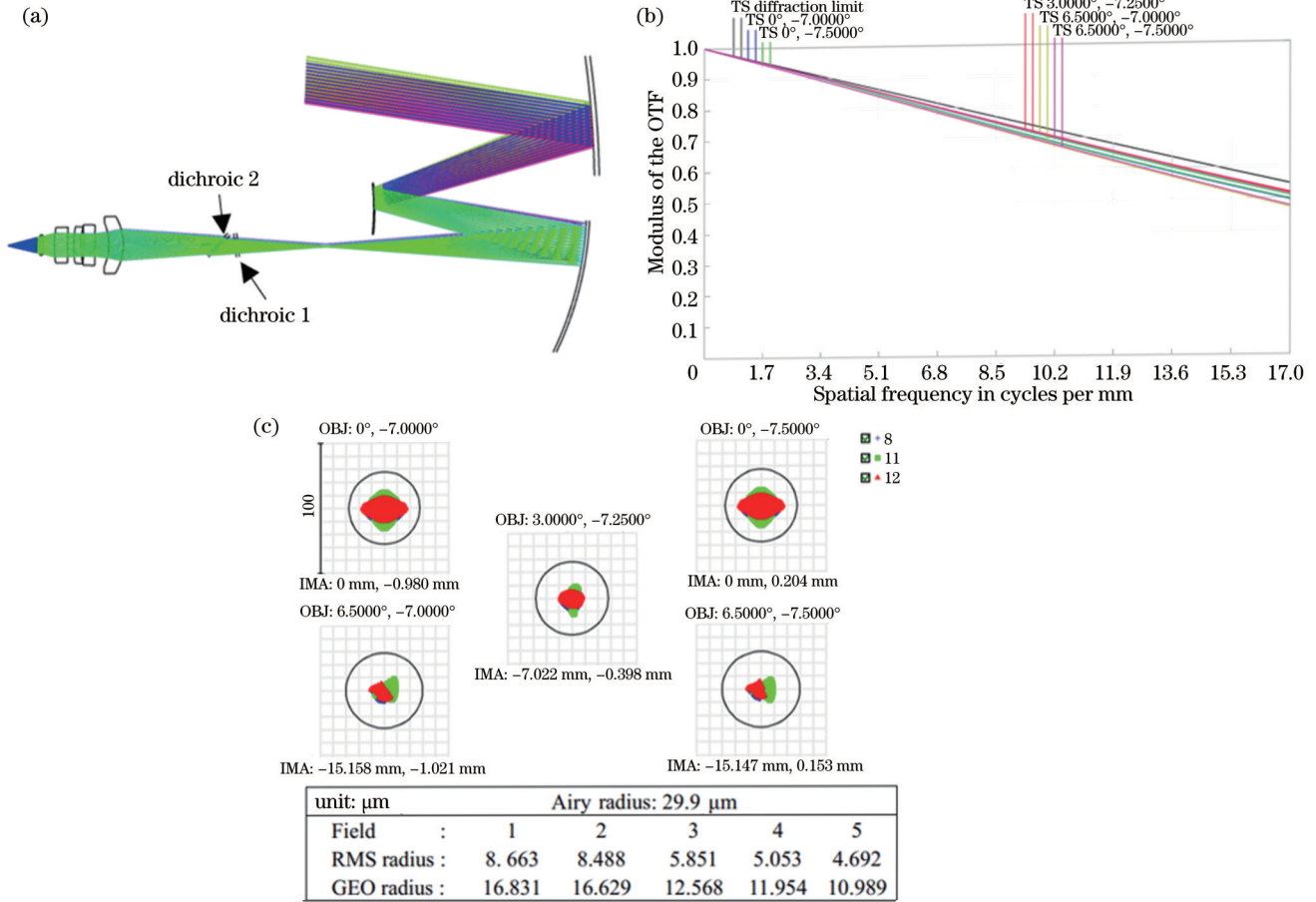


图 5 热红外设计结果。(a)热红外系统光路图;(b)MTF 曲线;(c)点列图

Fig. 5 Design results of TIR. (a) Optical layout of TIR system; (b) MTF curves; (c) spot diagram

4.3 一体化光学系统

将所有光学子系统进行拼接组合,如图 6 所示,将太赫兹波段向下折叠,可见波段向上反射,便于探测器的放置;同时短波红外经分色片 2 向下反射,再经折镜向侧方折叠;热红外也同样经过折镜向侧方折叠,完成整个系统的设计。整个系统的总长小于 800 mm,体积较为紧凑,可实现从可见到太赫兹宽波段的一体化探测。

