光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112801

一种星辐射模式下全天区星图识别算法及 FPGA 实现

刘红亮[1,2,3]，赵汝进[1,3]，林　玲[1,3]，钟建勇[1,3]*

（1. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室，成都 610209）

摘　要： 针对在 DSP 中实现全天区星图识别算法耗时长导致实时性差，提出并实现了一种基于 FPGA 的星辐射模式下的全天区星图识别算法。该方法利用 FPGA 并行性、高主频等特性，在保证算法高精度、高准确度的前提下，解决了全天区星图识别耗时长的问题。首先，根据星点信息构建星辐射模式；其次，基于 FPGA 实现了星辐射模式下对应特征向量的计算；最后，提出了一种可预读、流水化的星辐射模式匹配算法，极大地缩短了星辐射模式匹配的时间。在 Xilinx 公司的 Xc7a75tfgg484-2 平台上进行实验验证，结果表明，在相同时钟主频下，基于 FPGA 的星图识别算法速度比基于 DSP 的算法速度快 10.95 倍以上，而且在使用三组特征向量同时进行匹配时，识别率超过 99%。

关键词： 星图识别；全天区；FPGA；星辐射模式

中图分类号： TP128.4　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0128－06

A Star Identification Algorithm for All-Sky Regions in Star Radiation Mode and Its FPGA Implementation

LIU Hongliang[1,2,3], ZHAO Rujin[1,3], LIN Ling[1,3], ZHONG Jianyong[1,3]

（1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 2. University of Chinese Academy, Beijing 100049, CHN; 3. Key Lab. of Science and Technol. on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN）

Abstract: Aiming at the problem of poor real-time performance due to the time-consuming implementation of the star identification algorithm for the all-sky regions in DSP, a star identification algorithm for all-sky regions based on FPGA in star radiation mode is proposed and implemented. This method took advantage of the characteristics of parallelism and high main frequency of FPGA, and solved the problem of long time-consuming of star identification in the all-sky regions under the premise of ensuring high precision and high accuracy of the algorithm. The main works of this paper were as follows. Firstly, the star radiation pattern was constructed according to the star point information. Secondly, the calculation of the corresponding eigenvectors in the star radiation pattern was realized based on FPGA. Finally, a pre-readable and pipelined star radiation pattern matching algorithm was proposed, which greatly shortened the time of star radiation pattern matching. The experimental verification was carried out on the Xc7a75tfgg484-2 platform of Xilinx Company. The results show that under the same main clock frequency, the speed of the star identification algorithm based on FPGA is more than 10.95 times faster than that based on DSP. And the recognition rate exceeds 99% when using three sets of eigenvectors for simultaneous matching.

Key words: star identification; all-sky regions; FPGA; star radiation pattern

收稿日期：2022－11－28.

* **通信作者：**钟建勇

E-mail: zhongjianyong@ioe.ac.cn

0　引言

星敏感器因其具有集成度高、精度高、无姿态误差累积等优点，一直受到各类载体青睐[1-2]。星图识别是星敏感器进行载体姿态测量的关键步骤之一，也是核心工作之一，更是星敏感器相对于传统相机等成像系统的一个重要区别[3]。

常见的星图识别算法都是在 DSP 中进行，都需要较长的识别时间，例如，梁莹等[4]提出的改进的快速全天区星图识别时间都需要 1.54 s。FPGA 并行优势[5]为缩短星图识别时间提供了可能，但是 FPGA 在浮点运算以及三角函数运算方面的不足，使得星图识别的精度、准确度以及识别速度都有待提高。

针对上述问题，本文提出了一种适用于 FPGA 硬件实现的星辐射模式下的全天区星图识别算法，在保证识别精度和识别率的前提下，发挥 FPGA 的优势，提高全天区星图识别的速度。

1　算法描述

星敏感器敏感成像获得星点信息后，根据靶面上星点的坐标值(x_i，y_i)和星等信息 Mv_i，按照一定原则构建星辐射模式；然后基于 FPGA 实现对应特征向量的计算；再将该特征向量与预存的星辐射模式库中的参考向量进行对比分析，最终输出与该特征向量匹配度最高的导航星信息以及对应的匹配关系。

