

本论文以获取高时间、高空间分辨率太阳磁场观测资料为目的，系统探讨了太阳望远镜最先进的导行方案——面阵 CCD 导行方案的原理、算法，并分析了这一方案的各种关键技术。本文分析讨论了两种互补的方案。在基于相关算法的局部像方案中，我们获得的主要结果如下：(1) 导行精度 $1/6$ 像元；(2) 探测器 A/D 变换精度对最终的定位精度的影响不大；(3) 填充因子对定位精度的影响不大；(4) 采用本原理的试观测取得了预期的结果。在基于质心算法的全日面方案中：(1) 提高 A/D 变换的精度能提高定位的精度；(2) 填充因子越大，定位精度越高；(3) 定位精度优于 $1/70$ 像元分辨率。两种方案各有优劣，可视不同的天文目标而采用。

面阵 CCD 导行方案带来的最大要求是大数据量的计算机实时处理能力，这一点是目前通用的天文终端设备所无法解决的，通过分析研究天文终端设备的发展历史，我们创新性地提出了将现代化的网络技术应用于天文终端设备中的一个解决方案——基于嵌入式系统的终端系统方案。本论文系统研究了基于嵌入式系统的终端设备的优势、天文应用的可行性，并开展了关键技术的攻关，建立了一套用于怀柔基地全日面磁场望远镜的实验系统，并获得了成功的试观测。由于嵌入式系统所特有的诸多优势，使得该系统在类似天文终端设备要求的领域都具有潜在的应用价值。

关键词：太阳磁场、高时空分辨率、面阵 CCD 导行、实时处理、嵌入式系统

The Guiding System is key equipment for high temporal and spatial resolution observation of solar magnetic field. This PhD thesis discusses the method, algorithm, and key techniques of the most advanced guiding system of solar telescope---guiding system based on area CCD camera. For different astronomical goal, there are two designs: One is by local image, and the other by full-disk image. In the first design, we use cross-correlation algorithm, and conclude that: (1) the guiding accuracy can reach $1/6$ pixel size of CCD camera; (2) the A/D convert accuracy of camera does not affect the pointing accuracy too much; (3) filling factor of camera does not largely affect the pointing accuracy too; (4) we set up an experiment system and get the expected test observation. For the second design, we calculate the center of mass as guider. The results are as follows: (1) guiding accuracy can be increased by the increase of A/D convert accuracy; (2) the larger the filling factor, the higher the guiding accuracy; (3) the guiding accuracy is better than the $1/70$ pixel resolution of CCD camera.

Each of these two designs requires high speed and large amount ability of data process, which cannot be afforded by current-used data acquirement and process system of solar telescope. For this purpose, we innovative set up a new data acquirement and process system by use of the concept of Embedded System. We reviewed in detail the advantages and possibility of astronomical applications of Embedded System. An experiment system has been set up for the full-disk solar magnetic field telescope of Huairou Solar Observing Station, NAOC, and test observation has been successfully carried out.

目录

第一章 引言	1
1.1 太阳磁场观测研究的意义	1
1.2 太阳磁场测量原理及其发展	1
1.3 太阳矢量磁像仪	3
1.4 太阳磁场测量的特点和对观测设备的要求	4
1.5 本论文研究目的与意义	5
1.6 本论文研究内容	7
第一部分 面阵 CCD 导行方案在高时空分辨率太阳磁场观测中的应用研究	9
第二章 太阳磁像仪导行方案的发展与趋势	9
2.1 太阳磁像仪使用导行系统的必要性和历史	9
2.2 太阳磁像仪导行方案——点	10
2.3 太阳磁像仪导行方案——线	11
2.4 太阳磁像仪导行方案——面	14
第三章 面阵 CCD 导行——局部像导行方案	17
3.1 算法描述（基于 25 点曲面拟合）	17
3.2 局部像导行的关键技术	18
3.3 模拟	24
3.4 模拟结果与讨论	28
3.5 实测结果与讨论	29
3.6 结论	33
第四章 面阵 CCD 导行——全日面像导行方案	35
4.1 引言	35
4.2 基于质心算法的全日面导行方案	35
4.3 基于质心算法的全日面导行方案的模拟	36
4.4 结论与讨论	44
第五章 局部像导行方案和全日面像导行方案的比较	47
第二部分 嵌入式系统在高时空分辨率太阳磁场观测中的应用研究	51
第六章 太阳磁像仪终端系统的发展	51
6.1 基于照相系统的太阳磁像仪终端设备	51
6.2 基于商用 CCD 的太阳磁像仪终端设备	52
6.3 基于科学 CCD 的太阳磁像仪终端设备	54
6.4 传统终端设备的不足及新一代终端设备	64
第七章 新一代终端设备——嵌入式系统在太阳磁场观测中的优越性	67
7.1 传统终端系统开发时存在的问题	67
7.2 嵌入式系统	69

7.3 可编程片上系统 (SOPC)	70
7.4 天文上应用 SOPC 的可行性	72
第八章 基于 SOPC 的全日面磁场望远镜的终端系统	75
8.1 以太网在天文上观测的应用	75
8.2 ALTERA 公司的 SOPC 解决方案	77
8.3 全日面磁场望远镜终端系统	81
8.4 总结与讨论	91
8.5 嵌入式系统在天文观测中的应用前景	94
第九章 结束语	97
致谢	99
参考文献:	101

第一章 引言

1.1 太阳磁场观测研究的意义

在茫茫宇宙之中，太阳与人类的生活息息相关。这种联系并不仅仅表现在科学的层面上，而且覆盖了人类社会政治、经济、军事、人文等各个方面：对于天文学而言，太阳是唯一一颗可被精细观测（高时空分辨率、高偏振精度成像观测）的恒星；对于基础科学而言，太阳巨大的高温等离子体环境，提供了地球上无法模拟的巨大的磁流体动力学实验室；随着人类高科技和航天技术的飞速发展，日地空间环境的异常变化对人类的影响也越来越大，而太阳活动是日地空间环境的主导因素，因此太阳物理研究为空间天气学研究提供了理论基础；太阳提供了一个唯一的行星系统，其中理性生命得以繁衍，因而太阳也是宇宙中生命起源研究的最佳样本，太阳和太阳系研究，其对宇宙中生命起源、人类地外可居住性研究的重要性越来越为科学界所重视。综上所述，太阳物理研究对人类社会有着十分重要的意义。

除了中微子等极少数事例，地球所受太阳的影响主要来自于太阳表面（光球、色球、日冕、日球）的现象和过程，而太阳表面的一切现象和过程均受太阳磁场调控，因此太阳磁场的观测研究一直是太阳物理研究的主要和前沿领域。

1.2 太阳磁场测量原理及其发展

太阳磁场的测量归功于 1896 年 Zeeman 效应的发现，即磁场能够引起单色谱线分裂的理论。1908 年，Hale 根据这一原理利用高分辨率光谱仪和偏振分析器组成的太阳磁场观测仪器，观测到来自太阳黑子区域的单色光谱线有明显的分裂，进而推算出太阳黑子的磁场强度达 2000—3000 高斯^[1]。法国太阳物理学家 Lyot 和 Ohman 分别于 1933 年、1938 年发明了双折射滤光器，从而第一次获得太阳的二维单色像^{[2][3]}；1952 年，Babcock 父子利用光电原理，成功地解决了弱磁场的测量问题，使太阳磁场的研究从黑子区域扩展到整个日面^[4]；1960 年，前苏联克里米亚天文台的 Stepanov 等人又发明了能够测量太阳横向磁场的光电矢量磁像仪^[5]；1968 年，Beckers 首次将双折射滤光器用于太阳磁场测量，在同一时间内得到太阳视面磁场图像，大大地提高了望远镜的时间分辨率^[6]。进入上世纪七、八十年代，二维光谱仪（同时获得光谱信息和二维空间信息的仪器）的重要性越来越为太阳物理学家所重视，为此，法国天文学家 Mein 等人研制了

MSDP 光谱仪 (Multi-Channel Subtractive Double Pass Spectrograph)^[7], 中国太阳物理学家艾国祥等人提出多通道滤光器的概念并于九十年代研制成功^{[8][9]}, 从而实现了对太阳磁场的准三维观测。

根据原子光谱理论, 在无外磁场作用时 ($B=0$), 原子在高能级和低能级之间跃迁时, 便发出频率为 ν_0 的单色光; 当存在外磁场时 ($B \neq 0$), 处在磁场中的原子能级将发生空间量子化, 从而相应的发射线也将分裂出子线, 这就是 Zeeman 分裂子线。相应的, 如果是谱线被原子吸收而发生的从低子能级向高子能级的跃迁就是逆 Zeeman 效应。太阳磁场观测通常采用简单的、只有三分裂的谱线, 即谱线在外磁场中分裂为三条子线: 一条 π 子线, 分裂后波长 λ_0 不变; 两条 σ 子线, 其波长在分裂后则漂移到 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ 。这种特殊的三分裂称为正常 Zeeman 三分裂, 其裂距 $\Delta\lambda = 4.67 \times 10^{-13} g \lambda^2 B$, 式中 g 为磁敏因子, B 为以高斯为单位的磁场强度, λ 是以埃为单位的无磁场时的单色光波长。

上述原子光谱理论讨论的是纯发射线和纯吸收线的情况, 但实际上, 由于光线通过的太阳大气物质不断吸收辐射又不断发生辐射, 从而形成了所谓的太阳夫琅和费谱线。夫琅和费谱线的 Zeeman 分裂子线的强度和偏振状态不能借用上述两种情况简单推测, 而必须建立磁场存在时的谱线辐射转移方程, 并在某些假定条件下求解, 得到 Zeeman 分裂各子线的强度与偏振状态。通常, 人们采用 Stokes 参数来描述夫琅和费谱线的真实状态。

Unno 在 1956 年首先得到一套 Stokes 参量转移方程^[10], 并在假定磁场为均匀、谱线为真吸收以及线吸收系数与连续吸收系数之比与深度无关等条件下, 求得理论 Stokes 轮廓, 为现有的天体磁场测量奠定了理论基础。Unno 在最初的求解 Stokes 参量转移方程的过程中, 没有考虑磁光效应引起的偏振面的旋转。1962 年 Rachkovsky 对此进行了改进, 加入了代表磁光效应的系数, 建立了 Unno-Rachkovsky 方程组^[11]。Unno 方程组和 Unno-Rachkovsky 方程组为处理现有的斯托克斯参量仪在取得四个 Stokes 参量的观测资料后进一步处理的理论基础。在此之后不少太阳物理学家从事此方向的研究, 例如 Jefferies, Lites 和 Skumanich 从经典力学的角度对 Stokes 参量的辐射转移做了细致的推导和描述^[12], E. Landi Degl'Innocenti 从量子力学的角度对偏振光的辐射转移做了更为精确的推导和描述^[13]。

1.3 太阳矢量磁像仪

磁场测量的任务是测定磁场向量 $\mathbf{B}$ (B , γ , x) 的三个要素, 即磁场强度 B , 磁场向量与视线的夹角 γ , 以及横向磁场的方位角 x 。通过 Unno 方程组和 Unno-Rachkovsky 方程组的描述, 我们知道, 只要测出 Stokes 参量的值, 便可推算出磁场向量 B , γ 和 x 。因此就实质来说, 磁场测量就是一种光的偏振测量。尽管现有仪器各有特色, 他们的基本原理是相似的, 即先让望远镜将来自太阳的光线通过偏振光分析器和分光系统, 得到处于不同偏振状态的太阳图像, 组成不同的 Stokes 参量组合, 然后从这些组合中把各个 Stokes 参量解出来, 再通过求解 Stokes 参量转移方程, 进一步得到磁场向量的 B , γ 和 x 三个要素。

目前世界上测量太阳向量磁场的仪器主要有两大类型: 滤光器型和光谱仪型。属于前者的有国家天文台怀柔观测基地的多通道太阳望远镜, 美国大熊湖天文台、美国马歇耳空间飞行中心的向量磁像仪, 日本国立天文台的太阳耀斑望远镜等; 属于后者的有美国夏威夷大学 Mees 天文台的斯托克斯参量仪、美国高山天文台的斯托克斯参量仪 ASP 等。

怀柔多通道太阳望远镜包含几套相似的矢量磁像仪, 具有代表性的是 35cm 太阳磁场望远镜, 其偏振光分析器如图 1-1 所示, 包括一个 $\lambda/4$ 波片, 一个用来调制偏振状态的 KD^*P 电光晶体, 其后还有一个光轴方位角为 0° 的偏振片。 $\lambda/4$ 波片位于偏振分析器的最前面, 根据观测太阳横场或纵场的实际要求, 确定它是否进入光路。偏振分析器的工作原理是: 通过光路中偏振元件的不同组合状态, 只让 Stokes 参数中一种偏振光完全通过, 与之正交的偏振光被吸收。磁场望远镜的具体观测模式如下: 不用 $\lambda/4$ 波片, 只用 KD^*P 调制器时, 获得 Stokes 参数 V ; 当 KD^*P 调制器前加上光轴为 0° 或 45° 的消色差 $\lambda/4$ 波片时, 可以测得 Stokes 参数 Q 或 U 。从 Q 、 U 和 V 可以求出纵向磁场的大小 $B_{\parallel} = C_{\parallel}V$, 横向磁场的大小 $B_{\perp} = C_{\perp} (Q^2 + U^2)^{1/4}$, 横向磁场的方位角 $\varphi = 0.5 \text{tg}^{-1}(U/Q)$ 。其中, $C_{\parallel}$ 和 $C_{\perp}$ 分别为纵向磁场和横向磁场的定标系数, 可以通过求解上节的提到的辐射转移方程得到^[11], 也可以通过实测作经验定标^[14]。

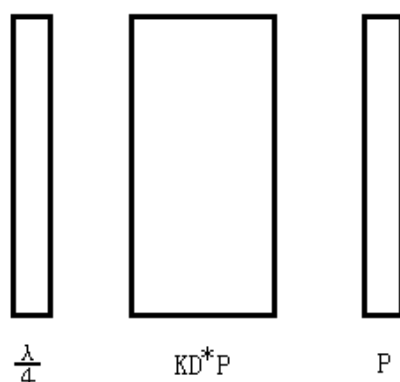


图 1-1 偏振光分析器的组成

1.4 太阳磁场测量的特点和对观测设备的要求

通过前面的描述，以及太阳物理研究的其他特性，我们可以总结出太阳磁场测量的一些特点，以及由此产生的对太阳磁场测量设备的要求。

高时间分辨率、高空间分辨率、高偏振精度观测是天文学家永远追求的主题，但是在很多时候这些要求是互相制约的。高空间分辨率观测首先要求望远镜的跟踪精度稳高、地球大气湍动影响小（地球大气的“冻结”要求毫秒量级）。其次，高时间分辨率意味着观测时间要尽可能地短（秒量级以下），这在一定程度上也是符合高空间分辨率要求的，因为时间越短望远镜的不稳定性和地球大气的湍动影响越小；但另一方面，在偏振测量的前提下，虽然太阳本身是一个强源，但与磁场有关的有效光量仍然是非常微弱和有限的，所以时间分辨率和空间分辨率并非无限制的。最后，弱磁场信号在背景信号强度的千、万分之一的量级，现有的磁像仪系统在短时间曝光的情况下根本无法达到这一要求。以具有国际先进水平的太阳磁场望远镜为例，在单帧采样时间 20ms 的情况下，信号比噪声大约大 70 倍左右，只能测到百高斯以上的强磁场；要想测到 10 高斯以下的弱磁场，需要 256 帧以上的叠加，也就是说提高磁场测量精度要求长时间积分。这就和高时、空分辨率产生了矛盾。由于通常情况下我们优先考虑偏振精度，这就对望远镜控制系统提出了很高的要求；在望远镜控制系统不能满足要求的时候，图像采集和处理系统就应该具有补偿功能，比如相关跟踪（硬件的或者软件的）等，这就要求磁场测量设备的终端系统（图像采集、处理、存贮系统总称）具有比一般天文观测系统高得多的处理能力。

磁场测量对处理能力的高要求还来源于另一个方面。在上一节关于太阳磁场望远镜磁分析器的介绍中我们知道，每一个 Stokes 参数实际上需要两次测量才能完成，但我们并不主张采用前 256 帧叠加的完成一次测量，后 256 帧叠加的完成另一次测量的观测模式（国际上有采用该模式观测的，但事实证明这种模式无法达到 10 高斯以下的高偏振精度）^[15]。因为与太阳弱磁场相伴随的是快速变化的太阳特征结构，如磁元^[16]、网络内磁场^[17]等等，就算已经完全消除了望远镜跟踪误差和大气抖动的影响（比如空间望远镜上，没有大气抖动，对地基望远镜而言，假设本身并不成立），太阳结构的变化也使得偏振精度大大下降^[18]。太阳磁场望远镜的解决方案是：KD*P 方波电压的调制频率与 CCD 采样速率一致，也就是说奇数次和偶数次的测量分别对应 Stokes 参数的一次测量，在图像处理器中，每一帧奇次采样和它相邻的偶次采样处理得到一个 Stokes 参数，这样得到的一系列 Stokes 参数测量值再作叠加得到高灵敏度的磁图。因为这些处理都要求实时完成，因此对终端设备的数据处理能力的要求是远远高于一般天文观测的。

总结起来，由于太阳磁场观测所要求的高时空分辨和高偏振精度的特点，其观测设备应当具有高精度的跟踪能力和高速数据处理能力。

1.5 本论文研究目的与意义

本论文以获取高时间、高空间分辨率太阳磁场资料为目的，结合当代太阳物理研究的需求和现代高科技水平，研究可用于多通道太阳望远镜和其他类似设备的望远镜导行方案和图像终端设备。

多通道太阳望远镜(MCST)如图 1-2 所示，共有五个部分组成：60CM 九通道太阳望远镜(NCST)(1994 年建成)、35CM 太阳磁场望远镜(SMFT)(1986 建成)、14CMH α 望远镜(1990)、10CM 全日面磁场望远镜(1990)、8CM 全日面望远镜(1990)。多通道望远镜以二维太阳光球、色球矢量磁场和视向速度场为主要观测内容，为太阳磁活动的研究提供实测基础，为日地关系、空间天气监测提供实时警报，并在太阳活动周、磁场内禀性质、三维磁结构等太阳物理前沿课题的观测研究中发挥重要作用。十多年来，该望远镜积累了大量的科学资料，并由此造就了一个在国际太阳物理领域占有重要地位的学术团体：以该望远镜资料发表的 SCI 论文已经超过 200 篇；在早期创业中，产生了中科院院士一人，研究员十数人；近十年来，还培养了一大批优秀中青年科研骨干，其中创新工程首席科学家和研究员近十人；建立了广泛的国际合作，中美、中日的国际合

作项目已经开展了 10 多年。在当前的知识创新大潮中，太阳磁场望远镜及其相关的科研团体继续保持着强劲的发展势头和高的科学产出。

该望远镜设计建造于上世纪七、八十年代及九十年代初，电子和终端设备采用的是当时先进的元器件，但随着现代高科技的飞速发展，这些设备目前已经大大落后于先进水平了，因此仪器的更新改造势在必行。但另一方面，由于望远镜采用真空折射式设计，结构非常紧凑，很难从硬件上进行大的改动，例如当今太阳塔式望远镜和新建造望远镜所常采用的相关跟踪器、自适应光学系统等很难应用在多通道望远镜上。因此本论文将结合该仪器的特点和现代高科技水平，对望远镜电子设备中可进一步提高时间和空间分辨率的导行系统和图像系统进行研究，以期进一步提升该望远镜的国际竞争力。

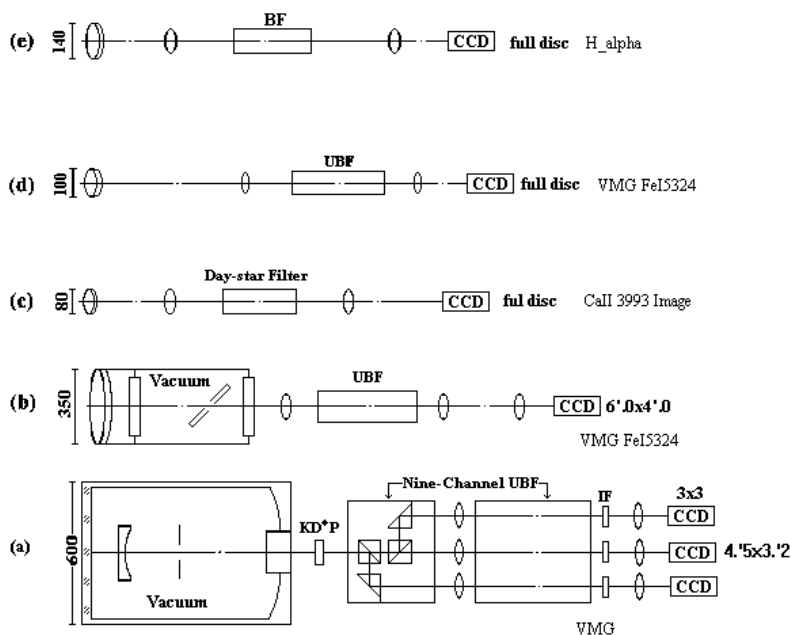


Figure 1. Sketch of the Multi-Channel Solar Telescope

BF: birefringent filter UBF: universal BF
KD*P: KD*P modulator IF: interference filter

图 1-2 多通道望远镜光学系统概图^[30]

1.6 本论文研究内容

本论文包括相互关联的两方面内容。第一部分内容以提高太阳磁场观测的空间分辨率为目的，研究了可应用于多通道望远镜上、远远优于传统方案的面阵 CCD 导行方案；第二部分是满足面阵 CCD 导行方案对终端设备的实时处理能力的要求，为了提高望远镜的时间分辨率，我们进行了新型图像处理系统的研究，重点研究和讨论了目前最灵活的基于 FPGA 软核处理器的嵌入式系统方案。