5 公差分析

对于一个光学系统,实际加工装调等过程都会引入一定的误差,使得整体的成像性能相比理论值有所下降^[21]。因此,为保证系统在加工装调后像质仍满足要求,需对完成后的光学系统进行公差分析,以评估实际装调的可行性。

按照光路重合程度逐步对各子系统进行公差分

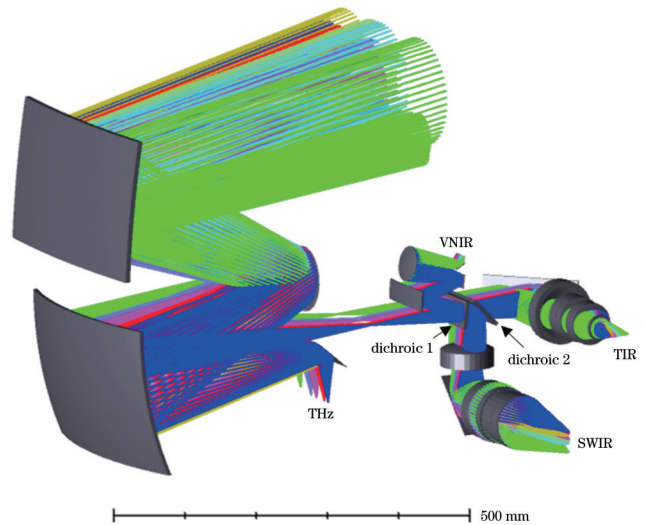


图 6 一体化光学系统总体示意图

Fig. 6 Overall diagram of integrated optical system

配,以实现各子系统公共光路部分相同的公差设置。首先对离轴三反系统公差进行分配:三反系统主要有曲率半径、圆锥系数以及面型精度三个加工公差;三面反射镜有在 x 、 y 方向的倾斜、偏心以及间距的装调公差。以 MTF 值为评价标准,对前置望远镜系统进行公差分析,公差分配结果如表 3 所示。

表 3 望远系统公差

Table 3 Tolerance of telescope system

Tolerance	PM	SM	TM
x/y decentered tolerance /mm	0.10	0.05	0.05
x/y tilt tolerance /(")	30	30	30
Radius tolerance /mm	0.2	0.2	0.2
Conical coefficient tolerance	0.0010	0.0010	0.0005
Surface tolerance ($\lambda=632.8$ nm)	$\lambda/25$	$\lambda/25$	$\lambda/25$

完成前置望远镜系统的装调后,保持离轴三反系统的公差分配不变,分别对可见近红外、短波红外和热红外后光路进行公差分配。可见近红外通道同样为离轴三反,因此其公差参数与前置望远镜相同,可见近红外系统的公差分配结果如表 4 所示。对于透射系统,除存在偏心、倾斜、间距以及面型精度公差外,还有透镜厚度等公差。短波红外和热红外子系统的公差分配结果如表 5 所示。公共三反系统参数不变,不再给出,只列出后光路子系统的公差分配结果。

表 4 可见近红外系统公差

Table 4 Tolerance of VNIR optical system

Tolerance	PM/ SM/ TM
x/y decentered tolerance /mm	0.05
x/y tilt tolerance /(")	30
Radius tolerance /mm	0.2
Conical coefficient tolerance	0.001
Surface tolerance ($\lambda=632.8$ nm)	$\lambda/25$

表 5 热红外、短波红外系统的公差

Table 5 Tolerance of TIR and SWIR systems

Tolerance	TIR	SWIR
x/y decentered tolerance /mm	0.02	0.02
x/y tilt tolerance /(")	36	36
Thickness /mm	0.10	0.02
Radius /fringe	3	3

以各通道在像面上的 MTF 值为评价参考,经蒙特卡罗计算模拟得到的统计结果如表 6 所示。公差分析结果表明,在上述公差分配下,各通道在奈奎斯特频率处的 MTF 下降均不超过 0.16,90% 的点列图弥散斑半径也均小于像元尺寸。系统公差较为宽松,分配合理,具有较好的装调可行性。

6 结 论

设计了一种可见、红外、太赫兹超宽谱段一体化云

表 6 蒙特卡罗公差分析结果

Table 6 Monte-Carlo tolerance analysis results

Probability /%	Tolerance		
	VNIR	SWIR	TIR
90	0.751	0.726	0.390
50	0.860	0.812	0.433
10	0.911	0.860	0.454