整个系统的工作流程如图 1 所示。

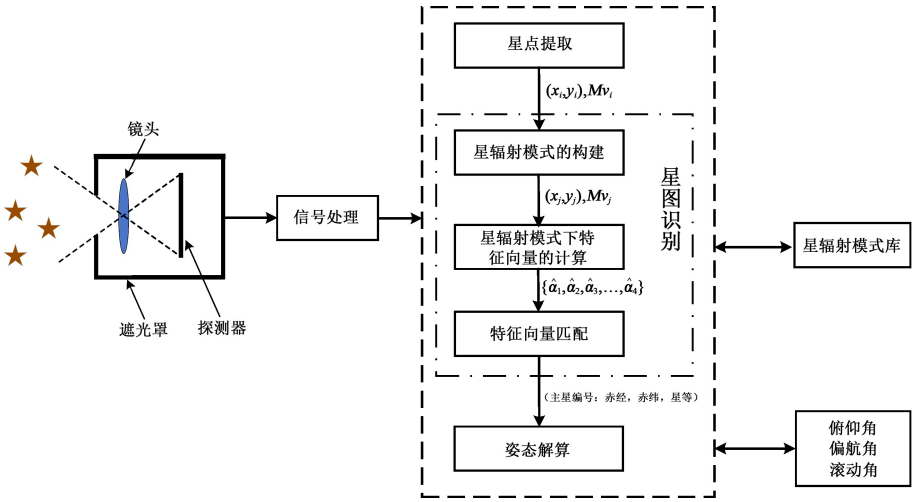


图 1　星敏感器的工作原理

1.1　星辐射模式的构建

本文选取视场角为 16°×16°、探测器的极限星等 Mv 为 5.6、焦距为 24 mm、像元尺寸为 5.5 μm 的星敏感器；选用 SAO J2000 星表，剔除双星、变星、暗星、自行较大的星后筛选出 2 400 颗左右的导航星，对应每个视场内平均会有 15 颗星[6]，所以本文构建有 15 颗恒星的星辐射模式，其构建原则为

(1)选取星等信息最低、星点最亮的恒星作为主星；

(2)选取视场内离主星最近的一定数量的恒星作为伴随星，可以避免由于抖动等因素造成的视场边缘缺失；

(3)选取除主星外最亮的一定数量的恒星作为伴随星，较高的信噪比会降低“伪星点”引起的虚警率。

最终构建的星辐射模式示意图如图 2 所示。

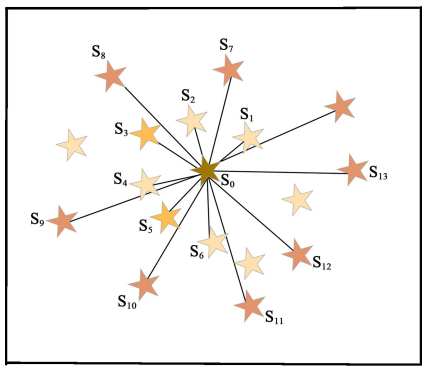


图 2　星辐射模式示意图

1.2　特征向量的计算

利用星辐射模式下的星点信息，依次计算得到主星与 14 颗伴随星之间的星对角距值 $\hat{\alpha}_{ij}$，并构建

对应的特征向量$\{\hat{\alpha}_1,\hat{\alpha}_2,\hat{\alpha}_3,\hat{\alpha}_{14}\}$。首先，根据星点的坐标值$(x_i,y_i)$、星等信息$Mv_i$、星敏感器光学系统的焦距$f$以及星敏感器的主光轴与像面的交点$(x_0,y_0)$，得到该星点对应的测量矢量：

$$\omega_i=\frac{1}{\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2+f^2}}\begin{bmatrix}-(x_i-x_0)\\-(y_i-y_0)\\f\end{bmatrix} \tag{1}$$

然后利用两颗恒星的测量矢量计算得到对应的角度值，即星对角距值$\hat{\alpha}_{ij}$：

$$\alpha_{ij}=\arccos\left(\frac{(x_i-x_0)\times(x_j-x_0)+(y_i-y_0)\times(y_j-y_0)+f^2}{\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2+f^2}\times\sqrt{(x_j-x_0)^2+(y_j-y_0)^2+f^2}}\right) \tag{2}$$