在导行方案研究中，我们重点讨论了可实际应用于多通道望远镜中的两方案，分别是基于相关算法的太阳局部像导行和基于质心算法的太阳全日面像导行。对于两种方案，我们着重讨论了其中的关键技术，并分别进行了计算机模拟。此外，关于局部像导行方案，我们还进行了实验观测并得到很好的结果。

无论采用以上哪种方案，都需要强大处理能力的终端系统。传统的太阳磁场终端系统基本上只具备简单的、只为磁像仪观测（本章第三节所述的）服务的处理能力，而无法完成导行系统所需的处理。为此，一个简单的解决方案是研制独立的导行系统，这样使得设备总体变得更为臃肿，此外，算法所需要的数据还要来源于图像设备，因此在通讯协议方面又增加了复杂性。为了克服这些不利因素，我们在研制了传统的新一代太阳磁场观测设备终端系统的基础上，进行了嵌入式系统在太阳磁场观测中的应用研究，并由此提出了一个新的太阳磁场测量终端系统概念——基于可编程片上系统（SOPC）的终端系统。作为应用实例，我们研制了基于 SOPC 的多通道望远镜中全日面磁场望远镜的终端系统。

第一部分 面阵 CCD 导行方案在高时空分辨率太阳磁场观测中的应用研究

第二章 太阳磁像仪导行方案的发展与趋势

2.1 太阳磁像仪使用导行系统的必要性和历史

太阳观测的高空间分辨率是其他天文观测所不具备的优势之一，也正因为此，导行系统成为太阳望远镜中广泛使用和必不可少的附属设备。太阳观测中使用导行系统主要有以下几方面原因：1. 望远镜极轴精度所带来的系统误差；2. 齿轮的准周期误差^[19]；3. 望远镜应力弯曲（特别是对于大的望远镜）；4. 日轴方位角变化（ $\text{MAX}=1''/\text{min}$ 在春分秋分点）；5. 在早晚时候，地平线上大气折射率随高度的变化快，从而导致太阳视方位的变化。以上所有这些误差都会带来望远镜恒动跟踪误差，需要实时校正。

对于太阳的磁场观测，由于磁场信号相对其背景信号很弱，现行的磁场观测方法要求观测时用较长的曝光时间换取磁场灵敏度的提高，在这种情况下，如何保证望远镜的长时间稳定更是一个重要课题。

随着观测研究需求的提高和科技水平的不断进步，太阳望远镜的导行模式经历了一个点...线...面的辩证发展过程。早期传统的太阳导行方案采用太阳的一点或者几点作为导行目标，其中以所谓四象限法为典型代表，优点是结构简单，响应速度快，但精度有限，是上世纪 90 年代以前太阳望远镜所采用的通用导行模式，怀柔多通道望远镜使用的就是这种模式；上世纪 80 年代以后，随着线阵探测器技术的完善和计算机处理能力的提高，线阵 CCD 导行技术开始运用于观测中，例如西班牙卡那利岛上的德国 GCT^[20]，以及日本的 YOHKOH 卫星^[21]等等，我国曾经研制的球载望远镜也是用这种设计；面阵 CCD 导行方案由于要求更高的实时处理能力，最早使用于空间观测中，例如 SOHO^[22]，近年来开始在一些在研的设备中使用，遗憾的是目前还查不到实际使用的文献。

面阵 CCD 导行方案由于其特有的高精度，将是今后太阳望远镜导行方案的主流。另一方面，此方案所要求的高实时数据处理能力也由于计算机技术的飞速发展而得到解决。基于这样的背景，结合怀柔太阳望远镜更新改造需求和今后发展的考虑，我们开展了面阵 CCD 导行方案的应用研究。以下我们先通过一

些实例对各种方案做一个简单的介绍与分析

2.2 太阳磁像仪导行方案——一点

传统的太阳导行方案采用类似如下的方法：硅光电池均布于全日面太阳像边缘的 4 点，当太阳像偏移时，光电池接收到的信号将不平衡，根据这个不平衡量反过来调整望远镜的控制系统，从而使偏移的太阳像回到正确位置。如图 2-1。1986 年建成的怀柔太阳磁场望远镜采用的就是上述方案，如图 2-2 所示，在太阳像的边缘均匀布置四个光电池作为导行系统的检测元件，通常称为四象限探测器。假设太阳像的亮度均匀，形状对称，那么，调整光电池的位置，能够使得太阳像相对它们的能量输出平衡，即没有输出信号。当太阳像偏移到某一边时，该方向上的信号输出失去了平衡，一边增强，另一边减弱，因而产生了输出。该输出信号通过控制电路驱动望远镜向相反的方向运动，直到四相限探测器的输出信号再次平衡为止，这样就完成了一次导行过程。

这个方案的代价就是在平衡点附近会频繁切换方向，造成望远镜的震动。为了减少这个震动，只能设定一个门限，当误差超过此门限值后，才驱动望远镜。但门限值的引入造成要控制的偏移量受到太阳光强的影响。光线较强时，太阳像移动很小的距离就会产生足够的误差电平；而当光线很弱时，就需要移动很大的距离才能产生足够的电平。可见，这种方案存在原理性缺陷。理想的导行方案应该在各种光强下都能得到近似的定位精度。所以当时的方案设计者引入了对数放大器，对光强做对数变换后再进行检测。这样，在很大程度上减小了光线强度对导行精度的影响。这种导行方案在最好的天气和最好的仪器状态下，跟踪精度可以达到 1 角秒(")左右^[23]。

该方法简单易行，对技术要求不高，所以广泛应用于传统太阳望远镜上。但是，随着太阳物理学家对太阳磁场测量要求的提高，这一方法的局限性也越来越突现出来：精度低，无法满足现代太阳物理学家亚角秒空间分辨率的观测要求；受天气影响较大，要求无云或者均匀的薄云层天气，这一要求极大地降低了导行系统的使用效率；此外还受太阳像大小的影响，需要随季节变化而调整系统；放大器的增益不匹配也会带来系统差；另外由于整个系统是由模拟电路构成的，很难把智能元件加到控制系统里面，导致该方案缺乏必要的保护。例如：应用了对数放大器虽然解决了太阳光强变化影响导行精度的问题，同时导致当探测器没指向太阳时会产生输出，这就带来望远镜失控的安全隐患。

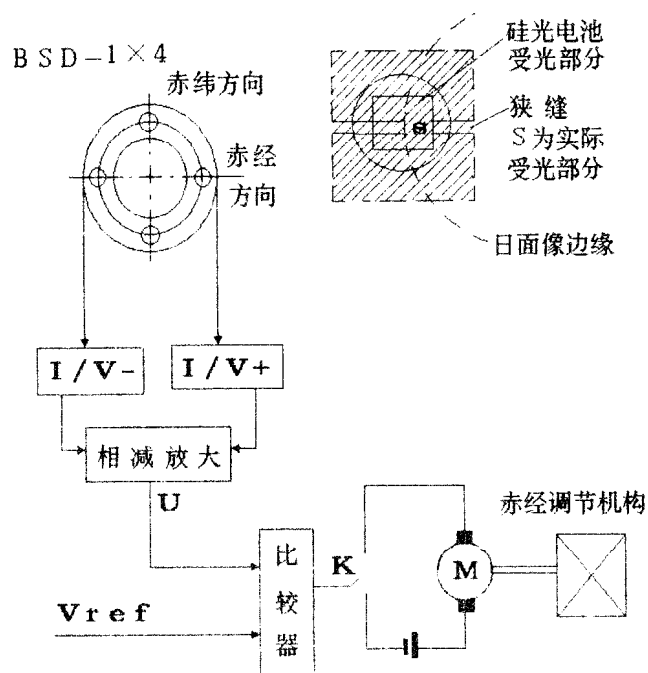
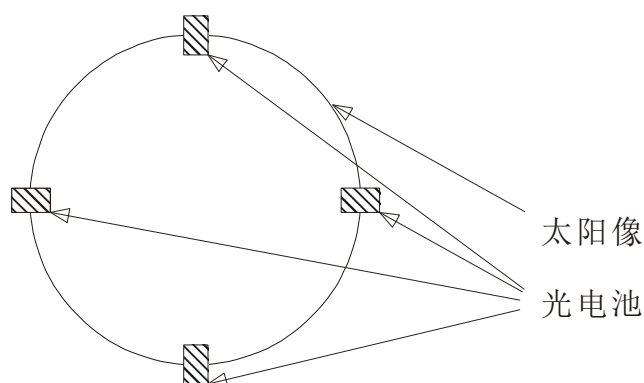
图 2-1: 传统日光导行系统误差处理示意框图^[23]

图 2-2: 怀柔的多通道望远镜的导行方案

2.3 太阳磁像仪导行方案——线

四相限探测器的局限是只能指向太阳的中心，当主望远镜需要指向日面上某个位置时，还需要附加的机械装置将主望远镜同导行镜产生一个相对转动，使两者指向不同的方向。某些场合需要减轻重量，比如空间应用，或者要求导行镜能指向任意的位置，这个方案就不合适了，因而需要用到新的导行方案。

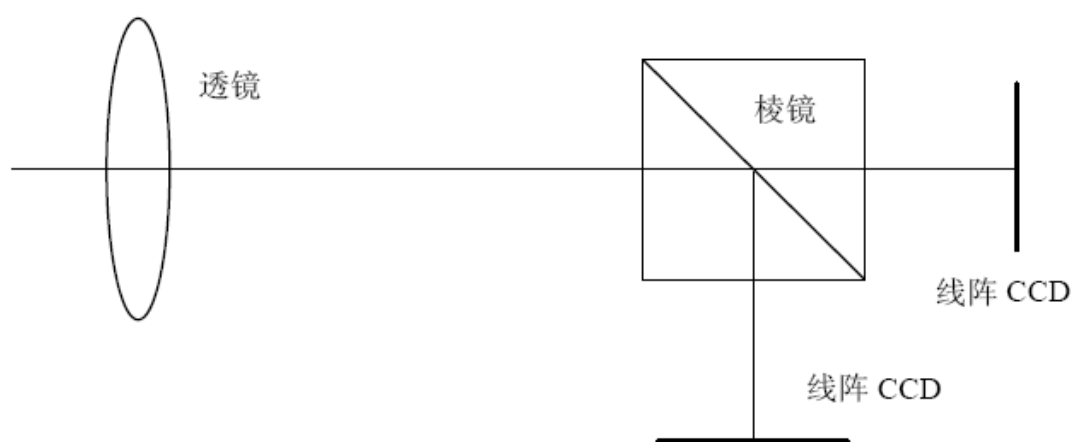


图 2-3: 北京天文台球载太阳望远镜导行镜光路图

太阳光被透镜会聚后经棱镜分为两束，被正交的两个线阵 CCD 接收，通过计算质心得到太阳的位置。

图 2-3 是原北京天文台研制的球载太阳望远镜的导行系统光路图。为了减轻重量，简化设计，导行镜的指向方向同主望远镜指向相同。为了使主望远镜能观测太阳上不同的区域，要求导行镜也具有指向日面任意位置的能力。导行方案应用了两个正交的 2048 点的线阵 CCD，当太阳像成在 CCD 上时，通过求两个 CCD 的质心位置来计算太阳的位置^[24]。

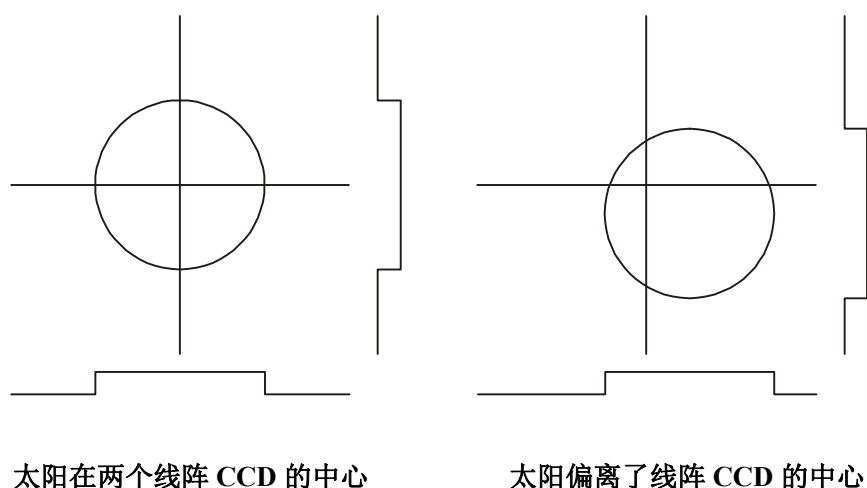


图 2-4: 两个线阵 CCD 的导行方案示意图

该方案的优点是算法简单，计算量小。具有较大的定位范围，允许导行镜指向日面非中心的区域。但是如果导行镜指向日面边缘时就会有一个方向的线

阵 CCD 接收不到太阳光，这时算法就失效了。所以该方法有一定的限度，即导行镜指向的日面方位不能偏离日心太远，无法使主望远镜的观测范围覆盖全日面。解决这个问题一个显而易见的办法就是多设几条线阵 CCD。把线阵 CCD 做井字形排列，如图 2-5 所示。使其在全日面的观测范围内，太阳像至少会照射到一条线阵 CCD。

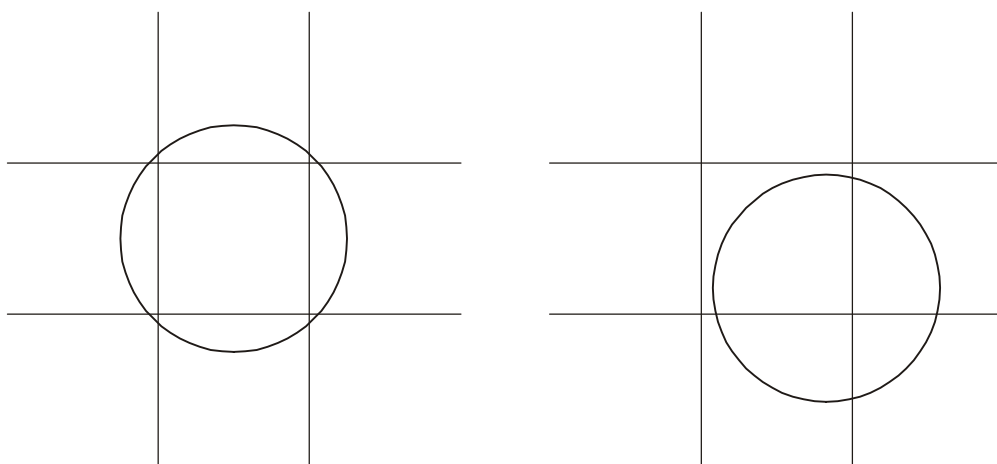


图 2-5: 井字形排列线阵 CCD 解决了视场的问题

但是通过计算发现市面上没有符合要求的线阵 CCD (主要是机械尺寸无法满足)。改进后的导行方案是用一块大面阵的探测器 (2048*2048)，从该探测器上抽出 8 行和 8 列进行中心计算，这样就可将该导行镜指向日面上任意位置。如图 2-6。市面上常用的探测器主要有 CCD 和 CMOS 探测器。由于 CCD 只能选行读出而不能选列读出，成本也的高得无法接受。所以这里可用的只有可以在任意点读出的 CMOS 探测器。该方案的优点是去掉了棱镜，简化了光学系统，并且可以指向太阳上任意位置。缺点是使用大面阵的探测器导致制造成本太高，大面阵的探测器使用效率太低 (只有几行和几列)，其高昂的成本不是一般中小型地面设备能承受的。遗憾的是，由于种种原因该方案未能在球载望远镜上进行试验，准备作为 SST 导行的备选方案^[25]。

线阵的方案同样对天气的要求高，可能很小的一片云，如果正好成像在参与运算的像素上，就可能对结果产生很大的误差。所以在地面上应用时，可用的场合同样受到限制。此外，黑子等反差太大的结构也会对其产生同样的影响。

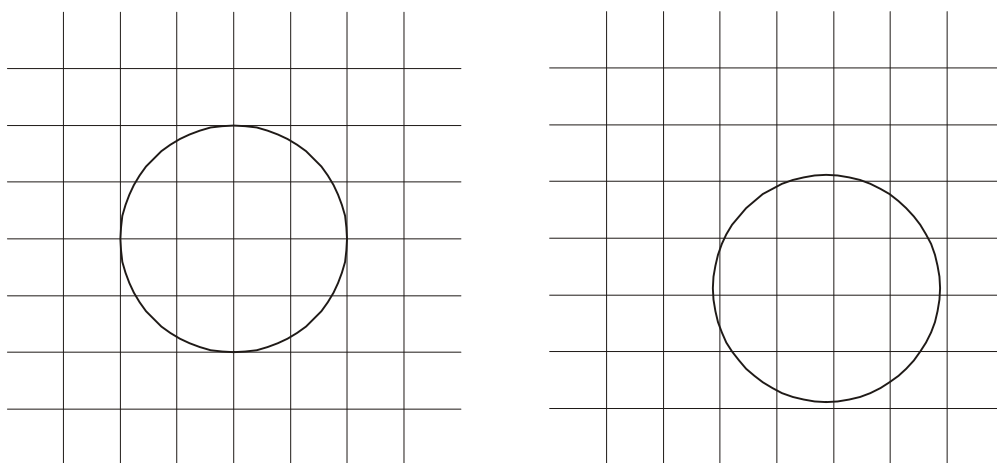


图 2-6: 用大面阵的探测器实现的线阵方案

大面阵探测器的参与计算的几条线，太阳在移动后在面阵上的投影

2.4 太阳磁像仪导行方案——面

通过上面的叙述我们知道，虽然线阵 CCD 方案较传统的四象限法有了很大的改进，但是它仍然只采用了观测对象（太阳）的极少部分进行导行，因而仍然不能完全真实地反映观测目标的信息，从而无法解决云、太阳本身大反差结构的影响。如果采用面阵器件导行，则无疑在这些方面会有很大的改善。面阵探测器导行的优点在于可以得到极高的导行精度（在机械与控制系统满足要求的前提下），而且不受季节变化影响，对天气条件的要求也降低很多，是新一代太阳望远镜理想的导行方案。

根据使用目的的不同，面阵探测器导行方案又可以分为以太阳恒动跟踪为目的的全日面导行和以锁定观测对象（通常是太阳的一个局部）为目的的局部像导行。对于后者而言，现代太阳观测中所用的自适应光学、主动光学、相关跟踪器等等均可归入这一类，这些技术的使用都需要专门的光学和机械系统，适用于新建造的望远镜或者象开放式的太阳塔那样的空间结构松散的仪器，无法使用在怀柔的多通道望远镜这样的结构紧凑、光学和机械均无法做大的改动的设备中。要在这类设备中使用局部导行方案，现实可行的方法是依据数据的实时处理，然后将结果反馈到电动控制部分（这部分是有改动的提高潜力的）从而实现导行目的。采用这种方式以后，实际上全日面导行和局部像导行的实施又回到了机会同样路线上。

我们知道，面阵器件的使用面临的最大问题就是处理速度问题，这正是多

年来人们无法使用面阵 CCD 导行的最大障碍，只有借助于近年来电子技术的飞速发展，才使得这一方案有了在普通望远镜上实施的可能。但即使如此，有关算法选择、器件选择等关键技术仍缺乏成熟的经验，需深入研究。

近年来，依托球载太阳望远镜研制、多通道望远镜更新改造、“863-2”太阳地基光学监测系统及红外磁像仪预研究等项目，我们进行了新型导行系统的研究。结合这些项目的特点，选择了两种适合于我们仪器特点的方案，一种是基于相关算法的太阳局部特征导行，另一种是基于求质心算法的全日面导行。前者是将太阳上的一个有特征的区域作为目标，首先确定该特征的位置，然后将以后得到的位置同该位置相比较，进行修正；后者是将全日面像作为一个整体来计算质心的位置，然后根据位置信息进行修正。本论文将对这两种方案进行进一步研究。

第三章 面阵 CCD 导行——局部像导行方案

所谓的太阳局部像导行，就是对太阳上的一个局部区域进行跟踪，根据其位置变化进行望远镜跟踪控制。具体做法是，先采一幅图作为原始图像（参考图），以后（一段时间内）采到的图像（目标图）与其相比较，通过比较计算出该图与参考图的位置偏差，将这一个偏差值反馈到望远镜的跟踪系统中进行修正从而达到导行的目的。

交叉相关（Cross-correlation，或者叫做互相关）算法是天文观测中求两幅相似图像位置偏差的通用而且已被证明是非常有效的算法，在太阳观测中广泛应用于实时相关跟踪器（Real-time Correlation Tracker）和各种高阶图像改正（自适应光学、像复原等）的预处理中。因此我们研究的局部像导行方案也是基于相关算法的。

本章中，我们首先探讨了局部像导行方案的算法描述，这一点直接关系到导行系统的响应速度和精度；其次，我们研究了该导行方案中的一些关键技术；接下来我们对方案进行了模拟；并对模拟结构进行了总结和讨论；最后，我们还给出了一些试观测结果。

3.1 算法描述（基于 25 点曲面拟合）

通常我们用快速傅里叶变换方法（FFT）计算交叉相关：

$$COR_n(Y, Z) = IFFT(FFT(a) * FFT(b))$$

此处，COR 为计算后的相关系数，a 为参考图像，b 为活动图。理论上，当 a 和 b 是真实图像时，COR 应该是实数，只要找到 COR 的最大值点，就知道了目标图相对于参考图偏移的像素值；进一步，在该最大点周围取 5*5 像元的子图，用曲面拟合还可以确定亚像元的偏移量，因此用这个方法可以确定小于一个像元的移动，其精度理论上优于 1/32 像元^[26]。但在实际的计算中，由于数值计算有精度误差，COR 常常还是一个虚数（虚部很小），这种情况下就要找 COR 的模的最大值点。

