

文章编号 1004-924X(2022)02-0178-07

天问一号高分辨率相机成像参数设置及定标测试

刘文光*, 王晓东, 董吉洪, 张帆

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了使天问一号有效载荷高分辨率相机在轨工作期间获取到高质量图像,对高分辨率相机成像参数的设置进行说明。结合实验室定标测试结果,给出了相机在轨工作默认参数以及不同地面反射率和不同太阳高度角下的成像参数。首先,根据大气辐射传输模型计算出各谱段在相机入瞳处的辐亮度。接着,利用光电转换模型计算出CCD探测器信号输出电荷值。然后,在满足图像信噪比大于100的系统要求下,计算出相机成像参数。最后,在实验室条件下进行相机光谱定标和辐射定标测试及定标误差分析。实验结果表明:高分辨率相机的视频响应曲线呈线性关系,图像灰度值和成像参数呈线性关系,线性拟合相关系数均在0.999以上,线阵CCD各谱段响应非均匀性均不超过1%,典型照明条件下信噪比不低于100倍,相对辐射定标不确定度优于3%,绝对辐射定标不确定度优于7%。理论计算与实验室定标测试结果基本符合,成像参数设计合理,定标测试结果满足系统要求。

关键词:天问一号;高分辨率相机;成像参数;定标测试

中图分类号:V19;V447.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223002.0178

Imaging parameter setting and calibration test of Tianwen-1 high-resolution camera

LIU Wenguang*, WANG Xiaodong, DONG Jihong, ZHANG Fan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liuwenguangace@gmail.com

Abstract: To obtain high-quality images during the operation of the Tianwen-1 payload high-resolution camera, the imaging parameter settings were investigated. Combined with the results of laboratory calibration experiments, the default parameters of the camera in orbit and the imaging parameters under different ground reflectivities and sun altitudes were determined. First, the radiance of each spectral segment at the entrance pupil of the camera was calculated based on the atmospheric radiation transfer model. Then, the output charge value of the CCD detector was obtained by applying the photoelectric conversion model. Furthermore, the imaging parameters of the camera were obtained, and were found to meet the requirement of $SNR > 100$. Finally, spectral calibration and radiometric calibration were conducted under laboratory conditions, and the calibration error was analyzed. The experimental results indicate that the video response of the high-resolution camera is linear, relationship between the gray value and imaging parameter is linear, correlation coefficients of linear fitting are all above 0.999, non-uniformity of each spectral segment is less

收稿日期:2020-09-23;修订日期:2020-11-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62005266)

than 1%, and SNR is no less than 100 under typical lighting conditions. The relative radiometric calibration uncertainty is better than 3%, and the absolute radiometric calibration uncertainty is better than 7%. The results of the theoretical calculation and calibration are found to be basically consistent. Thus, the imaging parameters are designed reasonably, and the calibration results meet the system requirements.

Key words: Tianwen-1; high-resolution camera; imaging parameter; calibration

1 引言

火星是太阳系中的类地行星之一,从距离太阳由近至远的角度而言,火星是太阳系中第4个行星。火星轨道的外侧邻近的是小行星带和木星,内侧最靠近它的行星是地球。由于火星与地球的某些类似物理特性以及其独特的地形地貌,引起了人类对火星探测的浓厚兴趣,从人类进入航天时代开始,火星就是最重要的地外天体探测目标之一。迄今为止,人类已执行了40多次火星飞行探测任务,取得了大量的探测成果^[1-2]。

2020年7月23日12时41分,中国首次火星探测任务“天问一号”探测器在海南文昌卫星发射中心发射升空。长春光机所研制的火星高分辨率相机(简称“高分相机”)作为火星环绕器上的有效载荷之一,随“天问一号”发射升空。该高分相机采用了集光能力强、有效口径利用充分、光学传递函数高、杂光抑制能力强的长焦距大视场离轴光学系统,以全碳化设计理念解决了相机长焦距技术指标与重量资源紧张之间的矛盾,通过碳纤维桁架实现了光学元件的位置保证和高轻量化的结构设计。相机配置了五谱段TDI CCD和国产面阵探测器两种成像探测器,实现线阵推扫和面阵成像的兼容,有望获得火星表面真彩色融合图像及视频图像。为了使高分相机在轨工作期间获取到高质量图像,对成像参数的设置进行设计,并在实验室条件下进行定标测试,给出了高分相机在轨工作默认参数以及不同地面反射率和不同太阳高度角下的成像参数。