1.3 星辐射模式库的构建

与计算实拍星图中星辐射模式下包含14个特征值的特征向量$\{\hat{\alpha}_1,\hat{\alpha}_2,\cdots,\hat{\alpha}_{14}\}$不同的是，为了保证星辐射模式库的完备性和冗余性，构建星辐射模式库时，最多筛选29颗导航星作为伴随星，然后依次计算这些伴随星与主星之间的星对角距值，与这些伴随星的星号共同构建成一个完整的参考向量$\{\hat{\alpha}_1,\cdots,\hat{\alpha}_{29},\mathrm{num}_1,\cdots,\mathrm{num}_{29}\}$。将导航星表中的每颗导航星依次作为主星，得到对应的参考向量，最终构成完整的一个星辐射模式库，如表1所示。

表1 星辐射模式库

主星号	α_1	…	α_{29}	num1	…	num29
1	1.594	…	12.597	2 200	…	1 372
2	2.771	…	0.000	1 981	…	0 000
…	…	…	…	…	…	…
2 324	1.207	…	12.897	1 130	…	1 340

1.4 星辐射模式的匹配

为了提高星敏感器的识别率，本文使用三组星辐射模式进行匹配，输出匹配度最高的一组。

依次循环计算得到每组特征向量$\{\hat{\alpha}_1,\hat{\alpha}_2,\cdots,\hat{\alpha}_{14}\}$中的每一个特征，分别与星辐射模式库中的2 324组参考向量的星对角距值部分$\{\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\cdots,\alpha_{29}\}$逐个特征$\alpha_j$进行比较，若是满足$|\hat{\alpha}_i-\alpha_j|<\varepsilon$（其中$\varepsilon$为最大允许的误差）这一条件，则视为这两个特征匹配成功，继续比较直至计算得到的每组特征向量与星辐射模式库中的每组参考向量都比较结束，最终输出最大的匹配信息。其匹配流程如图3所示。

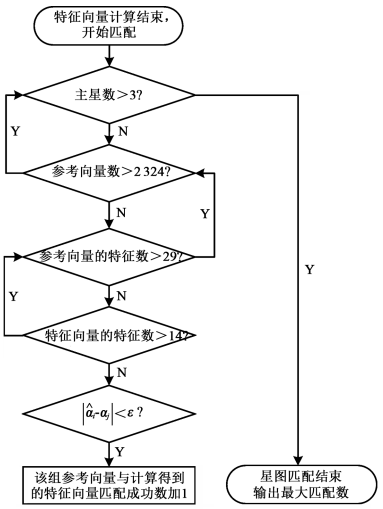


图3 星辐射模式的匹配流程

2 算法的FPGA实现

为了充分发挥FPGA并行性的优势，结合算法需求，本文并行进行三组星辐射模式下全天区星图识别算法，同时，对单组算法进行模块划分、流水化进行，将极大地提升全天区星图识别的速度。

2.1 FPGA实现星辐射模式的构建

FPGA内不支持浮点运算，需要将恒星信息(x_i,y_i)和Mv_i定点化后再进行逻辑运算。为保证星图识别的精度，本文将提取得到的星点信息Q12定点化：对星点信息x_i,y_i,Mv_i都扩大2^{12}倍后向下取整，即$\lfloor x_i\times2^{12}\rfloor$，比如一个恒星的浮点数坐标信息为(303.499 9,122.007 9)，Q12定点化后可表示为(1 243 135,499 744)。

基于Q12定点化后的星点信息，在接收星点信息的同时，按照星辐射模式的构建原则，筛选出满足要求的三组恒星：每组包括1颗主星和14颗伴随星。

2.2 FPGA实现星辐射模式特征向量的计算

在FPGA中按照公式(2)进行星辐射模式下特征向量的计算，得到的结果误差较大，最大误差接近0.05°。在相同输入信息下，基于FPGA迭代32次实现arctan函数以及arccos函数，它们的计算误差如图4所示。