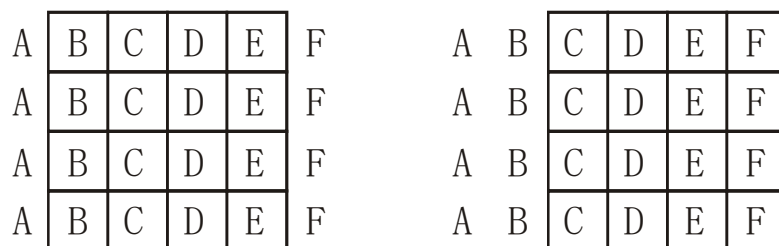


图 3-1：图像移动的示意图

图像移动后会带来新的像素，同参考图不完全相同，由此带来曲面拟合的误差

关于该方法的亚像元精度，此处还需做一个补充。如果两幅图完全相同，那么它们移动后的互相关的曲面应该是完美的对称图形。但是应用在太阳观测时，因为视场很小，所以图像移动后，参考图与活动图由于边缘像素的影响，两幅图就不是简单的平移了。所以互相关的计算结果就不是完美的中心对称了，有了很小的误差，两幅图不相同的部分就会给曲面拟合带来误差，如图 3-1 所示。所以在实际应用上，这种方法对具体的观测目标究竟能达到多高的亚像元定位精度，还需要做深入的评估。

3.2 局部像导行的关键技术

上面我们给出了利用太阳局部像导行的基本原理，而要实现这一方案，在技术还需要解决一些关键问题，例如响应速度、特征结构的选择等等。本节将就这些问题一一加以讨论。

3.2.1 响应速度

因为 FFT 算法的计算规模是 $N \cdot \log_2(N)$ ，此处 N 是像元素，所以当采取较大面阵的探测器时，计算量将大大增加，从而影响导行速度。在目前条件下，考虑到处理能力的限制选择 32×32 像元的面阵探测器是比较合适的。关于这一点，下文还有进一步介绍。

3.2.2 太阳特征结构选择

特征结构的选择是该方法成功的第一步，因为如果太阳没有任何细节的话，根据前面的相关公式得到的结果就成为各点相等了，所以相关在这种情况下就

起不到判断相对唯一的作用。在地面上可观测的和不可观测的太阳现象如图 3-2 所示。图中斜线左面的部分是在地面上可以被观测到的太阳特征。

为实现自动化的连续观测有下面几个因素需要考虑，第一是普遍性，就是该目标应该不是特殊现象，太阳上应该总是存在，当望远镜指向太阳上任意位置时都应该存在这种结构。第二是稳定性，就是随时间变化不大，不应该选快速演变的目标，否则在需要长时间露光的场合会对相关计算带来很大的困难。第三是尺度，在探测器的视场内包含的结构应该比较丰富，才会保证相关算法的有效性。图 3-2 列出了太阳上各种现象的空间尺度与时间尺度。基于这些考虑，国际上广泛采用与光球背景共存的米粒组织作为相关探测器的目标。太阳米粒结构的特征参数如下：尺度 $1.5''$ ，寿命数分钟到数十分钟，反差 7-8% 光球背景^[27]。对于我们的仪器而言，米粒结构同样也是非常好的导行目标。

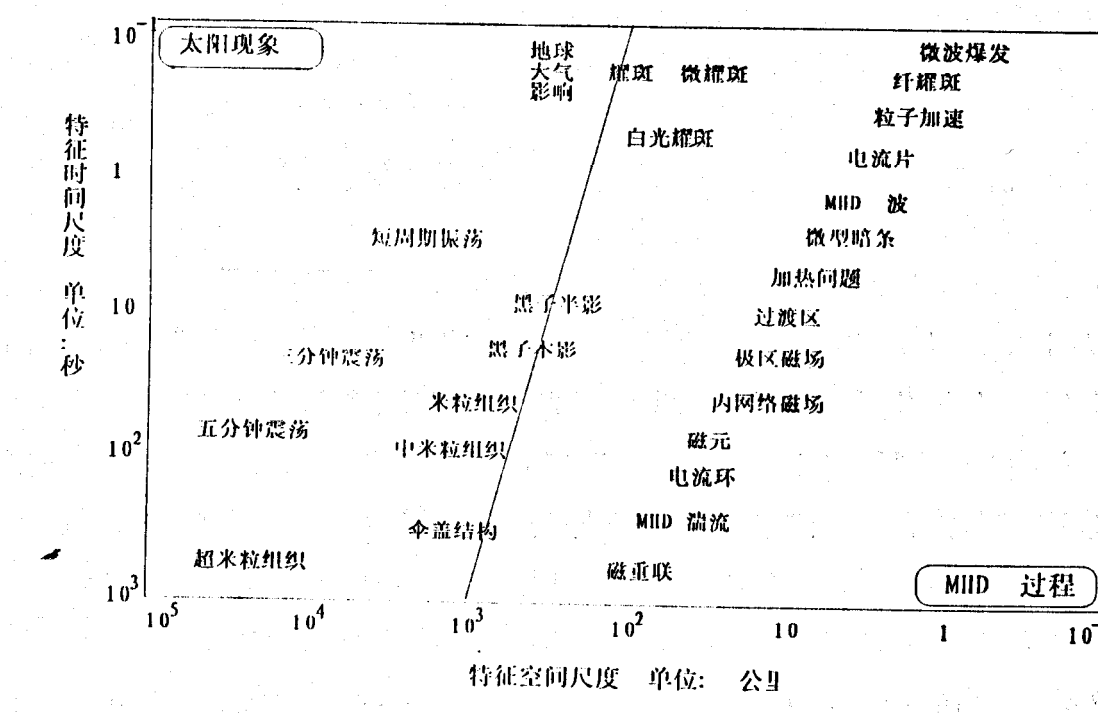


图 3-2：在地面上可观测和不可观测的太阳现象及 MHD 过程示意图^[26]

3.2.3 探测器的选择原则

这几年，电子技术发展势头迅猛，几年前 CCD 基本上可以说是唯一的选择，而现在又有了新的选择——那就是 CMOS 图像传感器。一般来说，各种探测元件都需要确定以下几个指标：动态范围（阱深），像元大小，填充因子（像元有效

接收面积占总面积的比), 读出速度, 噪声, AD 量化位数等。以下分别作一些叙述。

数组长度 n	基本的 基2 复数FFT		完全最佳·基2 复数FFT		Rader-Brenner 基2复数FFT	
	实数 乘法 次数	实数 加法 次数	实数 乘法 次数	实数 加法 次数	实数 乘法 次数	实数 加法 次数
8	48	72	4	52	4	64
16	128	192	24	152	20	192
32	320	480	88	408	68	512
64	768	1152	264	1032	196	1280
128	1792	2688	712	2504	516	3072
256	4096	6144	1800	5896	1284	7168
512	9216	13824	4360	13576	3076	16384
1024	20480	30720	10248	30728	7172	36864
2048	45056	67584	23560	68616	16388	81920
4096	98304	147456	53256	151560	36868	180224

- 用3次实数乘法和3次实数加法的复数乘法;
- 未考虑非实性质乘法 (乘 ± 1 或 $\pm i$);
- 充分应用了三角函数的对称性;

表 3-1: 不同的快速傅利叶变换算法的运算次数比较 [28]

(1) 像元尺寸和读出速度

像元大小是需要同光学系统相配合的非常重要的指标，同时要考虑到是不是可以以能够接受的代价买到，这超出了讨论的范围，此处不作深入讨论。还有读出速度，也是有下限的，比如前一帧图像要求在下一帧被读出之前读出完毕。当选择 32×32 像元时， 10MHz 像元时钟就能达到 3000F/SEC 。这个帧速率已经很高了。以至于需要有很高的处理能力才能胜任。表 3.1 是几种规模的 FFT 所需计算量的比较表。可以看出当取 32×32 点二维的 FFT 计算量约为数据量的 40 倍到 50 倍。考虑到还要进行逆傅里叶变换和找最大点等辅助性的计算，再加上如果程序不是被展成线性执行那么就会有循环，这样就也会产生附加的开销。综合以上因素，总的处理能力最少要是原始数据的 100 倍以上。因此，当像元时钟为 10MHz 时作相关运算，计算偏移的位置就要 1000MFLOPS 以上的处理能力，这在几年前还是比较难用单处理器实现的，而现在借助先进的 DSP 技术，这种要求是可以完成的，但是也需要开发者具有很高的编程水平。另外，因为计算 FFT 需要将所有的数据收集到以后才能计算，不能做到随到随处理，所以图像取到后计算程序还需要一些附加的延时。

(2) AD 量化精度与填充因子

关于 AD 量化位数以及填充因子，我们设计了一个仿真程序来研究它们对最后精度的影响。

(1) 仿真原理

程序的原理是这样的：首先假定探测器像元上的信号是同照到该像元上的光亮度相关的，在线性响应前提下，探测器像元的响应正比于照在该位置的光亮度的积分，其关系式可以写成

$$R = K \iint_S f(x, y)。$$

这里 R 代表探测器上的响应， K 为增益， $f(x, y)$ 为照到该像元上的亮度函数。如果光是均匀照在探测器像元上， $f(x, y)$ 就退化成常数了，所以我们前面谈到要选择合适的太阳特征。

为了方便起见首先我们假设像元是方形的，如图 3-3 所示粗线表示的是一个像元的边界，在这里我们做了一个合理的假设就是小格内的亮度是均匀的。这

样上面的积分就被写成了离散的形式：

$$R = K \sum_x \sum_y f(x, y)$$

这样如果知道了光在像元内的分布 $f(x, y)$ ，我们就可以模拟图像在探测器面阵上移动一个小于一个像元的距离。

图 3-3 中，大格显示了探测器的一个像元，小格的边界就是我们模拟移动的最小当量，也就是图像只能以小格为单位移动。小格内的值表示的是照到该区域的光的亮度，这些值构成了探测器像元内的亮度分布。作为合理的简化令增益为 1，并且不发生变化，这样该像元的读数就是图 3-3 所示的大格内的所有小格子的值的和。

$$R = \sum_x \sum_y f(x, y)$$

当图像以小格为单位移动时，我们可以通过重新计算被框到像元内的所有小格所代表的值之和来模拟图像移动小于一个像元的距离后的探测器像元的响应。探测器需要很多像元才能覆盖大面积的图像，同样，对每一个像元进行上述计算才能得到探测器上各个像元上的响应。

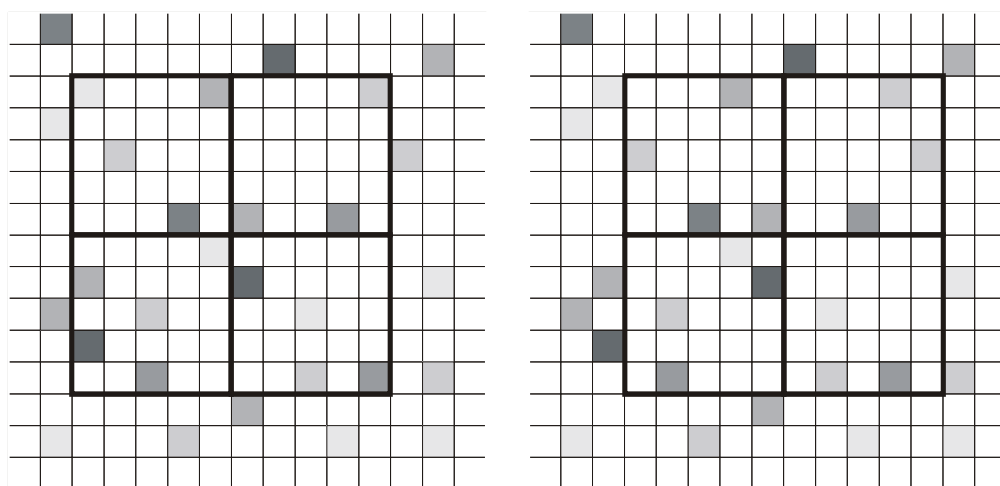


图 3-3：模拟探测器响应的示意图

示意图粗实线围住的区域代表了四个探测器像元，移动后围住了新的区域。亮度分布不同，会产生新的响应。

(2) 填充因子（Filling factor）的模拟

图 3-4 三张图分别为探测器的填充因子等于 1 和小于 1 时的情况。对阴影内的区域求和就模拟了填充因子在不同值时探测器上像元的响应。

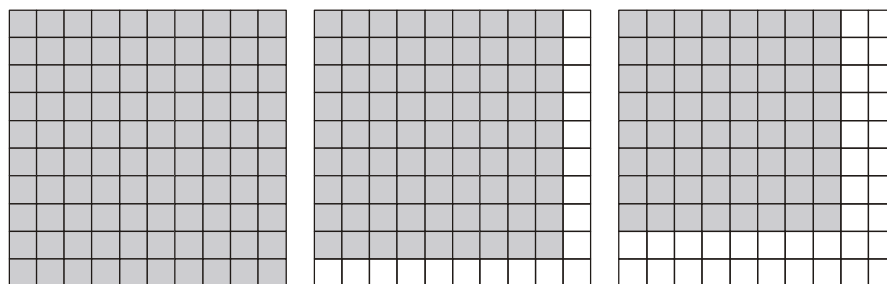


图 3-4: 填充因子为 1, 0.81, 和 0.64 的排列方法

(3) 模拟—数字转换（AD 变换）

一般来说，现在的技术很少直接进行模拟信号的计算，都是将模拟信号通过模拟—数字转换（AD 变换）转换成数字信号后再进行计算，所以我们还要考虑 AD 转换带来的影响。我们假设可以用到 AD 的所有位数，就是量化后最小值为 0，最大值为 AD 的最大值。同时假设探测器的响应和 AD 都是线性的。探测器面阵的每一点 $P(m,n)$ 的数字化后的值为：

$$P(m,n) = \text{round}((p(m,n) - \min(p)) / (\max(p) - \min(p)) * (2^k - 1))$$

Round()为取整， $p(m,n)$ 为量化前的值， $\max(p)$ ， $\min(p)$ 为所有的 $p(m,n)$ 中的最小值和最大值， k 为 AD 变换的位数。可以看出 k 越多，最后数字化后可能的数值也就越多。就 AD 变换来讲，显然位数的增多意味着精度的提高。

AD 的另一个指标就是动态范围，简单地说就是 AD 所能变换的信号范围。假设某一 AD 具有 k 位的转换精度，为了最大利用 AD 的转换精度，我们希望把一系列信号中的最小值变换为零，而把最大值变换为 $2^k - 1$ ，这样就最有效的利用了 AD 变换器的动态范围。图 3-5 是针对一条曲线的情况，假设我们要将图中所示的曲线通过 AD 变成数字信号，为了更好的利用 AD 的精度，首先要减掉最小值（把 AD 的动态范围全部应用到曲线的变化部分）然后将最大值放大到 AD 的最大值。

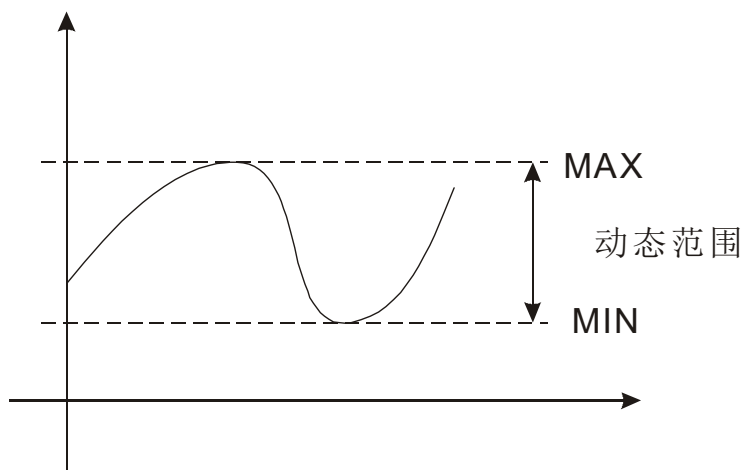


图 3-5: 最大限度利用 AD 动态范围的示意图

这张图显示了测量该信号时最大限度的应用了 AD 的动态范围。AD 把 min 变换成 0 把 max 变换成 AD 允许的最大值。

3.3 模拟

具体的模拟步骤^[29]如下:

首先要得到足够精确的亮度分布函数。我们把每个像元用 10×10 的小点来表示。这样, 很容易计算当像元分辨率为 $0.5''$ 时, 就需要一张分辨率为 $0.05''$ 的米粒组织的图。这种分辨率的图像在地面很难得到。这里我们采用的是 La Plama 天文台 SVST 的图像, 原图的像元分辨率是 $0.19''$, 用 PHOTOSHOP 三次内插得到 $0.05''$ 像元分辨率, 400×400 象素大小的太阳图像。

第二步是取得一张参照图像, 从画面中心选取一块 320×320 像素的子图, 按照 10×10 像素为单元合并起来, 就得到了一张 32×32 的合并以后的图像。把它作为参照图。

接下来是模拟望远镜的晃动, 因为我们的目的是考察相关方法对于小于一个像元的移动的敏感程度, 所以这里只模拟望远镜在赤经和赤纬方向上各正负 $0.5''$ 的晃动。制作模拟像的方法同制作参考图像的方法类似, 只是图像的中点不是在大图的中点 $(200, 200)$, 而是在 $(190, 190)$ 到 $(210, 210)$ 的区域, 将该区域的所有点都作为中点制作活动图, 就可以得到 400 张活动图, 覆盖了经纬两个方向上各正负 $0.5''$ 的区域。制作活动图的一个好处, 就是事先精确知道每一张图相对于参考图移动了多少。这样就可以把它们作为标准, 把用各种

算法得到的移动量同这些标准相比就可以考察这些算法的精度。

现在就把前面描述的相关加二次曲面拟合计算偏差的算法代进来，将计算出来的偏差同设定值相减，得到该算法在两个坐标轴方向上的误差 $\Delta X, \Delta Y$ 。我们取计算值同理想值之间的距离 $(\Delta X^2 + \Delta Y^2)^{1/2}$ 作为一个评估的依据。对于很多点的情况有两种评估方法，一种是极值误差(PV 值)，另一种是均方差(RMS 值)。本文中讨论的是 RMS。

这里有两种情况没有考虑。第一，量化(A/D 变换)带来的影响，第二，填充因子的影响。所以在前面几步就要考虑这些因素。首先要加入量化，按照前面介绍的公式把模拟的探测器上的响应取有限的几个值，分别模拟了从 1bit 到 8bits 这 8 种情况下不同的 AD 转换精度。很多商用相机为了得到更大的动态范围，采用了自动增益技术，但是对于天文观测来说，为了得到一个统一的量化标准，大多情况下不使用相机的自动增益控制。基于这个原因，参考图和活动图都应该以同一标准来量化，所以就不能在每一幅生成的图像上利用到所有的 AD 的动态范围，就是说在生成的一系列量化后的探测器的响应图像中，有些图像上的最小值可能不是 0，而最大值也不是 $2^k - 1$ 。

还有一个关于探测器的指标是填充因子，这里我们模拟了 1*1, 0.9*0.9 和 0.8*0.8 三种情况，接收区域为正方形，位置如图 3-4 所示。将不同的填充因子代进去，以不同的方式生成参考图和活动图。

根据前面叙述的方法，我们得到了两组数据：这两组数据是按照填充因子划分的，分别等于 100%、81%。图 3-6 至 3-9 显示了一些模拟的结果，两组图分别是填充因子为 100%，81%。每一组图被分成 8 张子图，分别表示 1 到 8bits 的 AD 转换精度。这里数据被描绘成一张曲面，Z 轴表示的是同理论值的偏差的大小，X 轴和 Y 轴分别表示图像的位移。这里，因为主要是研究前面介绍的算法对图像小于一个探测器像元的移动的有效性，所以只计算了在一个探测器像元内移动所产生的误差。