2 高分相机成像参数设置

2.1 高分相机入瞳辐亮度估算

我们假设火星表面为均匀的朗伯地表,在不考虑火星大气散射和吸收影响的情况下,高分相机观测星下点时,不同太阳高度角 θ_z ,火星表面

反射率 ρ ,入瞳接收的辐亮度 L_m 用式(1)来估算:

$$L_m = \frac{\rho E_{mv}}{\pi} \times \cos \theta_z. \quad (1)$$

太阳到达火星表面的直射辐照度 E_{mv} 与地球大气上界的辐照度 E_{ev} 、日地距离 d_{es} 与日火距离 d_{ms} 之比的平方的关系为:

$$E_{mv} = \left(\frac{d_{es}}{d_{ms}} \right)^2 \times E_{ev}. \quad (2)$$

将公式(2)代入公式(1)得式(3):

$$L_m = \frac{\rho E_{ev}}{\pi} \times \left(\frac{d_{es}}{d_{ms}} \right)^2 \times \cos \theta_z. \quad (3)$$

火星的轨道半径平均 2.28×10^8 千米,而地球的轨道半径为 1.5×10^8 千米,火星的轨道半径大约是地球的1.5倍,按照距离平方反比定率,得出火星大气上界的太阳直射辐照度是地球的0.432 8倍。通过查阅相关文献资料^[3-9],火星轨道太阳高度角在 $20^\circ \sim 85^\circ$ 之间,即太阳天顶角在 $5^\circ \sim 70^\circ$ 之间,火星表面地物反射率大约在5%~80%之间。利用大气辐射传输模型Modtran4.0可以估算出各谱段地球大气上界辐照度,如表1所示。

表1 地球大气上界太阳辐照度

Tab. 1 Solar irradiance at the upper limit of the earth atmosphere

火星相机工作谱段/ μm	地球大气上界太阳直射辐照度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.45~0.90	654.2
0.45~0.52	135.3
0.52~0.60	144.3
0.63~0.69	90.7
0.76~0.90	143.9

利用式(3)和表1可以估算出高分相机各谱段入瞳辐亮度,表2只列出全色入瞳辐亮度。

2.2 高分相机探测器电荷估算

我们利用式(4)可以计算得到焦平面光照度 E ,

表 2 不同太阳高度角和反射率全色谱段入瞳辐亮度估算

Tab. 2 Estimation of panchromatic radiance with different solar altitudes and reflectances

反射率 ρ	入瞳辐亮度/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)									
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	85°
0.05	0.39	0.78	1.54	2.25	2.90	3.45	3.90	4.23	4.44	4.49
0.1	0.79	1.57	3.08	4.51	5.79	6.90	7.81	8.47	8.88	8.98
0.2	1.57	3.13	6.16	9.01	11.59	13.81	15.61	16.94	17.75	17.96
0.3	2.36	4.70	9.25	13.52	17.38	20.71	23.42	25.41	26.63	26.93
0.4	3.14	6.26	12.33	18.03	23.17	27.62	31.22	33.88	35.50	35.91
0.5	3.93	7.83	15.41	22.53	28.97	34.52	39.03	42.35	44.38	44.89
0.6	4.71	9.39	18.49	27.04	34.76	41.42	46.83	50.81	53.25	53.87
0.7	5.50	10.96	21.58	31.54	40.55	48.33	54.64	59.28	62.13	62.85
0.8	6.28	12.52	24.66	36.05	46.35	55.23	62.44	67.75	71.01	71.83