显然，在本算法中，基于FPGA迭代arctan函数实现星对角距值的计算，其结果误差最小。因此，本算法通过利用arctan函数求得每组对应的特征向量，其计算步骤为

(1)“伪 cos 值”的求解：先利用星点信息，得到公式(2)中的分子和分母值，也就是星对角距值 $\hat{\alpha}_i$ 的邻边、斜边；

(2)第三边的计算：利用勾股定理求得第三边的大小，至此，得到星对角距值 $\hat{\alpha}_i$ 的对边以及邻边；

(3)arctan 的求解：利用步骤二中星对角距值 $\hat{\alpha}_i$ 的对边以及邻边，通过“移位相加”的迭代操作，计算得到对应的角度值 $\hat{\alpha}_i$。

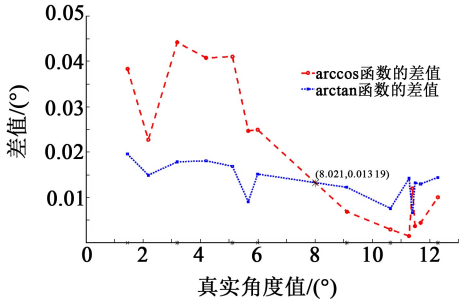


图 4　arctan 和 arccos 计算结果误差对比

2.2.1　乘法、开方运算的实现

在本算法中，主要用到的资源是 FPGA 中的 LUT 表和 DSP Slice。LUT 表用于实现算法中较为简单的逻辑设计与运算，比如加法器；对于公式(2)中的乘法运算就可以通过指定 FPGA 芯片中 DSP48E1 Slice 专用资源来实现；而开方运算，可以迭代使用乘法器，逐次比较，最终接近被开方数，这样不仅可以节约逻辑资源，还可以降低系统功耗、提升算法性能。

2.2.2　反正切函数 arctan 的 FPGA 实现

本文是基于 Volder[7] 首次提出的 CORDIC 算法原理，将 arctan 函数“化繁为简”：根据本算法需求，转化为需要“移位相加”32 次的迭代操作，从而得到对应的角度值 $\hat{\alpha}_{i+1}$，迭代过程中坐标值 (x_{i+1}, y_{i+1}) 和角度值 α^i 的变化规律为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \pm y_i \times 2^{-i} \\ y_{i+1} = y_i \mp x_i \times 2^{-i} \\ \hat{\alpha}_{i+1} = \alpha_i + \alpha^i \end{cases} \tag{3}$$

其中，角度 α^i 的选取需满足 $\tan\alpha^i = 2^{-i}$，这是硬件实现 arctan 函数的基础。

2.2.3　流水化实现特征向量的计算

在计算特征向量中的一个特征值 $\hat{\alpha}_i$ 时，需要逐步经过“伪 cos 值”的求解、第三边的计算以及 arctan 的求解，这三个步骤每完成一次依次需要 44 clk，37 clk 和 33 clk；而一个特征向量 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \cdots \hat{\alpha}_{14}\}$ 是由 14 个特征值 $\hat{\alpha}_i$ 构成的，所以需要循环 14 次这三个步骤。

而 FPGA 的并行特性为流水化进行 14 个星对角距值的求解提供了可能：可以在求解第一个星对角距值的步骤二时，同时求解第二个星对角距值的步骤一，以此类推，最终只需要在最多 690 个时钟周期内就可以完成特征向量的计算。

2.3　FPGA 实现星辐射模式的匹配

为了防止星辐射模式库数据丢失，将其存储在 Flash 存储器中。FPGA 与 Flash 之间数据交互使用的是 SPI 总线，作为一种串行协议，只能逐 bit 进行数据传输，而且时钟主频最大为 50 MHz，匹配速度的提升受到了极大的限制，本文提出的可预读、流水化的星辐射模式匹配算法从以下三个方面为突破速度瓶颈提高可能：

(1)多组数据同时进行匹配；

(2)预读模块的设置：FPGA 从 Flash 中读取数据速度受限，而从 RAM 中读取速度上限远大于 50 MHz，所以上电后可以预读出一部分存储到 RAM 中，供后续匹配使用；