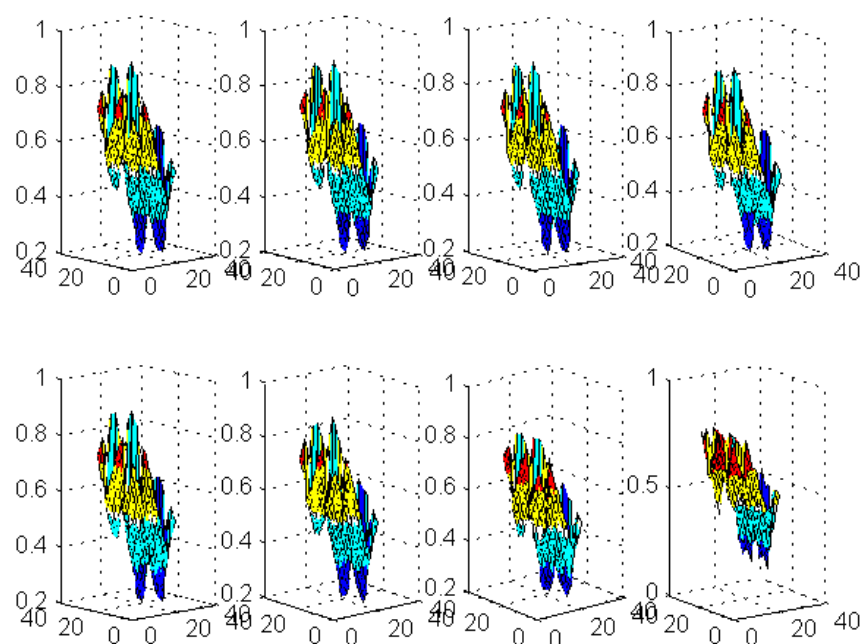


图 3-6：误差分布图

当填充因子为 1.0 时一个像元内移动活动图产生的误差。图中 Z 轴的单位是 1 像素

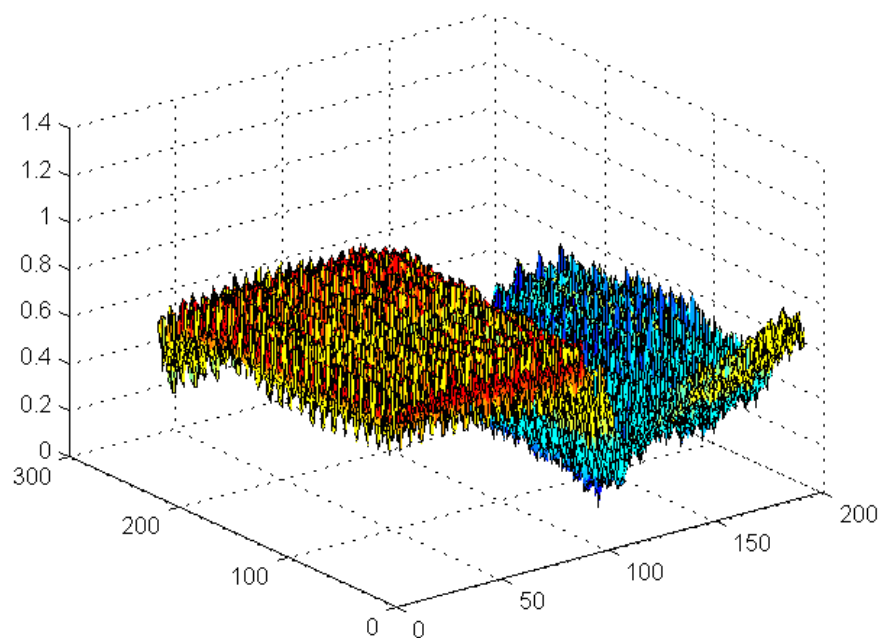


图 3-7：误差分布图

当填充因子=1.0 时，在一个比较大的尺度上（20 个像元）移动活动图产生的误差图中 Z 轴的单位是 1 个像素

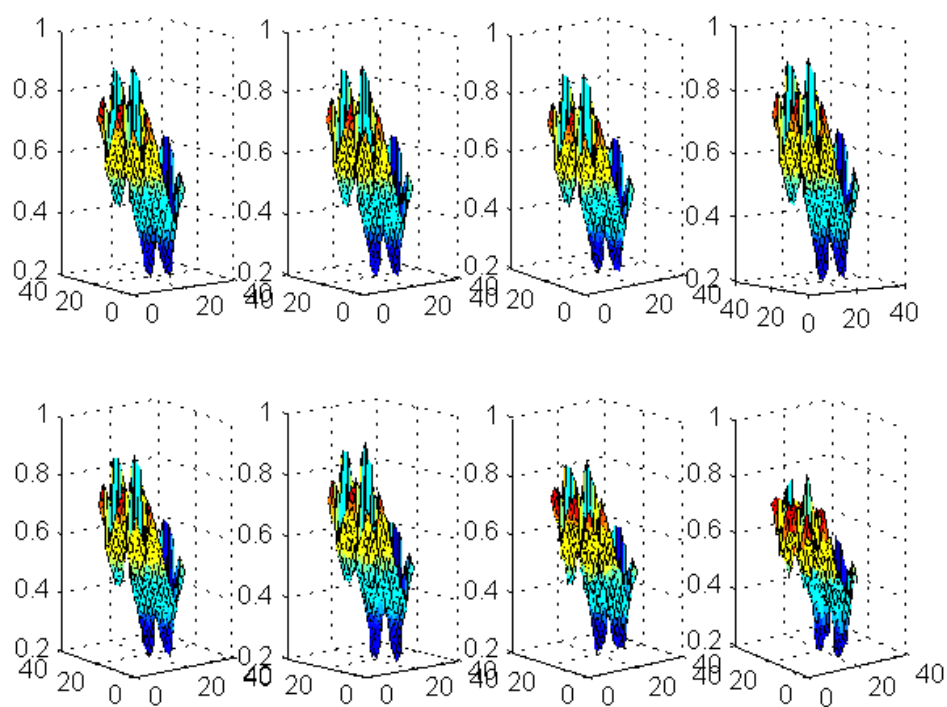


图 3-8: 误差分布图

当填充因子=0.81 时在一个像元内移动活动图产生的误差。图中 Z 轴的单位是 1 像素左上的图是 1bit 量化的计算结果

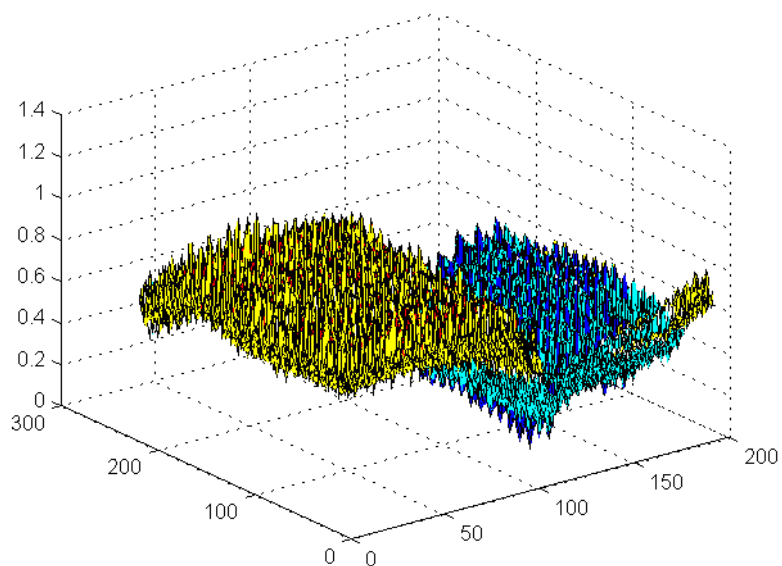


图 3-9: 误差分布图

当填充因子=0.81 时, 在一个比较大的尺度上 (20 个像元) 移动活动图产生的误差图中 Z 轴的单位是 1 像素

量化位数	标准差(填充因子 1.0)	标准差 (填充因子 0.81)
8	0.1512	0.1489
7	0.1513	0.1490
6	0.1512	0.1489
5	0.1512	0.1498
4	0.1498	0.1503
3	0.1497	0.1500
2	0.1499	0.1471
1	0.1479	0.1428
表 3-2: 量化位数, 填充因子, 误差之间的关系 不同的量化位数模拟的结果相似, 同时不同的填充因子的影响也不大		

3.4 模拟结果与讨论

从这两组图中可以得出几个比较明显的结论:

首先, 上述图表都显示出量化的位数对定位精度的实际影响不大, 由此我们可以得到结论: 对于将相关算法应用到太阳的米粒组织上时, 探测器 AD 变换的精度对最终的定位精度的影响不大。也就是说, 我们在设计电路时, 高 bit 的量化精度同低 bit 的量化精度相比, 所得到的结果相近。通过这个结论, 我们可以得到两方面的好处: 第一是降低了模拟电路的设计难度。我们知道, 高速模拟电路的设计是很难的, 高速度会带来很多噪声, 很不容易处理。如果 AD 的量化精度很高, 很小的噪声都会对最终的信号产生影响。而降低 AD 的量化精度, 就意味着每一个 AD 的最小当量值代表了更大的信号, 这样, 噪声对量化的结果产生的影响就不那么明显了。所以模拟电路的设计压力就可以减小。另外, 高速高精度 AD 芯片的售价很高, 如果选用低精度的 AD 芯片可以节省很可观的制造成本。第二是降低了数据处理的难度, 用较低比特来处理数据, 减少了对处理器的要求。8 位的相关计算因为字长的原因需要用浮点运算才能够保证计算不会产生溢出, 如果将每点数据量化为 1 位, 32×32 点的相关计算用定点 DSP (数字信号处理器) 就可以胜任了。因为定点运算要比浮点运算简单的多, 相关的处理器芯片也便宜的多, 而且具有更高的性能。所以从这方面来说既提高了性能, 又降低了成本。

其次, 从前面的对比表可以看出, 图像在整个探测器像元内移动时, 我们应用的算法带来的 rms 误差约为 0.15 个探测器像元。我们知道, 如果单纯取整像元来定位的话, 定位精度就是 0.5 个探测器像元, 应用曲面拟合后的定位精

度提高了 3 倍多, 从 0.5 个探测器像元提高到了 0.15 个探测器像元, 还是有很大改进的, 只是比预期的精度 ($1/32$ 像元) 要低。因此, 我们认为相关算法应用在米粒组织的亚像元的移动定位上不是很理想, 只能达到 $1/6$ 个探测器像元的精度。由此在进行应用此方案的光学设计时, 导行探测器的像元分辨率不宜比主探测器的像元分辨率低太多, 否则可能会不能得到设计精度。但是应该指出的是, 在实际应用中, 如果只是判断图像往哪个方向上有移动, 整个系统也是有可能工作的, 这样就把对定位精度的要求放宽了。但是由此会带来高度的非线性(就是移动多少同检测结果不成比例), 会对控制算法提出很高的要求。另外, 因为像元分辨率同主探测器的分辨率相差不多, 所以我们认为检测图像移动的探测器应同主探测器使用共同的光路。

最后, 在现有的面阵探测器的范围内, 填充因子对定位精度的影响不大。

3.5 实测结果与讨论

我们对局部像导行方案进行了实测, 但由于时间有限, 望远镜的控制系统还来不及进行改正, 因此相关算法的结果还无法直接反馈到望远镜的控制系统上, 为此, 我们选择了一个折衷方案: 先按照上文所述的方法求出图像的位置偏差, 但这些偏差并不反馈到控制系统上, 而是直接用来将所获得的太阳图象进行移动。这一方法与实际上希望达到的导行方案之间存在着一个时延(后者滞后), 但如果考虑到完成后的导行系统具有足够高的时间响应的话, 这一实测结果是可以大致反映导行系统的实际情况的。

3.5.1 系统构成

整个数据采集和处理系统工作流程如下^[30]。首先, 光信号通过快速曝光的 CCD(PULNIX 的 TM6701AN) 变成电信号, 信号经图像采集板(MATROX 的 PULSAR) 进行 AD 变换后变成 8BIT 的数字信号, 然后被送到 PC 机的内存, 数据在内存里被一张一张按顺序保存起来。在曝光结束后, 选取一块特征明显的区域, 将所有的图像同参考图像相比较, 通过相关算法计算出位移, 然后将移位后的图像加起来, 就得到了长时间曝光的消除了抖动的图像。

下面简单的介绍一下系统的各个组成部分。

(1) CCD 相机。本系统选取的是 PULNIX 公司的 TM6701AN。此款 CCD 的主要技术指标如表 3-3。

Imager	1/2" progressive scanning interline transfer CCD
Pixels	648 (H) x 484 (V)
Cell size	9.0 μm x 9.0 μm square pixels
Scanning	60 Hz (double speed) non-interlace, or 30Hz non-interlace. 525 scanline both modes.
Sync	Internal/external auto switch HD= 31.468KHz $\pm 5\%$ or 15.734 KHz Vertical async. reset or VD=60Hz / VD=30Hz
Asynchronous reset	Vertical scan initialization (VINIT) upon TTL trigger from external source. Black video output while VINIT is inactive. Ext. shutter speed control pulse (pulse width control).
Pixel clock	25.49 MHz / 12.745 MHz
TV resolution	500 (H) x 484 (V) lines
S/N ratio	50dB min.(AGC = off), 56dB min. (30Hz)
Min. Illumination	2 lux at normal speed, 1 lux at 30Hz
Video output	1.0 Vp-p composite video, 75 Ω non-interlace
AGC	OFF (AGC ON is a factory option)
Gamma	1.0 or 0.45 (1.0 STD)
Asynchronous electronic shutter capability	1-8 shutter mode switch controls exposure in periods of horizontal scan times (H). Shutter control mode 9 is controlled via external pulse width. Periods of H vary depending on scan mode. Full frame resolution per shutter.
Lens mount	C-mount
Power req.	12V DC 400 mA
Operating temp.	-10°C to 50°C *
Vibration & shock	Vibration: 7G RMS @ 10 ~ 2000Hz , Shock: 70G
Size (W x H x L)	46.3mm x 39.4mm x 140.8mm
Weight	220 gr (7.8 oz)
Power cable	12P-02
Power supply	K25-12V or PD-12
Auto Iris connector	None
Functional options	See current price list.

* NOTE: Image degradation may occur at increased temperatures.

表 3-3 tm6701 的简要指标

选用该相机的主要原因有以下几点：首先，该相机是行间转移逐行扫描的相机，没有所谓的奇偶帧，而且该种 CCD 可以在传输的同时进行曝光，提高了观测效率。因为行间转移的 CCD 在转移到不露光的行以后，进行读出时就不会继续曝光，就不存在像其他种类的 CCD 那样，在行读出时还要继续曝光的问题。但是因为行间转移的 CCD 有一半的面积被遮住，所以填充因子小于 50%，为了克服此缺陷，厂家通过在 CCD 上集成了微透镜阵列的方法，把投射到不感光处的光聚集到感光的部位，从而将填充因子提高到了 100%，但是这种方法，并不能大幅度提高量子效率。第二，这款 CCD 相机属于高速相机，具有 25 兆的像素时钟和 60 帧/秒的帧速率。它的短时间的曝光可以在很大程度上减小大气扰动

对望远镜成像质量的的影响。第三，观测需要将两种正交偏振状态的图像交替曝光，为了与偏振调制元件的调制频率同步，需要可以控制曝光时间的相机。这款相机可以在接收外部信号时，根据指示调整曝光时间。这样就可以使调制元件的控制与该信号同步，实现观测需要的功能。

(2) 图像采集板。这里选取的是 MATROX 公司的 PULSAR，此卡采用 PCI 接口，具有足够的带宽将采集的图像数据传到 PC 机的内存。另外它还具有控制 TM6701AN 曝光的能力，采集图像时亮度和对比度都能分别调整。这些完全能满足我们的使用要求。所以虽然它的购买时间较早，只能使用 WINDOWS95 的驱动程序，经过综合考虑，还是决定将此采集板用于我们的系统

(3) 计算机。因为此课题开始于几年前，当时的计算机处理能力还不足以实时处理这么快的图像数据，所以惟一的办法就是将所有得到的数据保存下来，等到整个曝光过程结束后再做处理。这样，就需要每秒钟保存 25 兆的图像数据，如果将它们保存到硬盘非常困难，比较简单的办法是将图像数据先存到 PC 机的内存。保存一幅采集的图像需要 $640 \times 480 = 300\text{KB}$ 左右的内存，如果采用 256 幅图像叠加的方法来将曝光时间延长 256 倍，观测模式又需要得到两种正交的偏振状态的图像，所以计算机内存容量还要加倍，这样算来，仅此一项，就要求内存达到 153MB ($300\text{KB} \times 256 \times 2$)。如果再加上操作系统本身的需求及留有一定的余量，这台计算机就需要 512MB 的内存。这对于当时的技术来说，已经相当大了。

(4) 附加电路。它的主要作用是使偏振调制元件的调制频率与曝光时间同步。在这里只用了一个简单的 D 触发器。为了得到一个确定的初始状态，用了一块 IO 板来控制输出。

(5) 图像采集和处理程序。本系统的图像采集程序直接选用了 PULSAR 板子的驱动程序。它的图像处理程序应用了 INTEL 公司研制的 IPL，这个库提供了一些针对处理器高度优化的常用图像操作函数，使图像处理速度有了戏剧性的提高，这一特点，正好满足我们要求高速处理图像的需求。该软件包有两个主要优点，一个是速度快，举一个明显的例子，对于图像的 FFT 计算，如果用 C 语言编程就比用 IPL 慢 10-20 倍。另一个优点是有了新的处理器想应用新功能，只需更换新的动态链接库 (DLL)，不需要重新编译。

3.5.2 实测结果

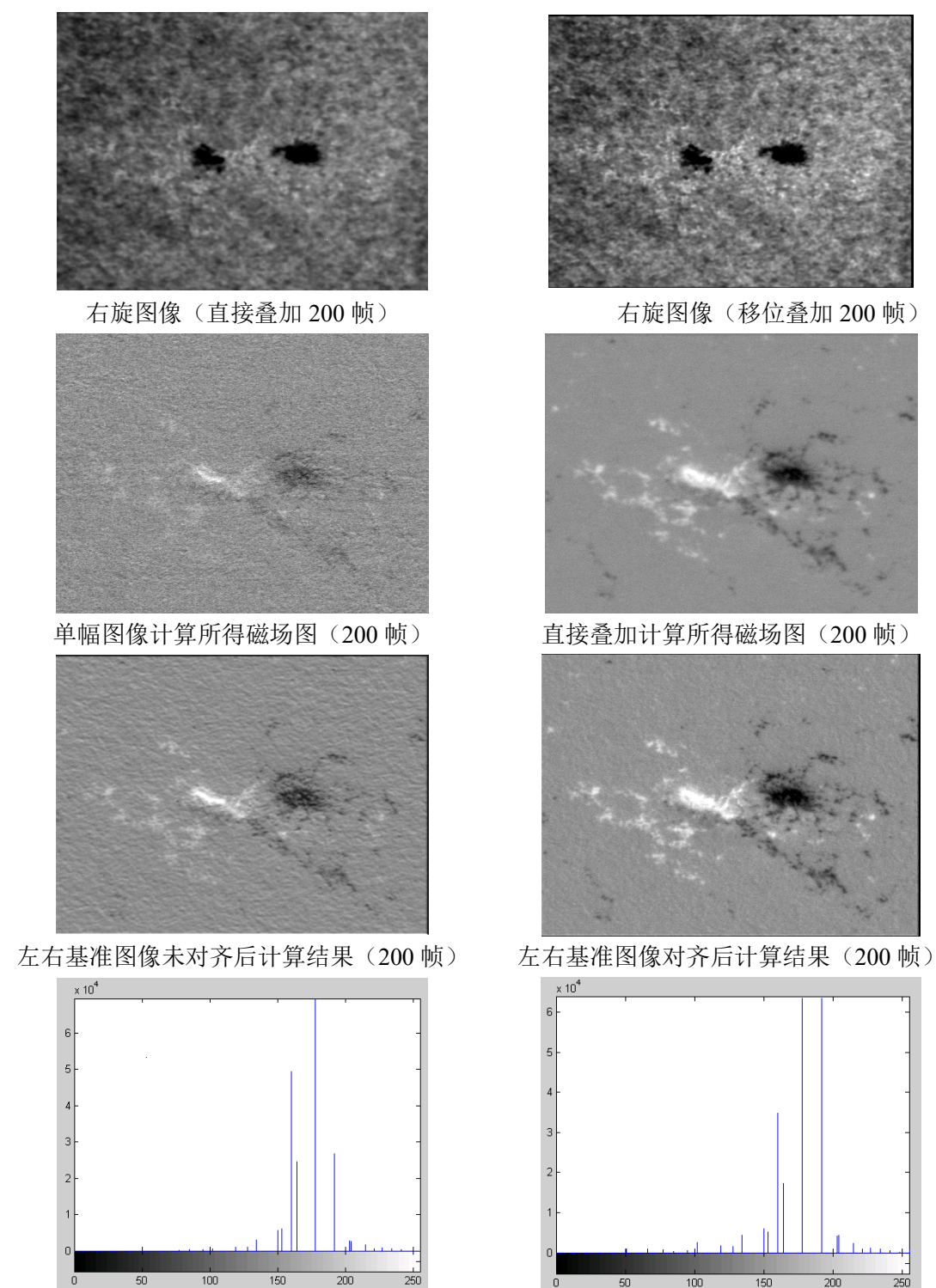


图 3-10 (200 帧) 直接叠加和移位叠加右旋图像比较[30]

图 3-10 给出了一组实测的结果。由图可以看出可以看出效果很明显：

1、直接叠加图像和移位叠加图像灰度分布图的不同。从像素灰度值的大小范围及其数量来比较：从圆偏振左旋单色像、圆偏振右旋单色像（以后简称左旋图像、右旋图像）和磁场图的比较中都可以发现移位叠加所得的图像在低灰度和高灰度的像素都比较多。比较明显的是单色像的灰度分布图中灰度值低于 50 和高于 200 的像素在直接叠加的图像中没有反映

出来，而在移位叠加的图像中有清楚的反映，这说明了相关移位算法在叠加过程中对图像细节的保持作用。

2、直接叠加图像和移位叠加图像的灰度值轮廓曲线的不同（具体图像见参考文献）。我们取图像中的一条直线（3，240）到（500，240），从像素灰度轮廓曲线的变化来比较：在直接叠加图像的灰度曲线中有比较多的呈阶梯状的跳跃变化，每一个这样的阶梯的水平段表明在其对应的一段距离上像素的灰度值是没有变化的，实际上也就是由于图像的抖动平滑掉了像素之间的灰度值差别。而在移位叠加的图像中这样的水平段就明显少的多，这同样也说明了相关算法有效的消除了图像抖动造成的图像模糊。

3、直接叠加和移位叠加图像的标准差。

直接叠加： $\text{std}(\text{左旋图像}) = 25.3213$;
 $\text{std}(\text{右旋图像}) = 25.5520$;
 $\text{std}(\text{直接叠加磁场}) = 11.6627$;

移位叠加：

$\text{std}(\text{左旋图像}) = 31.8148$;
 $\text{std}(\text{右旋图像}) = 32.9942$;
 $\text{std}(\text{移位叠加磁场}) = 16.5231$;