进一步根据式(5),可以得到CCD输出信号幅值 S 。

$$E=\frac{\pi}{4}\tau\frac{1}{F^2}B, \tag{4}$$

$$S=E\times R\times t_{\text{int}}, \tag{5}$$

其中:光学系统平均透过率 $\tau=0.885$ (单镜平均反射率0.97,按4块反射镜计算);相对孔径为1:12,即 F 数为12;全色入瞳辐亮度 B 的结果在表2中;CCD的响应度为 R ,通过探测器手册可以得到不同谱段的响应度;CCD积分时间为 t_{int} ,根据轨道高度可以得到积分时间,结果见表3,表中是全色谱段的积分时间,多光谱谱段是全色谱段的4倍。

2.3 高分相机成像参数估算

我们已经得到CCD的信号幅值,在不考虑任何噪声的情况下,图像信噪比等于电荷信号的平方根,系统要求图像信噪比大于100,也就是电荷信号的平方根要大于100,通过探测器手册可知,全色谱段的电荷转移效率按照11.86 $\mu\text{V}/\text{e}^-$ 计算,多光谱谱段的电荷转移效率按照

表 3 积分时间统计

Tab. 3 Table of integral time

火星轨道高度/km	全色积分时间/ms
265	0.12411
300	0.14321
350	0.17157
400	0.20115
450	0.2321
500	0.26435
550	0.29762
600	0.3327
650	0.37076
700	0.40698
750	0.44872
800	0.48343

5.22 $\mu\text{V}/\text{e}^-$ 计算,最终得到不同地面反射率、不同太阳高度角下的积分级数,增益的放大倍数为1,表4只列出了反射率0.2时的部分全色谱段积分级数。

表 4 反射率0.2积分级数统计

Tab. 4 Integral numbers with 0.2 reflectance coefficient

轨道高度/km	积分级数						
	5°	20°	30°	40°	60°	70°	85°
265	96级	32级	32级	16级	16级	16级	16级
300	96级	32级	16级	16级	16级	16级	8级
400	64级	16级	16级	16级	8级	8级	8级
500	48级	16级	16级	8级	8级	8级	8级
600	48级	16级	8级	8级	8级	8级	8级
700	32级	8级	8级	8级	8级	8级	8级
800	32级	8级	8级	8级	8级	8级	8级

3 高分相机定标测试与结果

3.1 光谱定标测试

在正式进行光谱定标之前利用汞灯特征谱线和陷阱探测器对光谱定标装置的波长位置准确性和相对光谱辐射强度进行了校准和溯源^[10]。高分相机CCD探测器全色和多光谱的相对光谱响应曲线如图1所示。

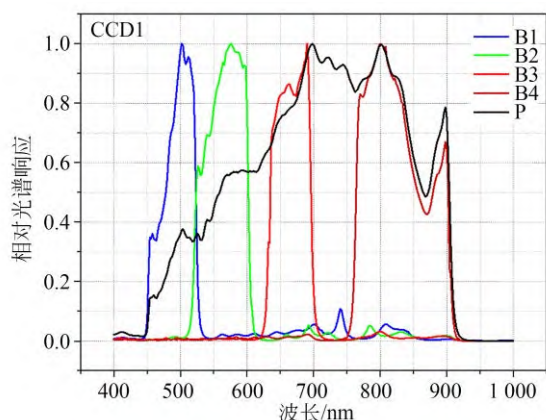


图1 高分相机相对光谱响应曲线

Fig. 1 Spectral response curve of high-resolution camera

3.2 视频响应线性测试

在整个动态范围内,对于每个光谱和成像通道分别利用积分球光源提供一系列辐亮度等级(不少于8个),记录相应图像灰度输出,然后利用最小二乘拟合来获得视频响应曲线,据此计算响应线性度指标以及像元级的相对/绝对定标系数,图2给出了全色谱段的响应线性测试结果。