(3)流水线的设置：与预读模块协同作用，将整个星辐射模式库的数据分为三组，在进行第一组匹配的时候，同时预读第二组，以此类推，流水化进行。

在匹配过程中，只要有一组特征向量与某一导航星的参考向量之间的匹配关系满足匹配数大于 10 时，意味着星辐射模式匹配极大概率会成功，就中断后续匹配，直接输出当前匹配结果。

3　实验结果及分析

基于 Xilinx 公司的 Xc7a75tfgg484-2 实验平台进行算法功能实现、验证。实验过程如下：

(1)将构建好的星辐射模式库预存到 Flash 中；

(2)使用已知恒星信息的实拍星图作为输入，在 FPGA 中进行算法功能实现；

(3)将算法结果通过 UART 输出到 PC 端显示。

使用已知恒星信息的实拍星图作为输入，将计算结果与实际信息进行对比分析，如表 2 所示：在一组数据匹配成功时算法结果不一定完全正确，但是三组数据同时进行匹配时，选取匹配度最高的一组，则匹配成功率超过 99%。

本文使用的主要硬件资源如表 3 所示。

表 2 星辐射模式下星图识别算法的匹配结果

星图	实际主星号	计算得到的主星号	实际匹配数/计算匹配数	匹配结果
1	327	327	8/10	成功
	2 307	1 004	0/6	
	796	796	9/11	
2	42	42	7/8	成功
	288	288	8/9	
	172	1 105	0/7	
3	874	1 749	0/5	成功
	161	161	9/11	
	593	593	1/7	

表 3 FPGA 硬件资源占用情况

资源	使用数量	拥有数量	占用比/%
LUT	6,378 个	75 520 个	8.44
DSP Slice	59 片	180 片	32.78
Flash	2.19 Mb	16 Mb	13.69

3.1 算法性能分析

本文使用的 FPGA 主时钟设为 50 MHz，与 Flash 进行数据交互的时钟频率也设为其允许的最大值 50 MHz。为了对比分析，也在使用 50 MHz 时钟主频的 DSP 平台进行星图识别算法的实现。结果表明，基于 FPGA 的算法速度比基于 DSP 的算法速度快 10.95 倍以上。

以坐标为(294.586 6，121.542 6)，5.6 星等的恒星为主星，以表 4 中的恒星为伴随星，对比使用该星辐射模式下星图识别算法计算得到的结果与 arctan 真值之间的误差值，结果表明，误差值都在 0.017°以内。

3.2 与其他算法对比

将本算法与基于 DSP 改进的三角形算法[4]、基于 FPGA 的 SOM 算法[8]以及本算法基于 DSP 的实现进行对比，这三种算法的识别成功率、识别时间以及导航星库占用空间之间的对比如表 5 所示。

表 4 算法精度分析表

X/像素	Y/像素	Mv	真值/(°)	计算值/(°)	误差值/(°)
303.499 9	122.007 9	4.3	2.182 463 008	2.167 480 469	0.014 982 539 7
266.999 6	42.751 6	4.3	3.192 166 85	3.174 316 406	0.016 850 443 3
−384.576 8	29.525 2	5.2	10.635 967 45	10.628 173 83	0.007 793 619 3
−255.750 2	477.172 4	4.4	12.292 764 03	12.278 320 31	0.014 443 718 2
−282.592 5	623.112 3	4.5	5.121 140 737	5.104 248 047	0.016 892 690 2
−319.749	529.072 3	5.2	11.494 539 19	11.481 201 17	0.013 338 015 6
18.962 8	−488.628 4	4.8	6.000 704 712	5.985 351 563	0.015 353 149 5
591.223 4	−383.025 6	4.6	11.404 115 68	11.397 460 94	0.006 654 741 0
530.147 9	−343.397 1	5	11.285 871 3	11.271 484 38	0.014 386 921 2
183.413 9	−112.243 3	5.1	4.199 568 621	4.181 396 484	0.016 172 136 8
−512.698 4	−457.716 8	4.9	5.672 756 708	5.663 574 219	0.009 182 489 6
−136.375 5	−83.885 8	5.1	1.459 892 124	1.440 185 547	0.016 706 576 9
−566.058	−193.68	5	11.690 017 2	11.677 001 95	0.013 015 242 0
−569.092 7	−292.062 6	4.7	9.116 333 203	9.104 003 906	0.012 329 296 5