探测光学系统,太赫兹波段采用离轴三反系统进行一次成像,可见近红外、短波红外和长波红外波段采用分光瞳进行二次成像。采用一种新颖的共口径分光阑方式实现光学口径相差较大的多波段一体化探测成像,并通过偏视场的分光方式实现宽波段的分离。整个系统结构较为紧凑,成像质量良好,公差分配合理,满足设计要求。该系统可为太赫兹冰云探测技术的发展提供验证,同时超宽谱段一体化成像技术有利于通道间配准的实现和遥感反演及应用;除应用于云探测外,该成像方案也能为其他宽波段成像系统提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] King M D, Platnick S, Menzel W P, et al. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the terra and aqua satellites[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 3826-3852.
- [2] Defer E, Jimenez C, Prigent C. Sub-millimetre wave radiometry for cloud and rain characterization: from simulation to Earth observation mission concept[J]. Comptes Rendus Physique, 2012, 13(1): 54-61.
- [3] Buehler S A, Jiménez C, Evans K F, et al. A concept for a satellite mission to measure cloud ice water path, ice particle size, and cloud altitude[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2007, 133(S2): 109-128.
- [4] 翁陈思. 太赫兹波被动遥感冰云参数的反演方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019: 42-46.
Weng C S. Research on inversion methods for passive remote sensing of ice cloud by terahertz wave[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019: 42-46.
- [5] Waliser D E, Li J L F, Woods C P, et al. Cloud ice: a climate model challenge with signs and expectations of progress[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: D00A21.
- [6] Fox S, Mendrok J, Eriksson P, et al. Airborne validation of radiative transfer modelling of ice clouds at millimetre and sub-millimetre wavelengths[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(3): 1599-1617.
- [7] Grützun V, Buehler S A, Kluft L, et al. All-sky information content analysis for novel passive microwave instruments in the range from 23.8 GHz up to 874.4 GHz[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(7): 4217-4237.
- [8] 王虎, 段崇棣, 吕容川, 等. 星载太赫兹冰云探测技术发展和面临的问题[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(5): 722-727.
Wang H, Duan C D, Lü R C, et al. Development of space borne terahertz ice clouds measurement technology and existing technical problems[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(5): 722-727.
- [9] Bergadá M, Labriola M, González R, et al. The Ice Cloud Imager (ICI) preliminary design and performance[C]//2016 14th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), April 11-14, 2016,

- Espoo, Finland. New York: IEEE Press, 2016: 27-31.
- [10] Platnick S, Meyer K G, King M D, et al. The MODIS cloud optical and microphysical products: collection 6 updates and examples from Terra and Aqua[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1): 502-525.
- [11] 傅云飞. 利用卫星双光谱反射率算法反演的云参数及其应用[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 1039-1053.
Fu Y F. Cloud parameters retrieved by the bispectral reflectance algorithm and associated applications[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 1039-1053.
- [12] Ackerman S A, Smith W L, Revercomb H E, et al. The 27-28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: spectral properties of cirrus clouds in the 8-12 μm window[J]. Monthly Weather Review, 1990, 118(11): 2377-2388.
- [13] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, et al. Submillimeter-Wave Cloud Ice Radiometer: simulations of retrieval algorithm performance[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(3): 1-21.
- [14] Buehler S A, Defer E, Evans F, et al. Observing ice clouds in the submillimeter spectral range: the CloudIce mission proposal for ESA's earth explorer 8[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(7): 1529-1549.
- [15] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 122-131.
Zhou S C. Introduction to advanced infrared photoelectric engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014: 122-131.
- [16] 常凌颖, 张强, 邱跃洪. 宽谱段一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0722002.
Chang L Y, Zhang Q, Qiu Y H. Design of optical system for broadband and integrated AOTF imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0722002.
- [17] 张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 折/反混合式长波红外成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122005.
Zhang X L, Liu Y, Sun Q, et al. Design of hybrid refractive and reflective optical system of long-wave infrared region imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122005.
- [18] 李瑞昌, 邹刚毅, 王臣臣, 等. 可见光与红外一体化光学系统设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522002.
Li R C, Zou G Y, Wang C C, et al. Optical design of visible and infrared integrative camera[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522002.
- [19] 陈大喜, 伍雁雄, 宋绍漫, 等. 折叠式离轴三反光学系统设计与装调[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1722001.
Chen T X, Wu Y X, Song S M, et al. Design and alignment of folded off-axis three-mirror optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1722001.
- [20] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 130-141.
Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 130-141.
- [21] 李昭阳, 胡明勇, 白茜, 等. 一种非完善成像离轴三反装调补偿系统研究[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0422001.
Li Z Y, Hu M Y, Bai Q, et al. Assembly-alignment and compensation of imperfect imaging off-axis three mirror system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0422001.