标准差反映了图像数据矩阵中像素灰度值的分散程度。上面的数据同样也反映了移位叠加的图像在灰度分布的离散程度上是大于直接叠加的数据的。

以上实验结果说明了相关算法在提高图像空间分辨率方面的有效性。

当然，由于系统的构成较为简单，比起我们本章实际讨论的导行系统还各有一些特点，例如当被观测的目标太暗而单帧磁场数据也需要较长时间曝光时，考虑到大气的影响，这个试验方法就不能采用了，而实际的导行系统由于可采用白光像进行短曝光而仍可使用；实验系统对计算机的处理能力要求也更高；实验系统则较导行系统较易在现有望远镜上使用，因为它完全不要求改变望远镜现有的光机系统。虽然有上述差别，但作为导行系统的实验系统，我们的试观测系统还是完全合格并且成功的。

3.6 结论

在这里我们再次简要地重复一下本章得到的重要结论：（1）相关算法应用在米粒组织的亚像元移动定位上能达到 $1/6$ 个探测器像元的精度；（2）对于将相关算法应用到太阳的米粒组织上时探测器 AD 变换的精度对最终的定位精度的影响不大；（3）在现有的面阵探测器的范围内，填充因子对定位精度的影响不大；（4）采用本章原理的试观测取得了预期的结果。

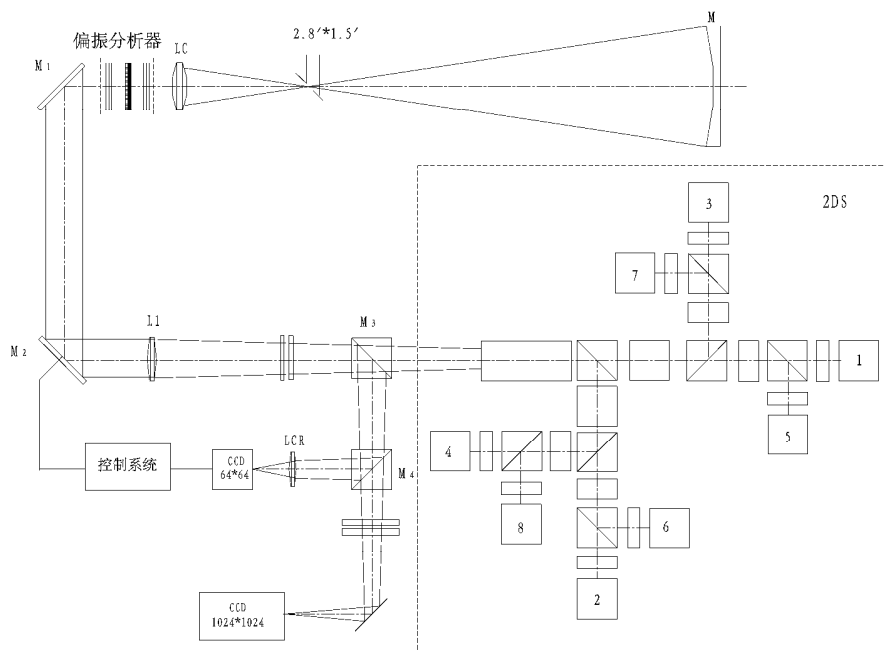


图 3-11 太阳空间望远镜 (SST) 主光学望远镜光路示意图

图 3-11 再给出了一个在新建望远镜上应用例子。该图显示的是目前国家天文台正在研制的太阳空间望远镜的主光学望远镜的光路图。该望远镜用摆镜来完成局部像的相关跟踪。探测器接收到的是从主光路中分出的一路光强，其像元分辨率同主探测器相同。因为主探测器在窄带双折射滤光器后面，相关探测器的能量比他们强了两个量级以上，所以短时间曝光的能量是足够的，因此此处运用相关跟踪的导行方法是合适的。

第四章 面阵 CCD 导行——全日面像导行方案

4.1 引言

前面介绍了基于局部太阳像的导行方案, 该方案的优点是数据量小 (32*32 点即可满足许多使用要求), 与主探测器使用相同的光路。因为数据量小, 所以计算速度很快, 从而响应速度也很快。但是另一方面, 因为用于相关跟踪的探测器不能太大, 使得望远镜跟踪的视场很小, 只适合小范围图像移动的改正, 因而这种方法大多用于类似于摆镜的系统, 快速改正小范围的晃动。但如果将其用做望远镜定位, 其视场小的缺点就突出了。当以望远镜定位精度为主要要求的情况下, 一种常用的导行方法就是以整个太阳为目标, 计算整个太阳的位置来纠正望远镜的跟踪误差, 同时局部太阳像的定位可以通过导行望远镜与主望远镜之间的几何关系来实现。这也是以前应用非常广泛的传统导行方法的基本思路。在这类传统方法中, 按接收器件的接收方法通常分为点与线两大类, 在本部分引言中我们已经作了简要介绍, 此处不再赘述。

当使用面阵 CCD 作为导行时, 通常以太阳像的中心作为参考位置时, 求中心的算法有多种, 但差别不大, 因此本文中仅讨论以位置为加权平均的质心作为太阳像中心的方案。

4.2 基于质心算法的全日面导行方案

我们定义太阳像的质心的为:

$$X = \sum xf(x,y) / \sum f(x,y),$$

$$Y = \sum yf(x,y) / \sum f(x,y),$$

式中, $f(x,y)$ 表示 (x,y) 点的像素值, X 、 Y 分别表示计算后的质心位置。

这里需要讨论这样两个问题: a. 得到的 (X,Y) 是两个浮点数, 当我们把该数值应用到日面定位时, 我们不能说该数值有任意的精度, 所以就要评估该数值究竟在什么程度上是可信的。b. 因为日面上所有点都参与了计算, 那么有可能不需要那么高的像元分辨率就能达到所需的精度, 那么究竟需要多高的像元分辨率才能满足我们的定位要求呢? 为此我们设计了一组模拟试验来研究计算质心的算法应用在太阳导行上的精度, 并探讨哪些因素会对最终的精度产生影

响。

4.3 基于质心算法的全日面导行方案的模拟

4.3.1 方法和原理

模拟的基本原理同前面介绍的相关跟踪的模拟方法类似，也是将日面分割成很小的单元，按照被模拟的探测器的不同形式进行合并，来得到不同情况下的探测器面阵上各点的数值，如图 4-1。

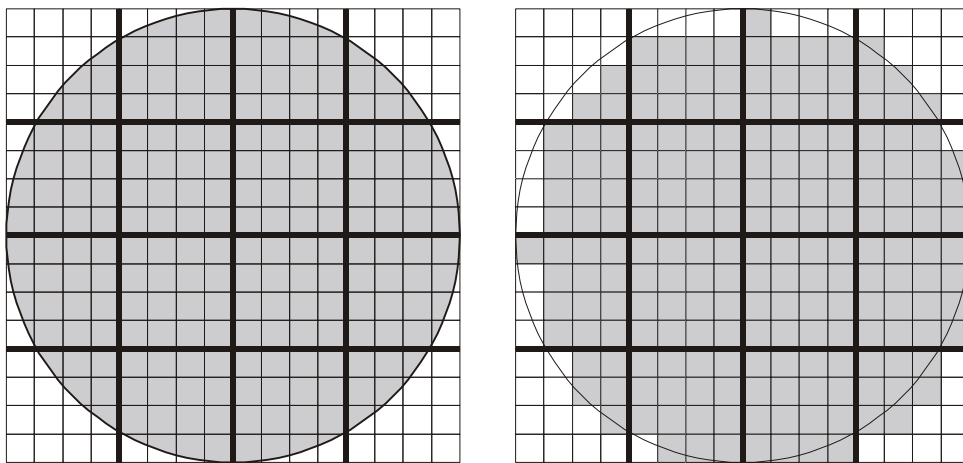


图 4-1：模拟太阳像在面阵上的响应

上图显示了模拟太阳像在探测器面阵上的响应，左图是真实情况，但是我们不考虑小方格部分在园内的情况，当小方格左上的一角在圆内就把这一点都算在圆内。右图是应用了这个策略后计算出的圆内的点。

考虑到地面的情况，通常情况下由于大气的扰动，地面望远镜只能得到 1 角秒左右分辨率的图像，导行镜能检测到 $1/5''$ 的移动就足以使跟踪精度优于一个角秒，所以我们将模拟的最小分辨率设定到 $1/5''$ 。这样选取的另一个原因就是计算机的内存也不允许太阳模型具有太高的分辨率，因为对全日面像而言，分辨率越高则意味着像素越多，占用的计算机内存就越大。因此，鉴于太阳角直径约为 $2000''$ ，高分辨率的图像就取为 10000×10000 像素。

至于太阳模型的建立，为方便起见，用一个没有细节的圆斑来模拟，因为这样可以比较精确地知道日面中心的理想值，不会存在直接应用太阳像判断中

心产生的不确定性。我们利用计算机直接建立模型，编写一个程序，在很大的二维数组的中心圆形区域里添上相应的数值，将圆形区域的中央设为 1，然后以该点为圆心，随着半径的增加，圆环上的数值成比例的减小，直到圆形区域的边缘减到 0.6，这样就生成了一个大圆斑，在圆斑外面的点数值为 0，如图 4-6 所示，如此替代了太阳临边昏暗效应造成的日面边缘亮度减弱的现象^[31]。因为实际情况比较复杂，这里做了一些简化，应用了随着日面中心距离的增加，光强度线性减小的模型。

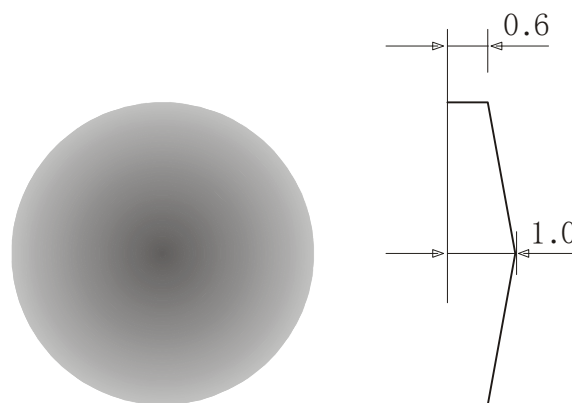


图 4-2：简化的太阳模型

光强随着距日面中心的距离增加线性减小的示意图切面，这里中间的光最强为 1，到边上减为 0.6

为了兼顾制造成本和时间响应的要求，探测器的面阵不宜太大。此外，小面阵探测器更主要优点是可以获得更快的采集和处理速度，在像素时钟相同的情况下，小面阵的探测器有更高的帧速率（假设曝光时间相同）。我们设计的计算机仿真程序首先应该回答究竟怎样的探测器能满足天文上的要求。为此我们预先设计了几种面阵的规格，最小的是 10×10 ，一直到最大的 1000×1000 。这些规格的探测器都需要覆盖整个日面，所以每一种规格所对应的像元分辨率都是不一样的。图 4-3 是一个 4×4 的面阵覆盖整个日面的示意图。

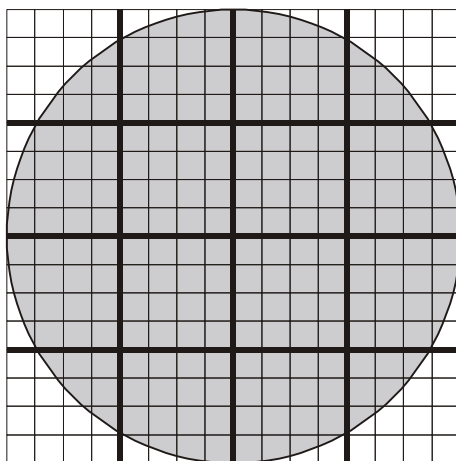


图 4-3: 4*4 面阵覆盖整个日面

需要做的工作是模拟太阳像在探测器面阵上移动，计算出在整个面阵上太阳像的理论位置同计算出来的位置的差。在理想情形下，探测器面阵上每一个像元都是一样的，所以太阳像在面阵上移动时表现出来的特性也就具有周期性。我们在进行仿真时只需覆盖一个探测器像元就可以了。为此，首先要做些准备工作，例如需要确定 AD 变换精度是否对计算精度有影响，如果有影响，是怎么影响的。在这里，我们设计了一个简单的试验，将探测器面阵的尺寸设成 10×10 ，将太阳的模型放进去，移动 0.2 个角秒，然后用各种位数的 AD 来数字化探测器的响应，用它来计算质心，然后同理论值相比。表 4-1 是比较的结果

量化位数	标准差
1	44.296534
2	16.133534
3	6.654824
4	4.526356
5	3.441627
6	3.793394
7	2.020779
8	2.551806
表 4-1:量化位数同误差的关系 在 1 到 8BITS 量化下，1" 内的移动在 10×10 的探测器面阵上的质心同理论值的标准差	

从这里我们可以得到初步的结论：在计算太阳像的质心时，AD 变换的精度对定位精度有影响，提高 AD 变换的精度能同时提高定位的精度。另外计算质心

的算法非常敏感，在高 BIT 量化的情况下有可能对千分之一像元分辨率的图像移动产生响应。但这不是我们需要的，因为太阳上的结构在高精度的 A/D 变换后会对计算质心产生影响。我们实际上是需要没有细节的太阳像，而低 BIT 的 A/D 变换会抹掉低反差的细节，这对我们计算质心是有好处的。所以，基于量化会对最终精度产生影响的结论，我们选型的指导思想就变成了用尽可能低的量化位数来实现需要的精度，在必要的时候用提高探测器像元分辨率的方法来达到目的。

因此，我们将量化定为 1BIT 进行模拟。

模拟的第一步是预先筛选，将太阳像在预选的几种探测器面阵上移动一个小格（0.2 个角秒），计算这些探测器在各种 A/D 变换精度下的质心位置。中选的条件是：首先计算误差要小于 0.2”，其次是只需 1BIT 就能满足精度的要求，第三要求探测器的面阵尽可能的小。通过这三个条件的筛选能找到一个探测器面阵的尺寸。前面的筛选过程中只是移动了 0.2”，我们不知道太阳投到探测器上什么位置产生的定位误差最大。为了避免返工，我们把得到的探测器尺寸做了适当的放大。然后进行仔细的计算，验证模拟的太阳在探测器上移动时计算误差总小于最小的格值。通过计算我们可以描绘出一个曲面，进而看出哪些位置对定位精度影响最大。

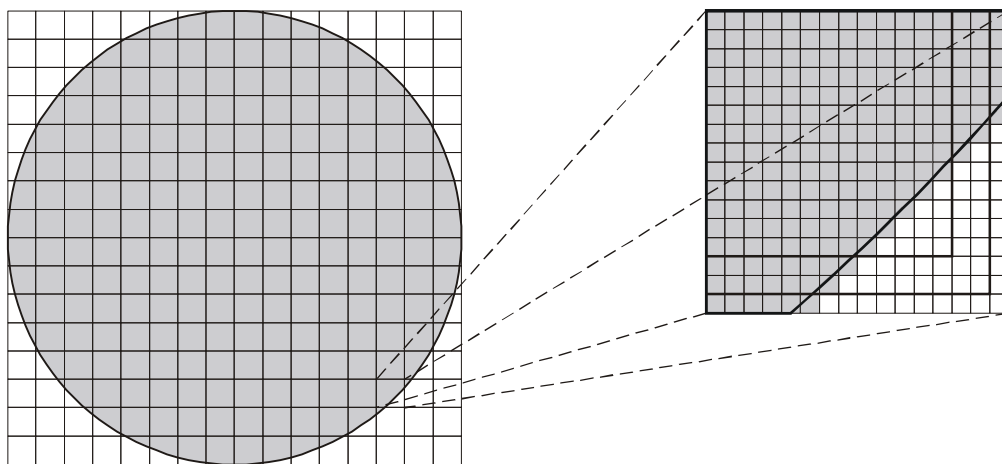


图 4-4：放大的模型

模型的局部放大图指示有可能大的填充因子能够得到更好的结果

图 4-4 是一张局部放大图，粗线代表了探测器的一个像素。在模拟之前不知道填充因子对结果的影响，但是从这张图中，我们有理由先预测大的填充因子有可能得到更多的信息。所以在仿真时我们首先选择了填充因子为 1 进行试

验，经过预先筛选后再进行不同填充因子的验算用以确定填充因子对定位精度的影响。

要先进行初选的原因，是为了减小为得到探测器上各点模拟值的巨大计算量。首先是需要生成太阳的模型，这里因为最小移动距离被设计成 $0.2''$ ，所以放置数据的数组需要 10000×10000 ，这个数组有 100M 个元素。在模拟太阳像在探测器上移动时，每移动一次都需要重新计算探测器的响应。探测器面阵规格越小，就意味着像元分辨率就越低，这样就意味着需要重复更多次的计算才能将整个像元内部覆盖。所以如果所有的探测器面阵规格都完全覆盖，就需要太多的计算。实际上现有的 PC 机的计算能力是不够的。所以要进行初步筛选，只对有可能地地进行仔细地研究。

模拟程序用 C 语言写成，在 P4 2.4 的计算机上，移动一个点需要 20 秒左右，虽然较慢，但作为模拟是可以接受的。这样当像元分辨率为 $10''/\text{PIXEL}$ 时，完整覆盖一个像元就需要 50×50 个点，大概要半天的时间。

4.3.2 模拟结果

表 4-2 给出了在各种面阵尺寸下，移动 $1.0''$ 时，模拟值同设定值之间的标准差。表中还给出了考虑不同的量化位数（填充因子为 100%）的结果。表中的值以 $0.2''$ 为单位。

量化位数	$500''/\text{PIXEL}$	$100''/\text{PIXEL}$	$20''/\text{PIXEL}$
1	44.296534	1.417215	0.494910
2	16.133534	1.417215	0.359271
3	6.654824	1.417215	0.221016
4	4.526356	1.411802	0.128749
5	3.441627	1.005297	0.134986
6	3.793394	0.372894	0.057424
7	2.020779	0.227931	0.042774
8	2.551806	0.156709	0.014562

表 4-2：像元分辨率、量化位数、误差之间的关系

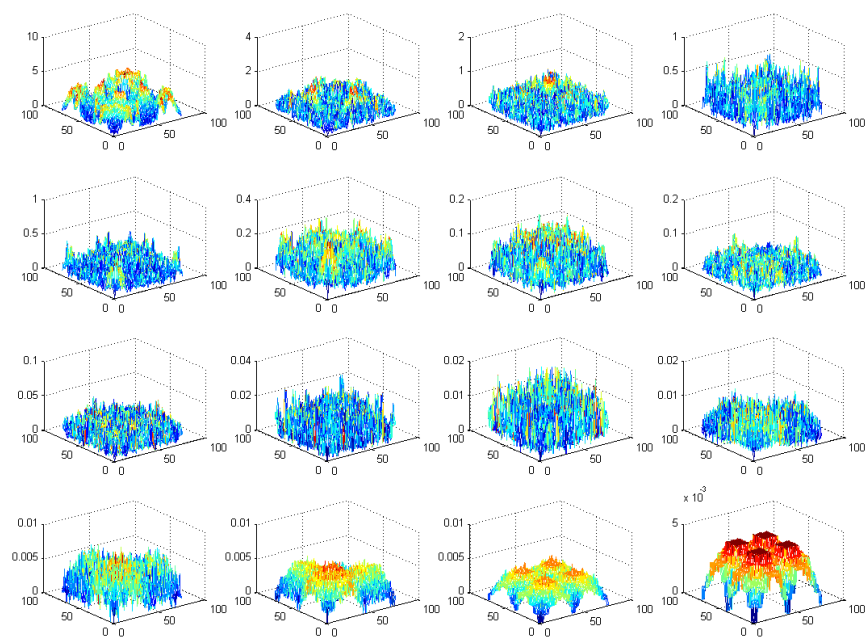


图 4-5：误差分布图

当像元分辨率为 $15''/\text{PIXEL}$ 时的亚像元的定位能力。填充因子 100%图中 Z 轴单位为 $0.2''$
 从左上子图到右下子图分别是 1bit 到 16 bit 量化的计算结果

量化位数	标准差
1	1.055904
2	0.369585
3	0.198925
4	0.130253
5	0.086222
6	0.054444
7	0.026847
8	0.016298
9	0.009042
10	0.004764
11	0.003266
12	0.002521
13	0.001518
14	0.001333
15	0.000917
16	0.000908

表 4-3：量化位数同误差的关系
 当像元分辨率为 $15''/\text{PIXEL}$ 时各种量化精度造成的误差（标准差）。填充因子 100%，表中单位为 $0.2''$

从表中可以看出，当面阵的大小达到 100 点左右时（即像元分辨率 $20''/\text{pixel}$ ），量化带来的误差虽然还存在，但已经小于我们模拟的最小移动单

位了 ($0.2''$)。另外当探测器的像元分辨率很低时, 如果 AD 的精度很高, 也有可能分辨出 $0.2''$ 的移动。为了稳定起见, 对 AD 变换要求尽量低。所以初步取 150 点进行像素内所有小点进行模拟计算。当探测器面阵尺寸是 150 点时, 像元分辨率为 $15''/\text{PIXEL}$ 。完整覆盖这个区域需要计算的区域是 70×70 点, 也就是 4900 点。

图 4-5 是该区域的误差曲面, 同前面的类似, Z 轴代表误差。图中可以看出, 各个小点的误差还是有起伏的。这就是说, 在一个探测器的像素内的移动误差不是均匀的。很明显, 误差值同量化的位数是相关的。

下一步来评估填充因子的影响。图 4-6、图 4-7 是两种填充因子 (81%, %64) 在上述分辨率时, 同填充因子为 1 的状况进行比较。可以看出填充因子对定位精度有很大的影响, 即当填充因子小于 1 时, 会降低定位精度。所以在探测器的选择上, 我们要尽量选填充因子为 1 的探测器。