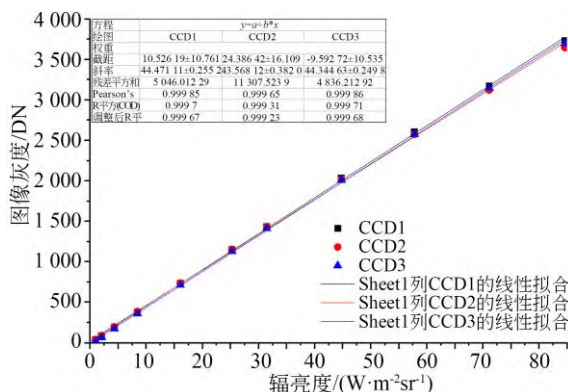


图2 全色谱段响应线性测试结果

Fig. 2 Result of panchromatic video response linearity

3.3 图像灰度与成像参数之间的线性关系测试

分别固定积分时间、增益和积分级数中的两种参数,改变第三个成像参数测试相机输出图像灰度随第三个成像参数之间的线性关系,图3~图5分别给出了全色谱段图像与积分级数、增益和积分时间之间的关系。

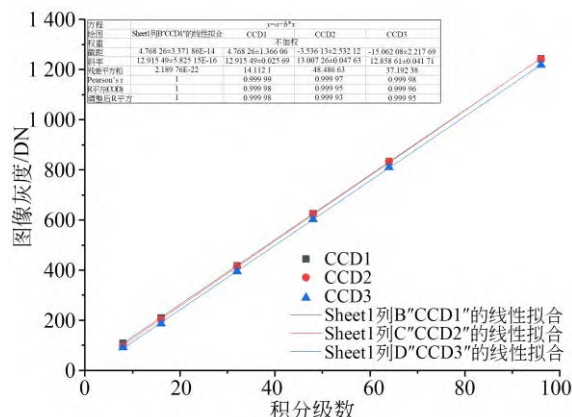


图3 全色谱段图像灰度与积分级数之间的关系

Fig. 3 Relationship between panchromatic gray value and integral number

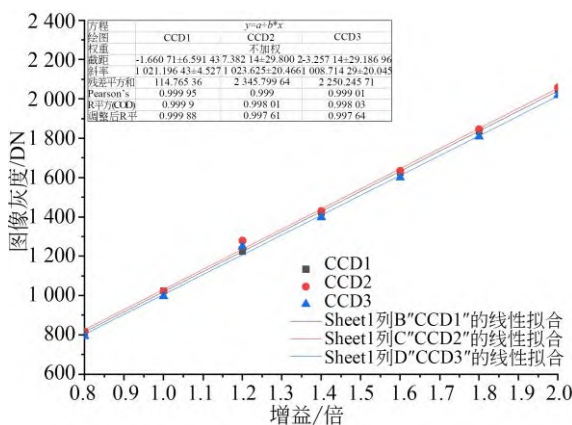


图4 全色谱段图像灰度输出与增益之间的关系

Fig. 4 Relationship between panchromatic gray value and gain

3.4 响应非均匀性测试

对于探测器全色和多光谱谱段的每一个光谱通道,分别调整积分球光源的辐亮度输出,启用校正系数并使得该谱段图像灰度输出达到饱和值的一半左右,此时采集并记录定标图像作为事后计算PRNU的依据,经过处理获得响应非均匀性指标,统计结果如表5所示。