Design of Integrated Cloud Detection Optical System from Visible to Terahertz Bands

Jiang Haiwei^{1,2,3}, Niu Xinhua^{1,3*}

¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract

Objective Clouds cover more than 60% of the Earth's surface and are an important factor in the Earth's radiation budget. However, the spatial and temporal distribution and microphysical parameters of clouds are complex and changeable, and the quantification is complicated. Uncertainties in cloud formation, interactions between cloud and radiation, and cloud parameters pose great challenges to the accuracy of general circulation models. Sensors in the visible and infrared spectral ranges have been developed earlier, and the technology is relatively mature. However, since the scale range of ice cloud particles is large, and the corresponding instrument has a short detection wavelength and is sensitive to small ice cloud particles or thin cirrus clouds, it cannot effectively detect ice clouds of large particles with a large scale range. Terahertz (THz) wavelength is close to the particle size of typical ice clouds, and THz wave has strong interactions, which can be used as an effective supplement to visible and infrared sensors, but the ability of THz wave to detect water clouds is insufficient due to the absorption of water vapor. Aiming at the insufficient coverage of cloud particle detection by existing satellite-borne remote-sensing instruments, this paper proposes an optical system design scheme suitable for multi-channel cloud detection spectral imagers with a wide spectrum from visible to THz bands, which can achieve more comprehensive cloud information detection. Moreover, the integrated observation can also provide more sufficient and convenient observation data for the simultaneous retrieval of cloud information in the visible, infrared, and THz bands.

Methods According to the requirements of cloud parameter retrieval, the system channels are set. A total of 10 detection

channels are selected, including four visible/near-infrared (VNIR) channels, two short-wave infrared (SWIR) channels, three thermal infrared (TIR) channels, and one THz channel. According to the orbit height (450 km) and pixel size of the detector, the focal length of the system is determined. Through the evaluation of the signal-to-noise ratio, the system aperture is determined. The aperture of the THz band is set as 150 mm, and F number is 3. For visible and infrared bands, the aperture is 42 mm and 68 mm, respectively, and F number is 2. The optical system adopts an off-axis catadioptric structure. In order to separate the THz band from visible and infrared bands, a method of split-field of view is developed. The THz wave is directly imaged by the off-axis three-mirror system, and the visible and infrared bands are imaged again by the rear optical path. The aperture of visible and infrared bands is separately set to solve the problem caused by the large aperture difference relate to the THz band. Finally, tolerance analysis of each subsystem is carried out step by step according to the degree of optical path overlap.

Results and Discussions The imager operates in a push-broom imaging mode to acquire 10 channels' spectrum information from visible to THz bands. The swath width is 100 km corresponding to the orbit of 450 km, and the nadir spatial resolution of THz, visible, and infrared bands are 10 km, 75 m, and 100 m, respectively (Table 1). The main optical system adopts a non-re-imaging three-mirror off-axis anastigmat structure [Fig. 2(a)], the root-mean-square radius of point spot of visible and infrared bands is less than $2\ \mu\text{m}$ [Fig. 2(b)], and that of the THz band is less than $7\ \mu\text{m}$ [Fig. 2(c)], which is much smaller than the pixel size. The rear optical path of the VNIR part adopts the off-axis three-mirror structure again [Fig. 3(a)]. The rear optical path of the SWIR adopts a five-piece transmission type [Fig. 4(a)], which is made of silicon or broadband ZnS. The rear optical path of the TIR adopts two materials, namely, germanium and ZnSe, with a total of four lenses [Fig. 5(a)]. The design results show that the modulation transfer function (MTF) of each subsystem is close to the diffraction limit, the spot diagrams are all smaller than the Airy disk, and the image quality is excellent. Finally, all the sub-optical systems are assembled, and the optical paths are folded (Fig. 6). The total length of the entire system is less than 800 mm, and the volume is relatively compact. The tolerance analysis shows that the MTF drop of each channel does not exceed 0.16 at the Nesquit frequency. The tolerance of the entire system is loose, and the allocation is reasonable.

Conclusions In this paper, an integrated cloud detection optical system with visible, infrared, and THz wide spectrum bands is designed. The THz band adopts the off-axis three-mirror structure, while VNIR, SWIR, and TIR bands use a secondary imaging structure. The aperture is set separately to realize the multi-channel integrated detection imaging with a large optical aperture difference, and the wide band separation is realized by split-field of view. The structure of the whole system is compact, the imaging quality is good, and the allocation of tolerances is reasonable, which meets the design requirements. The system can verify the development of space-borne THz ice cloud detection technology, and the wide spectrum integrated imaging technology is conducive to the realization of channel registration and remote sensing retrieval and application. In addition to cloud detection, this imaging scheme can also provide a certain reference for other broadband imaging systems.

Key words measurement; spectral imaging; cloud detection; terahertz; infrared