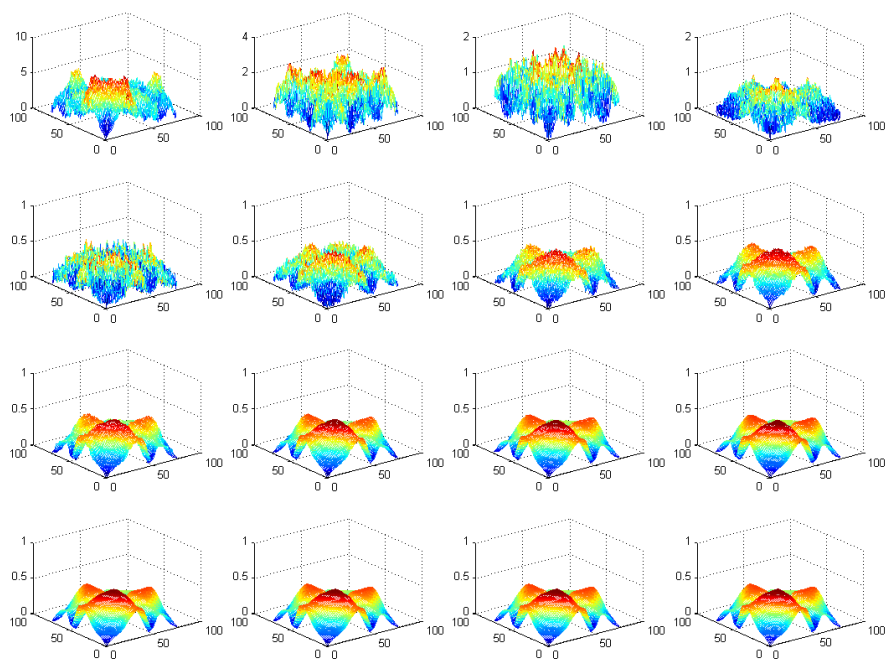


图 4-6: 量化位数同误差的关系

当像元分辨率为 $15''/\text{PIXEL}$ 时的亚像元的定位能力。填充因子 81%, 图中 Z 轴单位为 $0.2''$
 从左上子图到右下子图分别是 1bit 到 16 bit 量化的计算结果

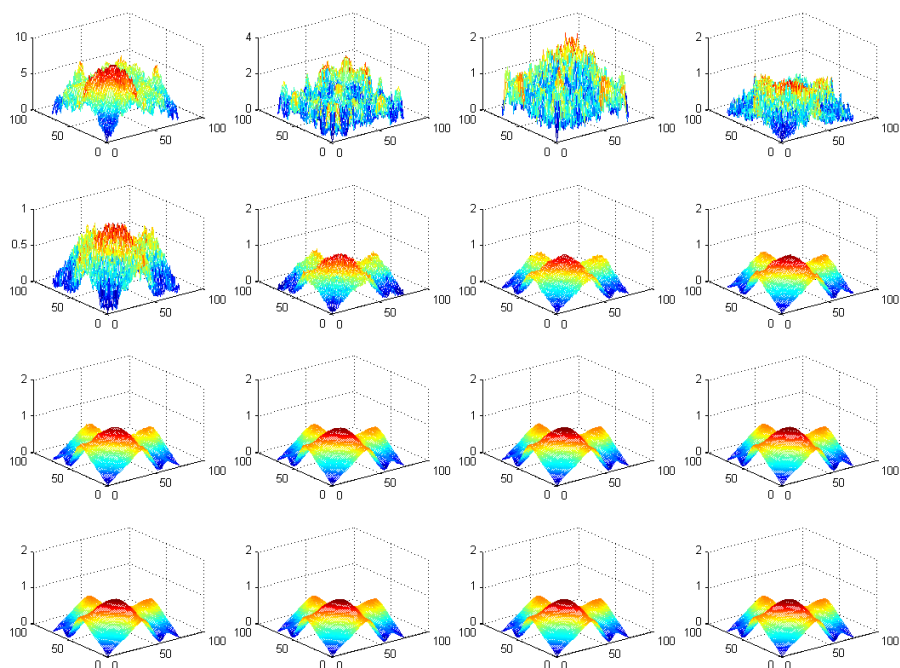


图 4-7：量化位数同误差的关系

当像元分辨率为 $15''/\text{PIXEL}$ 时的亚像元的定位能力。填充因子 64%，图中 Z 轴单位为 0.2''

从左上子图到右下子图分别是 1bit 到 16 bit 量化的计算结果

量化位数	填充因子		
	1.0	0.81	0.64
1	1.055904	1.336541	1.454612
2	0.369585	0.567617	0.467440
3	0.198925	0.340077	0.343035
4	0.130253	0.218987	0.234281
5	0.086222	0.111817	0.202723
6	0.054444	0.109989	0.240113
7	0.026847	0.115267	0.239296
8	0.016298	0.124211	0.241726
9	0.009042	0.116394	0.237346
10	0.004764	0.117894	0.237341
11	0.003266	0.114522	0.240002
12	0.002521	0.113779	0.241461
13	0.001518	0.115273	0.241903
14	0.001333	0.115667	0.241913
15	0.000917	0.115663	0.241434
16	0.000908	0.115682	0.241433

表 4-4：量化位数，填充因子，误差的关系

填充因子为 1.0, 0.81, 0.64 时不同量化精度造成的误差（标准差）。减小填充因子后精度降低在量化精度低的时候稳定性变差。

4.4 结论与讨论

通过前面的模拟计算我们可以得到如下结论：

- (1) 在计算太阳像的质心时，AD 变换的精度对定位精度有影响，提高 AD 变换的精度能提高定位的精度；
- (2) 当填充因子小于 1 时，会降低定位精度。所以在探测器的选择上，我们要尽量选填充因子为 1 的探测器；
- (3) 采用本文的算法获得的定位精度高于像元分辨率。

应用测量太阳质心的算法，太阳上的一些结构会对最终结果产生影响，这是该方法比较大的缺点。但是因为太阳上主要的背景结构的反差都比较小，如果采用低比特的量化位数就可以很大程度上减小这类结构的影响，图 4-8 是两张太阳白光像一张是 8BIT 量化，另一张是 1BIT 量化。可以看出 1BIT 时，基本看不出什么细节。所以产生的影响不大。

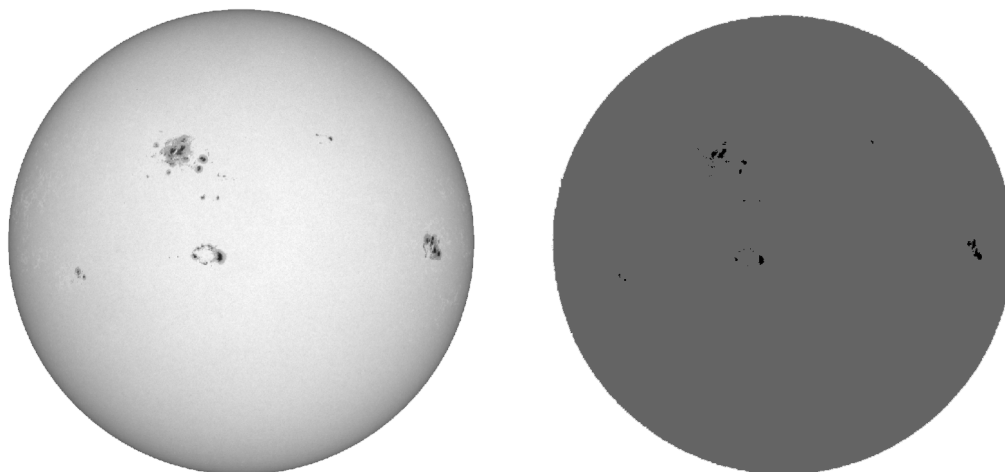


图 4-8：8 位和 1 位的全日面像

上图是一张 MDI 2003 年 10 月 28 日的全日面白光像。左图是 8 位量化，右图是 1 位量化(灰色区域被量化成 1 黑色部分为 0)。可以看出在一位量化时太阳上的活动区所影响面积大大缩小，还可以适当的调整阈值以进一步减少太阳上的活动区对定位精度的影响。

在上面的 1BIT 图中，唯一还剩下的是太阳黑子结构。黑子是太阳上比较暗的地方，一般来说日面平均亮度较黑子的亮度高数倍到十数倍，所以在中心区域 1 位的 AD 变换不会受黑子的影响。在日面边缘的黑子会产生一些影响。因为计算质心同日面上所有点相关，少数点会被其他点平滑掉。同时由于太阳活动

区的位置变化（包括黑子自行、太阳较差自转等）是非常小的（在 $1''$ /小时的量级下），所以计算质心的方法只会对定位产生一个整体的误差，而这个误差在短时间里是不会变的。所以对导行不会产生影响。下表给出了一个比较结果，第一列结果是利用上面的 1BIT 图计算日面中心，第二列是将所有黑子区域用相邻的背景区域的值替代后（此时，相当于我们模拟中用到的模型图）计算的结果。从表中可以看到，黑子等结构对定位的影响几乎可以忽略。

	擦除前	擦除后
X	510.7548	510.6271
Y	513.5196	513.6249

表 4-5：太阳活动区对计算质心的影响
二值化图像后去掉活动区计算质心同没去掉活动区计算值的对比。表中的单位是 $2''$

计算质心的方案也受天气的影响，薄云的影响在采用 1BIT 量化时将不会很明显。虽然比较厚的云会产生比较大的误差，但是在这种天气下观测已经不会再继续，主要的要求是导行机构不失控，不会对安全造成影响。所以从这一点上来说，产生误差是可以被接受的。

第五章 局部像导行方案 and 全日面像导行方案的比较

前面介绍了基于太阳局部像的用相关算法进行导行的方案和基于全日面的质心算法的导行方案，下面来作一下比较。

1. 适用对象 相关方法的目标是太阳上的一小块区域，范围不大。所以相关的方法只能指向同参考图相同的点。而全日面的方法可以将日面定在探测器面阵上任意位置。

2. 太阳结构的影响 因为太阳的结构是处在演化中的，而米粒组织等特征结构的演化时间尺度为十几分钟，所以过几分钟后因为日面上的变化定位会产生一些偏差。全日面的方案因为量化的位数低，所以日面上结构的演化造成影响也低，从这两方面比较全日面的方法比较适合绝对定位，就是比较准确的计算出观测目标在太阳像上的位置。而相关的方法比较适合短时间的观测。

3. 计算量 从计算量上的比较。前面已经说明了取 1K 点的相关的计算量是 80k-100k。关于计算质心的计算量，根据公式：

$$X_s = \sum xf(x,y) / \sum f(x,y)$$

$$Y_s = \sum yf(x,y) / \sum f(x,y)$$

因为每输入一个点需要计算每个点的下列参数：

$$\sum f(x,y), \sum xf(x,y), \sum yf(x,y)$$

这样对于每个点需要六次计算。因为质心计算需要的面阵尺寸比相关算法要来的大（150*150*3=22500*3），所以每一次计算质心需要 60k 的计算，与前者相比相差不多。我们得到这样的结论：在同样的定位精度的前提下，这两种方法需要的处理能力相近。

4. 响应速度 前面已经介绍过，从算法的复杂度程度上说，两种方法在时间上的开销是差不多的。但是因为计算质心的方法需要的探测器面阵比较大，在相同的探测器像素时钟频率下，这种方法图像的读出时间是相关算法所需要的读出时间的 10 倍，这是该方法的不利之处。它的优势是质心的方法算法简单，数据之间关联不大，可以在读出的同时进行计算，如果计算能力是同探测器的读出速度相匹配的话，当一幅图像读出后就可以完成计算了。而相关算法要等整幅图读完以后才能进行计算。当计算能力同图像读出速度匹配时也要产生一

帧的延时。所以在读取帧速率相同的情况下，质心算法在时间响应方面优于相关算法。但是通常探测器的点频（PIXEL CLOCK）在这里是瓶颈，不能大幅度的提高。相关算法在这种情况下就能获得比较好的响应时间。

5. 观测目标 多数情况下，天文学家都是对太阳的局部像感兴趣，但是因为大气的抖动，太阳像会产生较高频率的晃动，如果频率高到超出了望远镜主体的自振频率，就会导致很难使整个望远镜把检测到的误差改正过来。所以需要摆镜之类的小惯量的器件在光路中进行改正，这样的话，会因为目标不同就比较难进行全日面的导行。此外，地球大气对整个日面的影响是非均匀的，全日面导行改正的是整个日面上大气抖动的平均效应，而局部导行可以改正感兴趣区域的真实偏差。特别是应用在太阳磁场观测上时，需要在短时间内（几分钟）稳定太阳的局部像，此时采用相关的方法更好一点。

6. 安全性 因为相关算法能改正的范围不大，当应用该算法驱动活动范围比较大的改正元件时，如果将其应用在望远镜的跟踪方面，需要增加一些额外的开销来保证在被测图像同参考图不一致时望远镜的乱跑。因为质心算法在这方面比较稳定，需要做的工作比较少。所以相关算法在有云时应用要比较小心，但对于质心的计算只是可能产生一个误差，不会产生大的危险。所以从适应性上来讲，全日面的方案更好一些。

7. 对光学系统的要求 因为计算质心的方法不关心太阳的细节（实际上越少越好），所以对光学系统成像质量要求很低。它带来的好处是降低了对光学系统的设计要求，有可能使整个系统简化，对于空间应用这样要求减轻系统质量的场合比较适合。而相关算法因为关注的是图像的细节，所以对像质要求较高。

8. 所需光量 从前面的讨论可知，因为如果把米粒组织作为相关计算的目标，主探测器的像元分辨率不能比相关跟踪的探测器的像元分辨率高很多。为了在短时间曝光内使相关跟踪的探测器具有足够的能量，需要比较多的能量，这就对望远镜的口径有一定的要求。而计算质心的方法对探测器的像元分辨率要求可以很低，很小口径的望远镜就能满足快速曝光的能量需求。

下面我们通过简单的计算来证明这个观点：从前面的模拟我们知道，对于米粒组织，相关的方法要想达到 $0.2''$ 左右的精度，像元分辨率要达到 $1.2''/\text{PIXEL}$ 左右，而计算质心的话达到同样的精度就只需 $15''/\text{PIXEL}$ 左右的像元分辨率。像元分辨率相差了 12 倍！所以在同样的曝光时间的前提下，“相关”方法所需要的望远镜的口径是“质心”方法的 12 倍！就是说如果“质心”

方法需要 1cm 口径的望远镜可以满足能量要求的话，“相关”方法就需要 12cm 口径的望远镜。所以从能量的角度上说计算质心的方法比较有优势。

第二部分 嵌入式系统在高时空分辨率太阳 磁场观测中的应用研究

第六章 太阳磁像仪终端系统的发展

在前一部分的论文中，我们主要从理论上分析了太阳磁像仪的导行方案，但这些方案的实施还涉及到多方面的问题，其中最重要的一点就是要求匹配的终端设备。在这里，终端设备指望远镜成像面以后的所有电子系统，包括 CCD、图像采集板、数据处理器以及存储介质等，在前文中我们多次讨论到采样、传输、及处理等速度和能力等问题，就是因为终端设备在很大程度上制约了导行方案的应用。有鉴于此，同时也是为了完成多通道望远镜的更新改造以及今后的发展，我们又开展了望远镜终端设备方面的研究工作，并结合面阵 CCD 导行方案的需求，提出了基于嵌入式系统的太阳磁像仪终端设备方案。

此处先简要概述一下太阳磁像仪终端设备的发展。按照接收器件的分类，我们大致可以将这一过程分为照相、商用 CCD、科学 CCD 三个阶段，而由于网络时代的到来，下一个阶段必将是基于网络的阶段，而我们要讨论的嵌入式系统就属于这一时期。

6.1 基于照相系统的太阳磁像仪终端设备

在太阳磁像仪的历史中，基于照相系统的终端设备占据了很长一段时期，大约覆盖了 20 世纪初到 70 年代以前的大半个世纪。其基本原理是利用照相底片的正片与负片分别记录磁场信息的两个分量，比如纵向磁场的左和右旋分量，最后正片与负片叠在一起进行冲洗就可得到一张二维的纵向磁图。显然，这张磁图仅给出了磁场的位形分布特征，没有定量结果。要想获得定量结果，一个常采用的办法是用光度计对底片进行扫面，然后正负底片的结果相减并定标可得定量结果。

显然，基于照相的终端设备在如今看来其时间分辨率、定标的同一性、以及结果的非可视化都是不可接受的，另外虽然照相底片本身的空间分辨率非常高（目前的 CCD 仍无法与之比拟），但由于需要光度计扫描，其空间分辨率也是很低的。但尽管如此，在当时的技术条件下，这也不失为一个非常好的系统。

6.2 基于商用 CCD 的太阳磁像仪终端设备

太阳磁像仪终端设备的脱胎换骨起源于面阵探测器的出现。在 CCD 器件出现以前，天文中曾经应用过 RETICON 阵，但在太阳磁像仪中并没有形成规模，而且由于他们在天文方面的功能与 CCD 差不多而在大多数应用中性能又不及 CCD，因此很快被 CCD 器件所替代，所以此处不将其单独列出。

早期的商用 CCD 是为了与电视等配套的，所以采样格式采用视频制式，基本点在于：隔行扫描，频率 50 或者 60Hz。20 世纪 60 年代至 90 年代的太阳磁像仪基本都采用这种探测器，例如美国大熊湖天文台^[32]、马歇尔飞行中心^[33]、怀柔多通道望远镜中太阳磁场望远镜^[34]等的磁像仪都是典型代表。

图 6-1 是怀柔太阳磁场望远镜 1988 年建成的终端系统框图，基本参数见表 6-1。它主要由 151 图像处理器、PC 机、采集同步机构和 KD*P 高压控制机构构成。

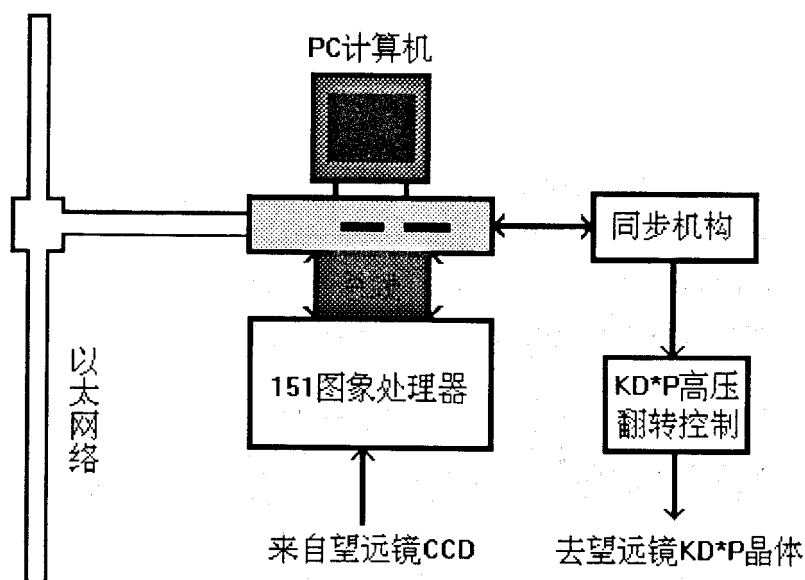


图 6-1 采用 151 图像处理器的磁场望远镜的终端系统^[35]

面阵	512*512
采样率	12.5FRAME/SEC
图像传输方式	复合视频信号
计算机	PC386
接收系统	ITI 151 图像处理器
操作系统	DOS
存储文件格式	自有格式
文件索引方式	文本文件，人工索引
表 6-1 35cm 太阳磁场望远镜终端系统建成时的基本参数	

该系统从 1988 年开始投入常规观测，到 2000 年，获得了丰硕的科学产出，但是，随着太阳物理研究的深入和电子技术的飞速发展，系统的一些不足也越来越显得突出和落伍。主要表现在以下几个方面（这些缺陷也是其他同类设备所共同面临的）：

（1）为了同电视制式配合而选用的商用 CCD 采用的是隔行扫描的方式，也就是曝光时把奇数行和偶数分别曝光。这样就需要将奇数行图像和偶数行图像拼起来才能得到一幅完整的图像，所以就造成了奇偶行不是同时得到，并且需要两次曝光才能得到一张完整的像，从而使得观测的时间观测的效率降低了一半，同时由于非同时性的大气状态也有所不同而使得奇偶行的空间分辨受到不同影响。因此该系统不利于高时空分辨率观测；

（2）由于这几款商用 CCD 没有曝光控制，为了同磁像仪电光调制元件保持完整的同步，采用了隔幅采样的方法，这样又损失了一半的曝光时间，即本来 25fps 的采样速率经处理器后损失一半，从而就造成了观测效率低。综合 1、2 两点就造成了在观测时真正用于观测的有效时间小于 25%观测时间。同时因为 CCD 没有曝光控制，这就导致曝光时间固定，无法根据观测条件和内容灵活调整曝光时间，从而得到最佳观测结果。

（3）CCD 像元尺寸纵向和横向也不是相等的，这会使得观测目标在纵向和横向没有统一的分辨率。

（4）151 图像处理器被设计成输入的视频信号被重新采样成 512*512，而不管原来的 CCD 芯片的规格，这样因为重新采样也会使每一个像素的横向纵向尺寸不等，造成了两方向的象元分辨率不相等。还有因为相机的信号被重采样成 512*512，这就导致全日面的像元分辨率非常低（4" /PIXEL）