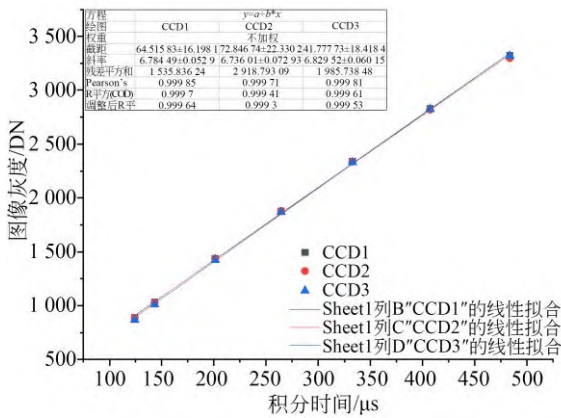


图5 全光谱段图像灰度输出与积分时间之间的关系

Fig. 5 Relationship between panchromatic gray value and integral time

表5 相机各谱段响应非均匀性测试结果

Tab. 5 Result of camera response nonuniformity

谱段	积分级数	像元平均灰度	标准偏差	PRNU (%)
PAN	32	2048.2	15.8	0.77
B1	16	1990.6	16.7	0.84
B2	12	2019.9	9.0	0.45
B3	16	1996.7	6.9	0.35
B4	8	1901.9	11.7	0.62

3.5 信噪比测试结果

信噪比测试需要给出指定太阳高度角和地面反照率下^[11-12],根据总体研制任务书要求,在太阳高角30°和地面反照率0.2的典型照明情况下,相机信噪比应不低于100倍。相机在轨垂直对火星观测时相机入瞳处的辐射亮度值,作为实验室辐射定标积分球光源输出辐射亮度值设定的依据,根据辐射传输模型可以估算相机各工作谱段内入瞳辐亮度如表6所示;在该亮度下采集各谱段图像500行进行统计,高分相机各谱段默认级数测试结果见表7;在太阳高度角30°和地面反照率0.2的典型照明情况下,全色级数理论计算结果与定标测试结果基本符合,具体结果见表4和表7。

3.6 定标精度分析

3.6.1 相对辐射定标精度

相机相对辐射定标主要包括响应非均匀性和非线性的定标,影响测量精度的因素包括定标

表6 典型照明条件下相机各通道入瞳辐亮度估算

Tab. 6 Estimation of camera radiance with typical lighting condition

工作谱段	入辐射亮度/(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)
PAN	9.01
B1	1.86
B2	1.99
B3	1.25
B4	1.98

表7 典型照明条件下信噪比测试结果

Tab. 7 Result of SNR with typical lighting condition

谱段	轨道高度	积分级数	SNR(倍)		
			CCD1	CCD2	CCD3
PAN		32级	109	115.1	105.8
B1		16级	109.2	117.9	146.4
B2	265 km	12级	138	118.1	134.6
B3		16级	149.8	142.1	161
B4		16级	106.5	122.9	118.7

用积分球光源辐射输出、相机读出误差、相机响应非线性、定标数据计算误差。

积分球光源辐射输出的不确定度影响主要来自两个方面:一是积分球开口处的非均匀性误差、另一个是非余弦误差。相机入瞳尺寸为385 mm,光学视场角为2°,积分球光源在该尺寸下的非均匀性不确定度 $\sigma_i=0.6\%$,在该视场角下的非余弦不确定度 $\sigma_c=2.3\%$ 。

相机读出误差引起的不确定度 $\sigma_{\text{CCD}}=1\%$;相机响应非线性不确定度 $\sigma_{\text{mul}}=1\%$;定标数据计算(定标图像数据的提取和计算)不确定度 $\sigma_{\text{cal}}=0.5\%$ 。合成后相对辐射定标不确定度 σ_R 为:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{\text{CCD}}^2 + \sigma_{\text{mul}}^2 + \sigma_{\text{cal}}^2} = \sqrt{0.006^2 + 0.023^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.005^2} \approx 2.81\% \quad (6)$$

分析表明高分相机的辐射定标方案可满足相对辐射定标不确定度优于3%的要求。

3.6.2 绝对辐射定标精度

相机绝对辐射定标所用光源亮度是通过光谱辐射计测量得到的,光谱辐射计亮度基准是通过NIST标准灯传递得到的。影响绝对辐射定标

精度的因素包括:标准光源的不确定度 $\sigma_s=1.015\%$;辐射量值标准传递的不确定度 $\sigma_r=3\%$;积分球光源测量不确定度 $\sigma_T=3\%$;积分球光源非均匀性不确定度 $\sigma_i=0.6\%$;积分球光源非余弦