表 5 不同算法的性能对比

算法	识别率/%	识别时间	占用空间/MB
基于 DSP 的三角形算法	>99%	1.54 s	0.59
基于 FPGA 的 SOM 算法	<86%	1.6 μs	—
本算法基于 DSP 的实现	>99%	<0.9 s	0.58
本算法基于 FPGA 的实现	>99%	<25 ms	0.29

根据对比可知，相较基于 DSP 改进的三角形算法，识别率持平，都超过 99%，但本算法在识别速度上提升 6.16 倍以上、占用空间上提升 50.8%；相较基于 FPGA 的 SOM 算法，因其模式简单速度快于本算法，但是本算法识别率远远大于其 86%的最大值，本算法的识别时间后续可以通过改变星辐射模式库的存储位置、改进星辐射模式匹配方法进一步提升识别速度；相较本算法基于 DSP 的实现，识别率持平，都超过 99%，识别速度提升 10.95 倍以上、占用空间提升 50%。

4 结论

本文所设计的一种星辐射模式下的全天区星图识别算法及 FPGA 实现，其特点主要在于：从最开始的选星角度为提高星图识别的准确度提供了可能，再充分利用 FPGA 的内嵌资源，在保证星敏感器精度和准确度的前提下，最大限度地提升了算法速度，解决了 FPGA 中识别率低、DSP 中实时性差而导致姿态更新率低的问题。

参考文献：

[1] 屠斌杰，韩 柯，王 昊，等. 大视场数字式太阳敏感器设计[J]. 传感技术学报，2011，24(3)：336-341.
Tu Binjie，Han Ke，Wang Hao，et al. Design of digital sun sensor with large field[J]. J. of Transduction Technology，

2011，24(3)：336-341.

[2] 李　东，朱振才，张　锐，等. SZ-7 伴星姿态控制系统设计及在轨试验[J]. 宇航学报，2011，32(3)：495-501.
Li Dong，Zhu Zhencai，Zhang Rui，et al. The design and in-orbit test of the companion microsatellite attitude control system in SZ-7 flight mission[J]. J. of Astronautics，2011，32(3)：495-501.

[3] 邢　飞，尤　政，孙　婷，等. APS CMOS 星敏感器系统原理及实现方法[M]. 北京：国防工业出版社，2017.
Xing Fei，You Zheng，Sun Ting，et al. The Principle and Implementation Method of APS CMOS Star Sensor System [M]. Beijing：National Defense Industry Press，2017.

[4] 梁　莹，蔡善军，张丽娜，等. 一种改进的快速全天星图识别算法[J]. 导航定位于授时，2022，9(3)：87-91.
Liang Ying，Cai Shanjun，Zhang Li'na，et al. An improved fast all-sky star identification algorithm[J]. Navigation Positioning & Timing，2022，9(3)：87-91.

[5] 冯晓晓. 星载计算机及星敏电子系统一体化研制[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
Feng Xiaoxiao. Integrated development of on-board computer and Xingmin electronic system[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[6] 田　宏，林　玲，郝永杰，等. 星敏感器导航星表建立[J]. 空间控制技术与应用，2010，36(3)：43-46.
Tian Hong，Lin Ling，Hao Yongjie，et al. Build a navigation star catalog for star tracker [J]. Aerospace Contrd and Application，2010，36(3)：43-46.

[7] Volder J E. The CORDIC trigonometric computing technique [J]. IRE Trans. on Electronic Computers，1959，EC-8(3)：330-334.

[8] 郑天宇，尹达一，赵玥皎. 层叠式 SOM 神经网络星图识别算法及 FPGA 验证[J]. 红外技术，2018，40(3)：246-252.
Zheng Tianyu，Yin Dayi，Zhao Yuejiao. Laminated SOM neural network star map recognition algorithm and FPGA verification[J]. Infrared Technology，2018，40(3)：246-252.

作者简介：

刘红亮(1998—)，男，山西省吕梁市人，硕士研究生，主要从事空间光电精密测量；

钟建勇(1964—)，男，研究员级高级工程师，研究方向包括卫星星敏感器、机载星敏感器、星载相机的电路设计技术。