(5) 受到当时的工艺水平限制, CCD 的信噪比、灵敏度在现在看来是比较低的。

由于这些缺陷, 并依托现代电子技术的水平, 选用性能更佳的科学 CCD 就成为了历史的必然。

6.3 基于科学 CCD 的太阳磁像仪终端设备

6.3.1 基于科学 CCD 的太阳磁像仪终端设备的优越性

首先, 我们先解释一下本论文中商用 CCD 和科学 CCD 这两个概念。此处所用的都是太阳磁场研究者惯用的词汇, 而不是严格和专用的术语, 不过对太阳磁像仪的使用者也不致引起误解。所谓商用 CCD 是指早期出现的以工业和民用(摄像机等)为主要目的的 CCD, 主要特点为视频信号、电视制式、横向纵向比 4:3、通过早期的图像采集和处理器后导致分辨率下降且横向纵向分辨率不统一, 但由于其商用特性, 价格低廉且无国际技术壁垒, 所以很快在太阳观测中占据了主导地位。而所谓科学 CCD, 是指针对前述 CCD 缺陷而出现的主要用于科学研究和高精尖技术领域的 CCD, 近年来随着技术水平的进步, 价格下降极快, 而且技术开放程度也越来越高, 因此逐渐取代了商用 CCD 成为太阳观测的主打探测器。作为商用 CCD 的后续者, 科学 CCD 在诸多方面较前者优越, 对于太阳磁像仪而言, 这些优越性也同样明显。其主要表现在以下方面:

(1) 时间、空间分辨率和磁场灵敏度提高。关于这方面, 上节中在阐述视频 CCD 的缺陷时已经非常清楚, 这也是我们用科学 CCD 替代视频 CCD 的主要理由与动因。由于受到观测条件的限制, 国际上地基望远镜的空间分辨率极少能超过 2", 灵敏度最高约为 5 高斯。但在我们改造后的磁场望远镜系统中, 通过图像相关、像选择等手段, 已经可以使课题观测的空间分辨率达到 1"、磁场灵敏度达到 2 高斯。作为比较, 美国大熊湖天文台是目前世界上具有最好空间分辨率的太阳磁场观测台址, 但也极少得到 1" 分辨率的磁图; 5 高斯的磁场灵敏度已经是世界先进水平, 而 2 高斯的磁场灵敏度则是国际领先水平。

(2) 灵活、可扩展。由于电子技术的发展, 产品更新换代非常快。而且所有的硬件都不可能保证在生命期内不坏。“备件”是解决问题的一个方法。但是因为电子产品换代很快, 所以渐进式更新可能更重要。所谓的渐进式更新就是保持原有的系统方案不变, 通过将某些部件更换成性能更高的部件以达到系统升

级的目的。这就要保证系统有可扩展性。比如能通过将 CCD 升级成更高性能的 CCD 以提高性能。在这期间已有的采集部分应该能兼容新的接收设备，已有的采集程序应该不需要怎么改动就能适应这种变化。如果当改动接收设备需要重新设计数据采集处理子系统的话就谈不上灵活性和可扩展性了。同样的我们也希望能很方便的升级计算机或者操作系统而不会带来兼容性的问题。这就要求个子系统之间的耦合不是那么紧密，而且留有足够的余量以适应渐进式更新的需要。通常来说计算机是更新得比较快的，其次就是图像接收设备（CCD），天文学家们总是想将最先进的探测器技术应用在他们的望远镜上，这样就要求数据采集，处理设备具有能应变各种不同的探测器的能力。如果当系统满足不了新的要求时更换硬件的代价应该尽可能的小。

（3）观测效率提高。采用逐行扫描的 CCD 能节省因隔行扫描的 CCD 带来奇偶场的曝光不同步的问题，使观测效率提高一倍。而选用有曝光控制的 CCD 又能减小与调制元件同步的采样率的损失。还有一个很重要的一点就是应该选用有电子快门的相机，一般来说能实现电子快门的 CCD 有两种形式：帧转移 CCD 和行间转移的 CCD，这两种 CCD 都能在传输图像的同时进行下一幅图像的曝光，这样就能节省出图像传输的时间，实现流水操作，而没有电子快门的相机需要一个附加的快门，不适应太阳磁场观测要求的高速度。

基于上述原因，科学 CCD 成为了近 10 年来太阳磁场探测器的主要选择，例如在美国大熊湖天文台^[36]、马歇尔飞行中心^[37]等都进行了这方面的更新改造工作。我们近年来也开展了多通道望远镜终端设备的更新与研制，此处介绍一下所完成的太阳磁场望远镜终端系统。

6.3.2 基于科学 CCD 的太阳磁场望远镜终端设备

图 6-2 是我们完成的太阳磁场望远镜系统框图。数据采集板是插在计算机里的一块 PCI 卡，同时因为要涉及到图像的叠加所以需要选择一块 DSP 卡作为运算元件。CCD 的复合视频信号被 CORECO 的 VIPER QUAD 图像采集卡数字化后通过 CAB（Coreco Auxiliary Bus）总线传输到 PYTHON DSP 板进行实时的图像叠加。DSP 板同时还负责产生高压调制信号。

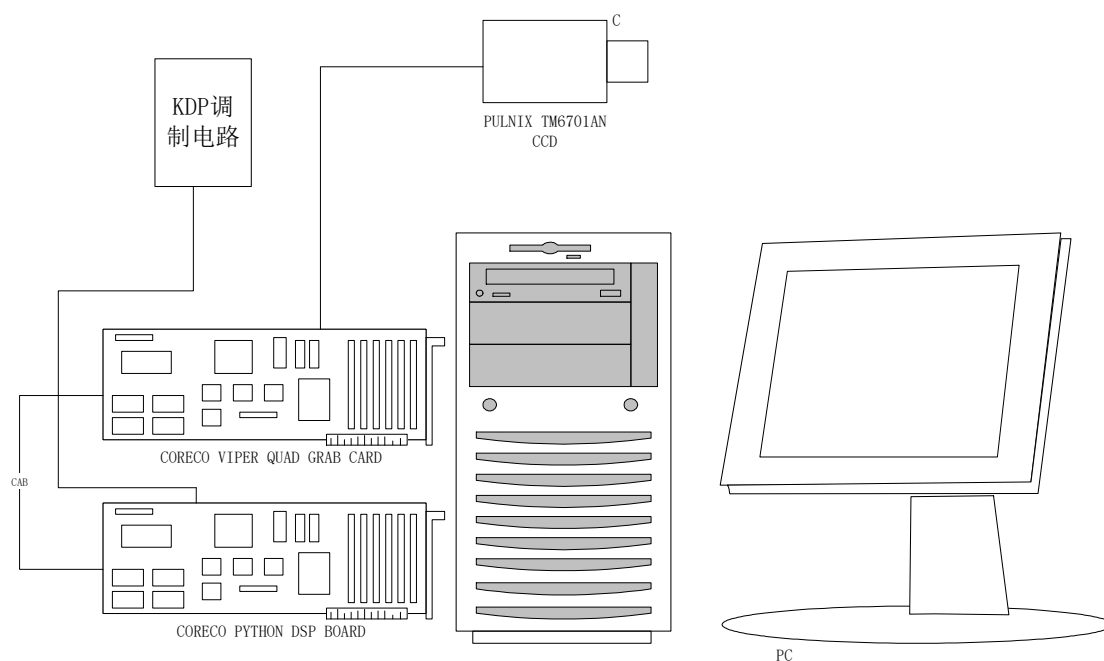
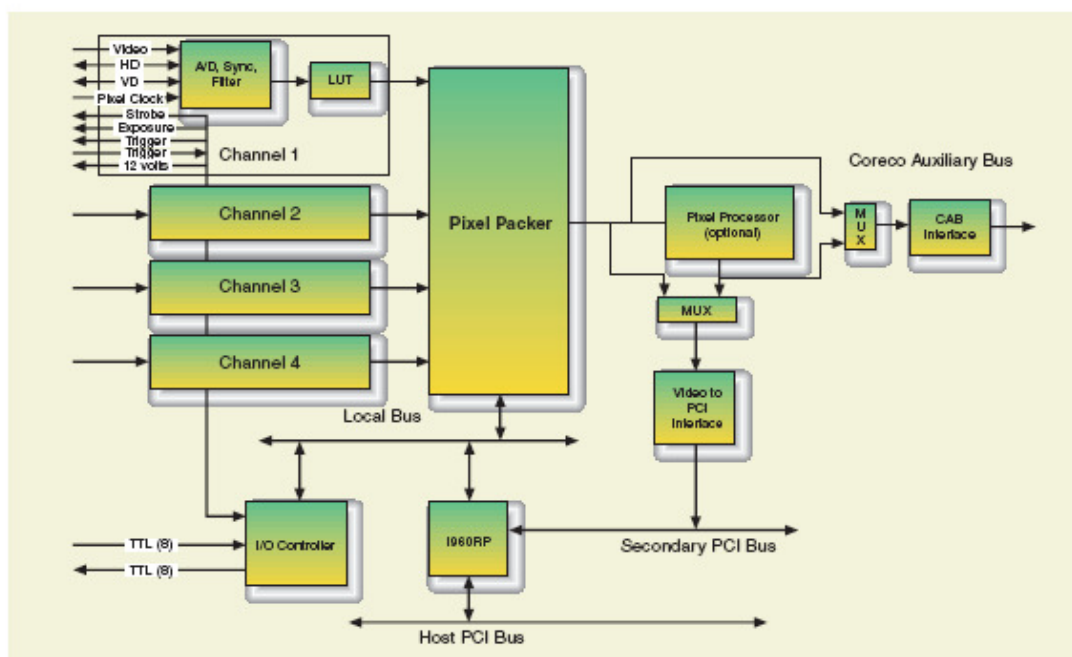
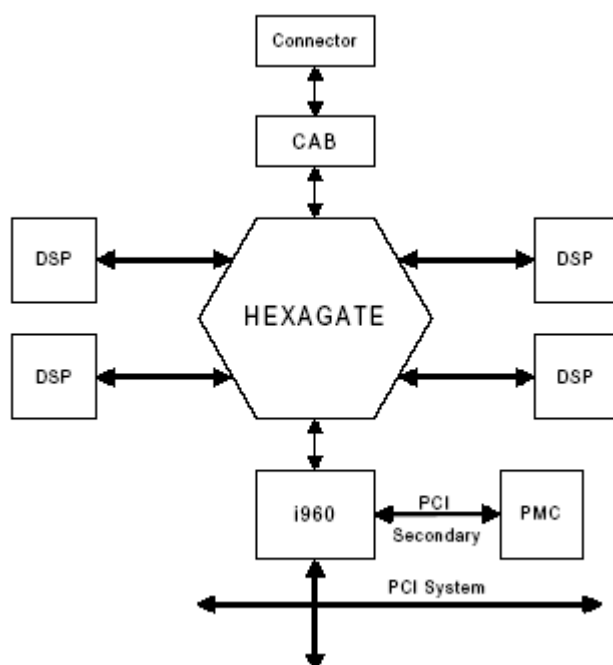


图 6-2 35CM 磁场望远镜新接收系统

以下简要介绍一下各个部分的组成：

1. 接收器：本系统选择的是 Pulnix 公司的 TM6701AN。前面已经介绍过了这是一款模拟输出、连续扫描的行间转移 CCD 相机，可以由外部控制曝光。像素时钟速率 25MHz，内置电子快门。因为 CCD 面阵上集成了微透镜阵列所以填充因子达到 100%。

2 图像采集板：我们选择的是 CORECO 公司的 VIPER-QUAD，这是一款四路模拟输入的图像采集卡，每通道 AD 变换速度可高达 40 兆，16 个通用 IO 端口，带有 CORECO 公司定义的 Cab 总线，可以同 CORECO 公司别的产品（处理器板等）相连。通过该总线将图像数据传输到处理模块，可以获得强大的处理能力。该总线的传输带宽高达 200MB/s。图 6-3 是采集板的组成图。

图 6-3: CORECO 公司的 VIPER QUAD 图像板的功能框图^[38]图 6-4: CORECO 公司的 PYTHON 处理器板的功能框图^[39]

3 处理器板：选用 CORECO 公司的 PYTHON。CORECO 公司的 PYTHON 板有几种规格，首先是分成了定点和浮点两种。浮点采用的是 TI 公司的 TMS320C6701 DSP

处理器, 有 1、2、4 处理器三种规格。定点采用的是 TI 公司的 TMS320C6201 DSP 处理器, 也有 1、2、4 处理器三种规格。这里选择的是单处理器的定点板。图 6-4 是该处理器板的组成图, 处在中心位置的是 HEXGATE, 用户可以编程使挂在 HEXGATE 上的六个设备中的任意两个设备进行双向的数据交换。CAB(Coreco Auxiliary Bus)被设计成可以同别的具有 CAB 的设备进行高速双向数据通讯, 这里具有 CAB 的设备既可以是图像采集板也可以是处理器板, 这就使处理器板具有了并联的能力, 极大地增强了处理能力。所以 PYTHON 处理器板非常适合需要对图像进行复杂处理的应用。

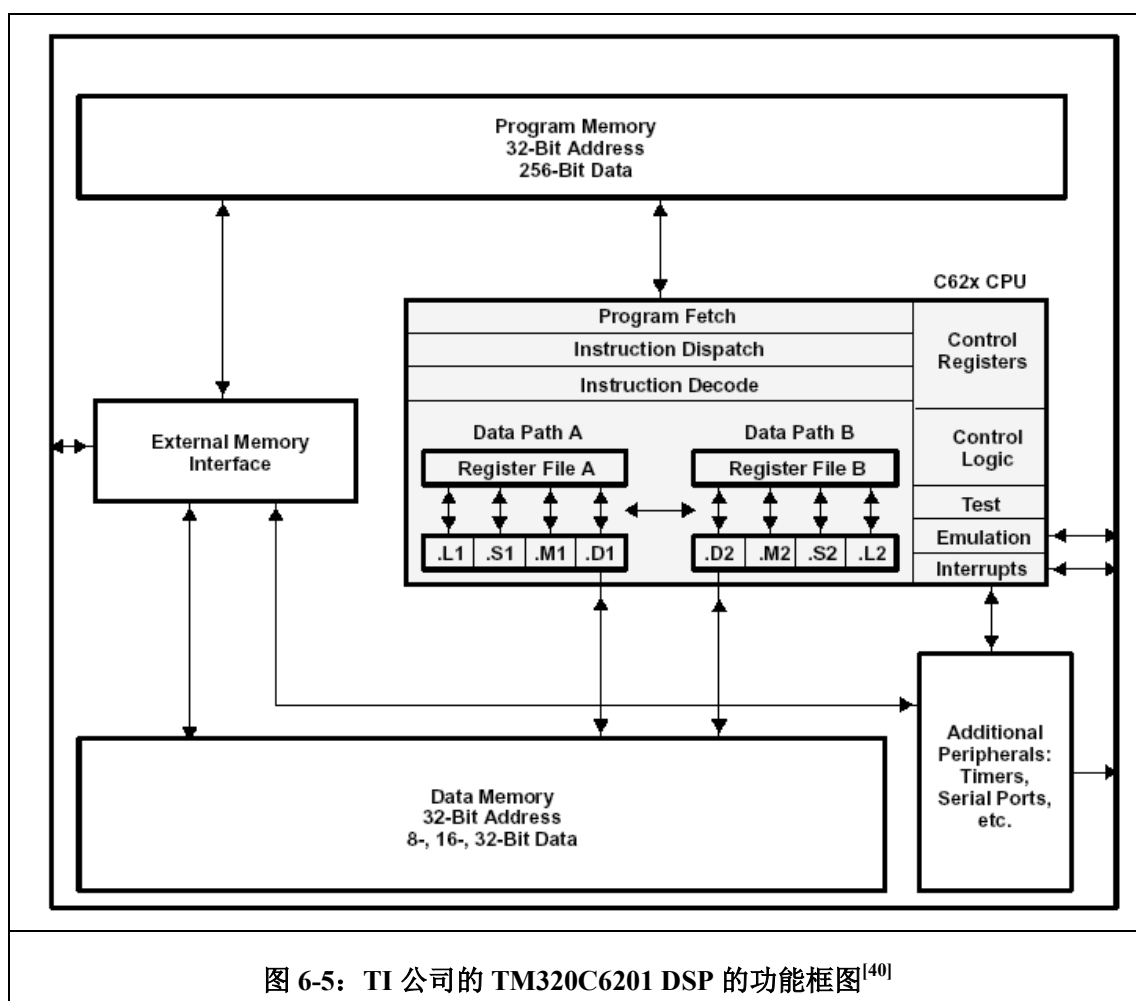


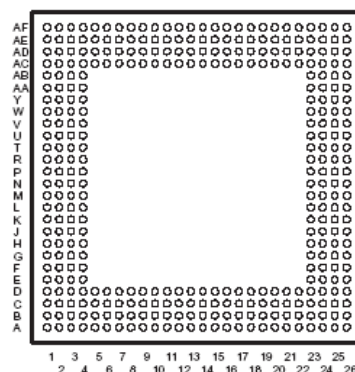
图 6-5: TI 公司的 TM320C6201 DSP 的功能框图^[40]

图 6-5 是 TM320C6201 DSP 的功能框图。它的核心部分是八个独立的运算单元, 被分成两组, 处理器可以在一个机器周期内从两个 DATA PATH 并发的取两组数据进行计算。处理器可以连接不同宽度的外部总线 (8,16,32), 内部数据宽度为 256 位以保证处理器有足够的带宽。同时集成了同步串行口 (MCBSP), DMA, JTAG 调试端口等非常有用的外设。这样, 它不但把 C 语言执行性能带到新水平, 还提供非常低的成本和功耗, 最适合宽带网络和数字影像应用。它应用了超长指令集技术, 使得该处理器在最好的情况下, 一个指令周期可以并发进行 8 个操作, 这样就大大提高了处理器的性能, 能在比较低的系统频率下得到很高的处

理能力。DSP 处理器内置的 DMA 模块能将外部数据读到指定的内存而不需要 CPU 干预，这大大减少了 CPU 准备数据所需要付出的开销。该处理器具有若干条总线能并发的从几条总线上获得数据，大大提高了数据吞吐效率。

- **High-Performance Fixed-Point Digital Signal Processor (DSP) TMS320C6201**
 - 5-ns Instruction Cycle Time
 - 200-MHz Clock Rate
 - Eight 32-Bit Instructions/Cycle
 - 1600 MIPS
- **VelociTI™ Advanced Very Long Instruction Word (VLIW) TMS320C62x™ DSP CPU Core**
 - Eight Independent Functional Units:
 - Six ALUs (32-/40-Bit)
 - Two 16-Bit Multipliers (32-Bit Results)
 - Load-Store Architecture With 32 32-Bit General-Purpose Registers
 - Instruction Packing Reduces Code Size
 - All Instructions Conditional
- **Instruction Set Features**
 - Byte-Addressable (8-, 16-, 32-Bit Data)
 - 32-Bit Address Range
 - 8-Bit Overflow Protection
 - Saturation
 - Bit-Field Extract, Set, Clear
 - Bit-Counting
 - Normalization
- **1M-Bit On-Chip SRAM**
 - 512K-Bit Internal Program/Cache (16K 32-Bit Instructions)
 - 512K-Bit Dual-Access Internal Data (64K Bytes) Organized as Two Blocks for Improved Concurrency
- **32-Bit External Memory Interface (EMIF)**
 - Glueless Interface to Asynchronous Memories: SRAM and EPROM
 - Glueless Interface to Synchronous Memories: SDRAM and SBSRAM
- **Four-Channel Bootloading Direct-Memory-Access (DMA) Controller with an Auxiliary Channel**
- **16-Bit Host-Port Interface (HPI)**
 - Access to Entire Memory Map

GJC/GJL
352-PIN BALL GRID ARRAY (BGA) PACKAGES
(BOTTOM VIEW)



- **Two Multichannel Buffered Serial Ports (McBSPs)**
 - Direct Interface to T1/E1, MVIP, SCSA Framers
 - ST-Bus-Switching Compatible
 - Up to 256 Channels Each
 - AC97-Compatible
 - Serial Peripheral Interface (SPI) Compatible (Motorola™)
- **Two 32-Bit General-Purpose Timers**
- **Flexible Phase-Locked Loop (PLL) Clock Generator**
- **IEEE-1149.1 (JTAG†) Boundary-Scan Compatible**
- **352-Pin BGA Package (GJC Suffix)**
- **352-Pin BGA Package (GJL Suffix)**
- **CMOS Technology**
 - 0.18-μm/5-Level Metal Process
- **3.3-V I/Os, 1.8-V Internal**

图 6-6: TMS320C6201 的特性表^[40]

4 计算机，采用的是运行 WINDOWS2000 的 PENTIUM III 系统。

5 驱动程序：这里 CORECO 应用了对象的概念，力图为 VIPER 系列的图像采集板提供一个类似的应用程序界面，被称为 SAPERA 库。该库掩盖了 VIPER 系列的图像板驱动程序之间的不同，为用户提供了统一的接口。图 8-7 描述了 SAPERA 库的各个组件。

这里应该指出，并不是所有的 VIPER 系列的图像采集板都具有上述的所有功能，用户应该知道该图像采集板具有哪些模块，或者通过询问该父模块的功

能来完成检查该资源所具有的功能。用户通过 SAPERA 库的上述各种模块来完成图像的采集传输，计算，显示，存储。下面是各种功能的标准调用顺序。

- (1) 获得对象的 handle(句柄)，
- (2) 询问该模块的功能并设置参数，
- (3) 操作该句柄，
- (4) 释放句柄。

可以看出句柄在这里起到了很重要的作用，因为几乎所有的功能都是通过这几步来完成的，这样就起到了降低学习难度的目的。即使这样，由于该图像板的功能繁多，为了能适应很多不同的 CCD 相机，CORECO 添加了很多参数，加之文档解释不够清楚（关于 SAPERA 库 API 的文档就有 1300 页，这为用户带来了极大的不便），给开发带来了很大的困难。