不确定度 $\sigma_c=2.3\%$;相机输出不确定度 $\sigma_{\text{CCD}}=1\%$;相机响应非线性不确定度 $\sigma_{\text{mul}}=1\%$;定标数据计算不确定度 $\sigma_{\text{cal}}=0.5\%$ 。合成后绝对辐射定标不确定度 σ_a 为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_i^2 + \sigma_T^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{\text{CCD}}^2 + \sigma_{\text{mul}}^2 + \sigma_{\text{cal}}^2} = \sqrt{0.01015^2 + 0.03^2 + 0.03^2 + 0.006^2 + 0.023^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.005^2} \approx 5.19\% \quad (7)$$

分析表明高分相机的辐射定标方案可满足绝对辐射定标不确定度优于7%的要求。

4 结 论

本文为了使天问一号有效载荷高分辨率相机在轨工作期间获取到高质量图像,对成像参数的设置进行说明,给出了相机在轨工作默认参数

以及不同地面反射率和不同太阳高度角下的成像参数。定标实验结果证明:高分相机的视频响应曲线呈线性关系,图像灰度值和成像参数呈线性关系,线性拟合相关系数均在0.999以上,线阵CCD各谱段响应非均匀性均不超过1%,典型照明条件下信噪比不低于100倍,相对辐射定标不确定度优于3%,绝对辐射定标不确定度优于7%。

参考文献:

- [1] 欧阳自远,肖福根.火星探测的主要科学问题[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(3): 205-217.
OUYANG Z Y, XIAO F G. Major scientific issues involved in Mars exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(3): 205-217. (in Chinese)
- [2] 洪天晟,苏彦,王瑞刚,等.火星轨道器次表层探测雷达数据处理技术与现状研究[J]. 天文研究与技术, 2021, 18(2): 173-194.
HONG T S, SU Y, WANG R G, et al. Overview of Mars orbiter subsurface investigation radar data processing technology and research using radar[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2021, 18(2): 173-194. (in Chinese)
- [3] 欧阳自远,肖福根.火星及其环境[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(6): 591-601.
OUYANG Z Y, XIAO F G. The Mars and its environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(6): 591-601. (in Chinese)
- [4] VEVERKA J, BURNS J A. The moons of Mars[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1980, 8(1): 527-558.
- [5] JOHNSTON D H, TOKSÖZ M N. Internal structure and properties of Mars[J]. *Icarus*, 1977, 32(1): 73-84.
- [6] OWEN T, BIEMANN K, RUSHNECK D R, et al. The composition of the atmosphere at the surface of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4635-4639.
- [7] BARTH C A. The atmosphere of Mars[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1974, 2(1): 333-367.
- [8] HESS S L, RYAN J A, TILLMAN J E, et al. The annual cycle of pressure on Mars measured by Viking Landers 1 and 2[J]. *Geophysical Research Letters*, 1980, 7(3): 197-200.
- [9] JOHNSTON D H, TOKSÖZ M N. Internal structure and properties of Mars[J]. *Icarus*, 1977, 32(1): 73-84.
- [10] 万志,李葆勇,刘则洵,等.测绘一号卫星相机的光谱和辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1867-1873.
WAN Z, LI B Y, LIU Z X, et al. Spectral and radiometric calibrations for mapping satellite-1 camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1867-1873. (in Chinese)
- [11] 薛旭成,石俊霞,吕恒毅,等.空间遥感相机TDI CCD积分级数和增益的优化设置[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 857-863.
XUE X C, SHI J X, LÜ H Y, et al. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 857-863. (in Chinese)
- [12] 刘则洵,万志,李宪圣,等.时间延迟积分CCD

空间相机信噪比的影响因素[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(7): 1829-1837.

LIU Z X, WAN Z, LI X S, *et al.* Influence fac-

tors on SNR of TDICCD space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1829-1837. (in Chinese)

作者简介:



刘文光(1983—),男,吉林长春人,硕士,副研究员,2008年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电载荷成像控制与信息处理方面的研究。E-mail: liuwenguangace@gmail.com