驱动程序的另一部分就是关于 PYTHON 的处理器板。CORECO 公司提供了关于 TMS320C6XXX 系列的基本库函数。通过这组函数可以操纵 DSP 来管理内存，从 CAB 或者通过 PCI 总线从宿主机上传输数据，完成一些计算操作。在这里 CORECO 公司提供了 TI 公司的 CCS 程序用于 DSP 端程序的开发^{[41][42][43]}。

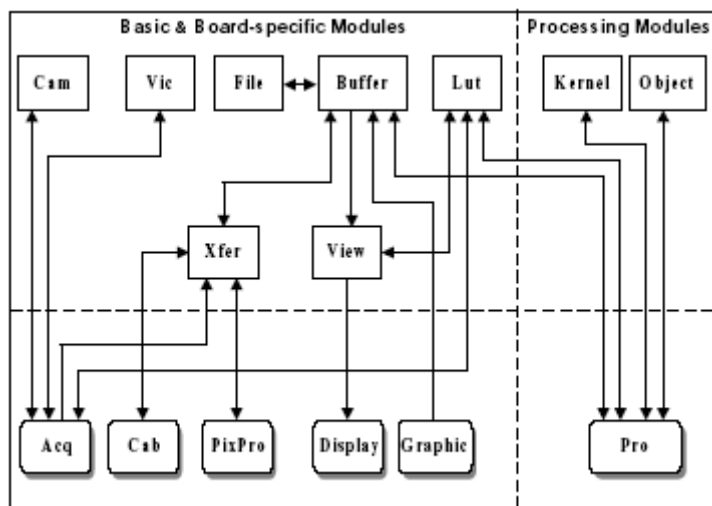


图 6-7: CORECO 公司 SAPERA 库的各个组件及相互关系^[44]

箭头代表数据的流向

6、数据采集程序。程序被分成三部分：前台程序，操纵图像板的线程^{[45][46]}，

DSP 端的程序。下面简单介绍一下这三部分：

(1) 前台程序：前台程序接受用户的输入，把用户输入的命令解释后执行。执行单元分成下面几部分：

(a) 图像显示。应用了 SAPERA 库中的显示模块，从图像板传输到宿主机的图像被显示模块直接显示到屏幕上。另一个功能是将计算的结果显示在另一个窗口上。

(b) 数据存储，数据库管理。观测结果被以 FITS 格式保存在硬盘上，同时被纪录的还有相关的索引信息，这里应用微软公司的 ODBC 数据库接口将索引保存在 ACCESS 数据库^{[47][48]}里。之所以选择 ACCESS 数据库是因为该数据库是同微软的 OFFICE 一同销售的，所以获取比较方便，不用特意安装特定的数据库程序。图 6-8、图 6-9 是数据库的结构图和数据库的相关图

(c) 相机管理，通过 SAPERA 库来控制相机的曝光时间，增益，底值，数据传输。怀柔观测站是常规观测，一般是国内人员操作，为便于操作，减少外语可能带来的歧义，整个界面都被设计成中文显示。这样就降低了培训观测人员的成本。

	字段名称	数据类型
	自动编号	自动编号
	文件名	文本
	自编位置索引	文本
	宁静度	数字
	清晰度	数字
	像质	数字
	定标系数	数字
	曝光时间	文本
	叠加帧数	文本
	消去底值	文本
	波长	数字
	观测内容	数字
	注释	文本
	温度	文本
	观测者	文本
	日期	日期/时间
	增益	数字
	天气	文本

图 6-8：数据库中主表（文件索引表的数据结构）

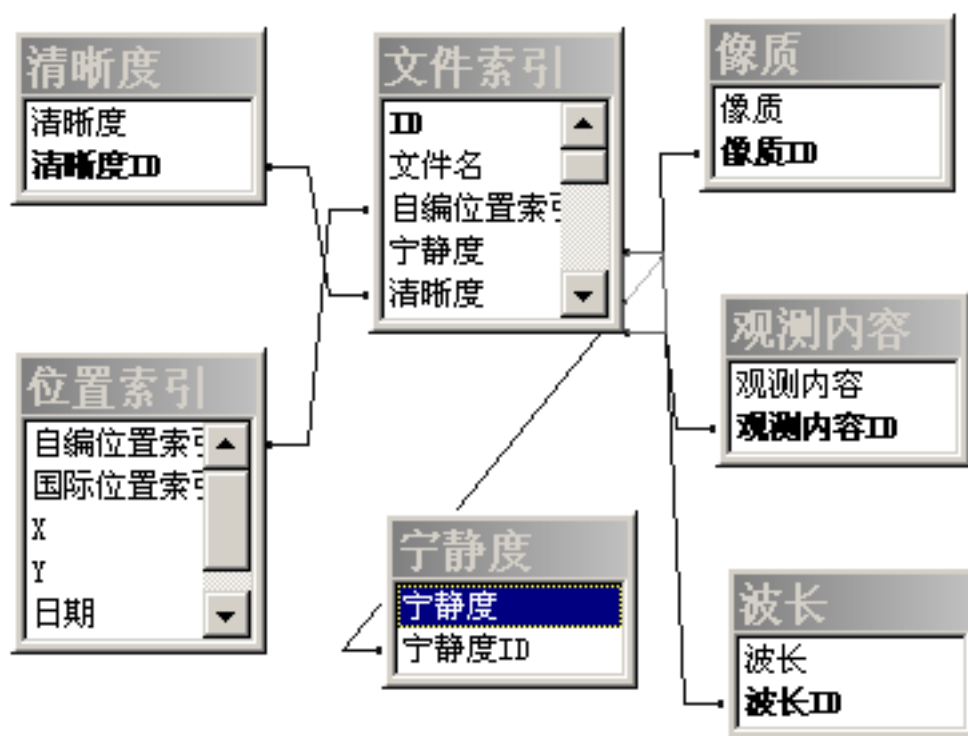


图 6-9: 数据库中各表之间的关系

(2) 操纵图像板的线程。因为界面程序主要是同用户交互，很多时间是在等待用户的输入，又因为图像板产生的事件是周期性的，为了避免用户输入影响相机的事件，这里应用了多线程的技术，将操纵相机的程序独立于界面程序，两者之间用消息机制来异步的传递消息，就是发送方不用等到接收方响应就返回，接受方按照消息到达的先后来执行，这样发送和接收就不是同步的，称为“异步”。需要说明的是，界面程序是不允许操纵 SAPERA 库的（除了初始化和删除对象），这样是为了保证 SAPERA 库程序在同一时间只被一个程序调用，保证了 SAPERA 库不会重入。这就降低了程序出错的机会，提高了可靠性。

(3) DSP 端程序。由一个单独的线程控制 DSP 端程序，该线程也是通过异步的消息机制同界面程序交互。DSP 端的程序通过 SAPERA 库提供的异步消息机制同控制线程进行交互。该程序是由 C 语言编写的。在进行积分时 DSP 需要同步控制调制元件，这里因为 DSP 没有 GPIO（通用输入输出），所以将 320C6201 的多通道串行总线的几条引出腿编程作为 GPIO。这几条 IO 被图像板的积分信号同步，达到了与曝光同步的要求，提高了观测效率。

6.3.3 试观测结果

表 6-2 列出了新系统和基于商用 CCD 系统的比较，从中可以看出，新系统

大大提高了观测的效率，同时提高了系统的分辨率。图 6-10 更明显地展示了这一结果。本图是太阳磁场望远镜新（右）老（左）图像系统观测结果比较。测量日期为 2003 年 9 月 20 日，时间相差不到 10 分钟，其间天气状态无明显变化。观测对象为全日面纵向磁场（本图为观测图像的一部分），像元大小约为 $4''$ ，叠加帧数为 256 帧。可以看出，新系统的磁场灵敏度（ $3\sigma \cong 8.6\text{Gauss}$ ）明显高于旧的系统（ $3\sigma \cong 28\text{Gauss}$ ）。磁场灵敏度的确定方法如下：选取同一幅图像的无（强）磁场区，计算其绝对值的均方差，取为 1σ ，通常认为当观测值大于 3σ 时是真实可信的信号。这里要强调一点，因为老系统已经严重老化，所以其灵敏度远远低于新系统；历史上磁场望远镜在同样观测条件下所能达到的灵敏度约为 10Gauss 左右，如果以此为据，我们至少可以说新系统在磁场灵敏度方面比老系统有一定的提高。

面阵:	512*512	640*480
采样率:	12.5FRAME/SEC	60FRAME/SEC
图像传输方式:	复合视频信号	复合视频信号
计算机:	PC386	PIII
接收系统:	ITI 151 图像处理器	CORECO VIPER QUAD+PYTHON C6
操作系统:	DOS	WINDOWS 2000
存储文件格式:	自有格式	FITS
文件索引方式:	文本文件, 人工索引	ACCESS 数据库
表 6-2: 新旧两个系统的比较表		

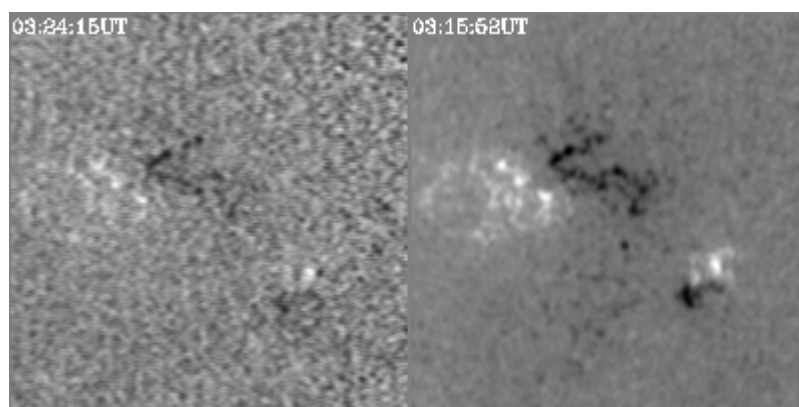


图 6-10: 新旧系统采集的数据的对比

两图是在同一天用新旧两个系统的道的同一活动区的数据, 左面是旧系统, 右面是新系统

6.4 传统终端设备的不足及新一代终端设备

在完成了新的 35CM 磁场望远镜终端系统的研制以后, 我们认为系统中还存在一些不方便的地方。

首先, 系统开发的代码和经验的可复用性低, 系统的后续支持状况难料。关于 SAPERA 库 API 的文档就有 1300 页, 这需要大量时间来学习; 同时关于 SAPERA 库现在已经从当初购买时的 2.0 版升级到 5.0, 应用程序界面 (API) 作了很多修改。所以原来的程序有可能已经不能在现在的库下运行了, 也就是说, 无法享受新的库程序带来的好处, 而且生产厂商已经不提供旧的库程序的支持, 所以如果新建成的系统坏掉了就很难购买新的板子来维修, 而厂家也不提供电路图, 自己维修起来也很困难。所以很有可能硬件出问题就意味着要重新编写程序, 代价很大。

其次，还是因为厂家不提供电路图，所以无法根据自己的需要进行优化底层的库函数，导致 DSP 的强大功能无法发挥，使软件方式实现摹写算法的速度较慢（多数时间都浪费在低效的驱动程序上了）。

最后，天文上的应用同工业应用不同。天文应用有一些特殊的要求，而图像板生产厂商一般来说面向的是工业应用的需求（因为需求大），为了满足工业客户图像处理库被不停的添加诸如图像识别等天文上不需要的功能，这导致投资的浪费。因为是捆绑销售，无法剥离这些功能。这导致两方面的害处：首先是浪费了投资，其次是增加了学习时间，无用的函数和有用的混在一起，导致学习时间的增加。

鉴于上面的原因，为了更加有效的利用有限的资源，节约人力物力，我们经过反复研究提出了将基于网络的终端设备技术应用于望远镜的构想并作了一系列的实验，取得了良好的实验结果，随时可以应用于新的望远镜系统。我们的目的就是构造一个能够快速的满足天文上需求的模块，这个模块应该能被很容易的编程，具有很大的灵活性，可以很容易的扩展，正好满足需求，并且造价可以被天文学家接收。下一章将详细介绍这一新的想法和试验结果。

第七章 新一代终端设备——嵌入式系统在太阳磁场观测中的优越性

7.1 传统终端系统开发时存在的问题

在上一章中，我们已经讨论了传统的、如怀柔太阳磁场望远镜的终端系统是采用计算机+图像采集板+CCD 这种形式来构成，在这种系统中开发工作主要集中在图像采集板的开发使用方面，这就导致了一系列的问题，从而提出了采用嵌入式系统的优越性。在下面各节中，我们将对此问题进行讨论。

7.1.1 系统开发的代码和经验的可复用性低

因为每一家公司的图像采集卡支持的开发平台，提供的操作函数都是不一样的；而且即使是同一个公司的产品，随着其产品的升级，随着操作平台和开发工具的升级和改变，这些板卡所依赖的开发平台和函数也都会有相应的升级或改变。举个简单的例子：微软的操作系统从 Win95, Win98, 到 Win2000, XP 在短短的几年之内就有了 4 次升级，而开发工具的变更则更是令人眼花缭乱，从最初的 TC, BC, 到前一段时间流行的 VC5.0, VC6.0, 发展到现在流行的 BCB, .NET 等等。在这种情况下，要开发新的系统的时候，必然要采用一种当前应用广泛的系统和编程工具，这就造成了前面一个系统开发设计的代码和经验等无法在后续系统或者是新的系统中得到很好的使用，造成了不必要的人力和财力的浪费。

7.1.2 系统的后续支持状况难料

这样一个使用采用图像采集板的系统会遇到的另外一个问题——图像采集板设计公司的运营问题，一旦该公司的营运出现问题，系统的后续支持就会受到比较大的影响。因为系统的开发工作都是建立在该公司提供的 API 函数之上的，如果出现了新的操作系统或者是新的编程工具，而该公司无力或者是不愿意在一块图像采集板开发新的驱动程序，提供新的 API 函数，那么原有的图像采集系统就不得不维持旧的操作系统和工作平台，想要开发新的系统就意味着原有系统的报废，同时也意味之一切从头重来，工作量之大可想而知！

7.1.3 软件方式实现摹写算法的速度较慢

因为使用软件方式来实现算法，必然受到操作系统的非实时性，开发平台的效率等方面的限制，这就造成了使用软件算法来实现数学运算函数所需的时间同使用硬件芯片实现的系统相比有着很大的差距。在前一章介绍的磁场望远镜的终端系统里应用了 TMS320C6201 DSP 处理器，因为需要将图像数据通过 CAB 由 DMA 传输到 DSP 片内，由于厂家没有提供具体的原理图，DMA 传输就只能调用厂家提供的子程序，而该子程序是要等传输完成后才返回的，在这中间 DSP 就处于等待状态，大大降低了系统的效率。

7.1.4 永远买不到完全符合需要的产品

以我们现在用的 CORECO 图像处理库为例，库里包含了很多天文上不需要的功能，而这些功能的开发说到底都是需要用户买单的。就硬件来讲图像采集板可能有很多用不到的功能，以我们现在用的 VIPER QUAD 板来说，该板具有 4 路输入，而我们的相机是高速相机，同时几路的采集会造成带宽不够，产生浪费。

7.1.5 性能指标不完全真实可靠

生产厂商为了使产品尽量占领市场，在产品介绍里多少有些夸张，或者在广告里试图误导潜在的用户。这在购买时可能不会知道，买后会给用户带来麻烦。问题小的会给延长开发时间，问题大的就会根本不能用，造成退货。

7.1.6 开放程度与技术支持总是问题

生产厂商为了保护自己的利益，不会将产品所有的细节提供给用户。对像天文这样的特殊应用领域，实现一些特殊的功能就会很麻烦，需要反复同厂家打交道并加上一些猜测。

7.1.7 费用超出实际价值

鉴于这些原因，为了更加有效的利用有限的资源，节约人力物力，我们通过研究提出了将 FPGA 技术应用于望远镜观测技术的构想并作了一系列的实验，取得了良好的实验结果，本章将就这一研究作较为详细的介绍。

7.2 嵌入式系统

首先介绍一下什么是嵌入式系统。嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可裁剪，适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户的应用程序等四个部分组成，用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

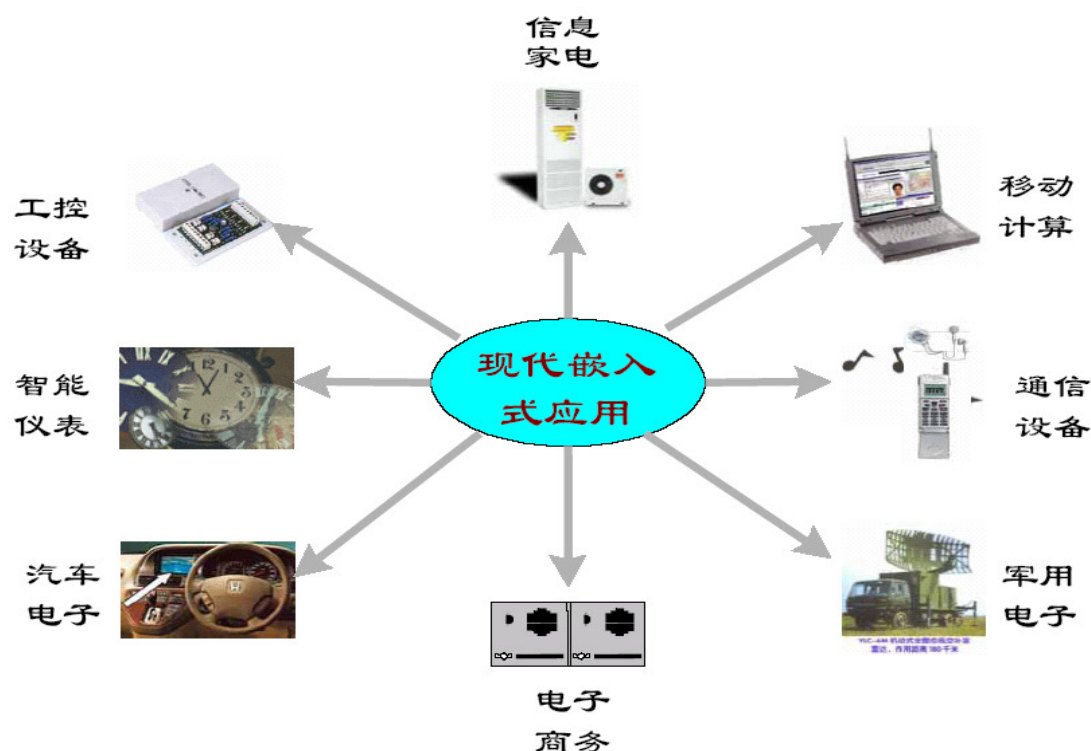


图 7-1: 无所不在的嵌入式系统

7.2.1 嵌入式系统的组成

嵌入式系统^{[49][50][51]}包含硬件和软件两部分：硬件架构上以嵌入式处理器为中心，配置存储器、I/O 设备、通信模块等必要的外设；软件部分以实时操作系统为核心，向上提供应用编程接口（API），向下屏蔽具体硬件特性的板级支持包 BSP。嵌入式系统中，软件和硬件紧密配合，协调工作，共同完成系统预定的功能。

BSP 是板级支持包，是介于主板硬件和操作系统之间的一层，应该说是属于操作系统的一部分，主要目的是为了支持操作系统，使之能够更好的运行于硬件主板。BSP 是相对于操作系统而言的，不同的操作系统对应于不同定义形式的

BSP。

实时操作系统 (Real Time Operation System) 和一般商用多任务 OS 的不同是它重点追求的是实时性、可确定性、可靠性,当然也包括有限资源的管理。

7.2.2 嵌入式系统的应用软件设计

大型嵌入式系统的应用软件的顶层设计一般首先采用面向对象的方法建模,比如 UML 建模,然后逐个模块完成代码部分。代码部分一般采用 C 语言或 C++ 完成。采用 C++ 的优点就是可以直接使用面向对象的机制。若要采用 C 语言完成相应的面向对象架构,就要手工去搭建面向对象的模型。比如通过在结构体中添加函数指针来模拟类。

有一个非常重要的问题,就是软硬件的协同设计。传统的方法是首先搭建硬件平台,然后才能开始软件的设计,这样是非常低效的。后面将要介绍的 SOPC 方法,就可以实现软硬件的协同设计。

7.2.3 嵌入式系统的硬件设计

嵌入式系统硬件设计分为三个阶段。首先是以 CPU 为中心配合外围通用控制芯片。这是最先的一种嵌入式系统硬件设计方法。它的缺点就是一旦电路成型,就无法对硬件修改,缺乏灵活性。其次是以 CPU 为中心配合外围 FPGA 实现的控制功能。这种设计方法灵活性较高,外围的组合逻辑及时序逻辑都由可编程逻辑器件 FPGA 实现,电路成型后,也可以对这一部分的功能进行修改,但缺点是电路的核心 CPU 部分无法动态修改。更高密度、低成本的可编程逻辑器件的出现,以及 IP 库^[52]的不断丰富完善,功耗的不断降低促成了一种新的嵌入式系统设计方法的出现,即 SOPC。相对于前面两种类型的嵌入式系统改方案提供了更高的灵活性。

7.3 可编程片上系统 (SOPC)

随着电子技术的发展,出于降低系统成本提高系统的可靠性的目的,越来越多的功能被集成进了中央处理器,近年来有人提出了可编程片上系统,就是用可编程逻辑技术把整个系统放到一块硅片上,称作 SOPC。SOPC (片上可编程系统。System on a programmable chip) 是一种灵活、高效的解决方案,它将处理器、处理器总线,存储器、大容量存储器接口,可编程 I/O 端口、以及各种

可由逻辑电路实现的处理器外部设备等系统设计需要的东西集成到一个 PLD 器件上，构建成一个可编程的片上系统，它所具有的灵活性、低成本可让系统设计者获益非浅。可编程片上系统（SOPC）是一种特殊的嵌入式系统：首先它是片上系统（SOC），即由单个芯片完成整个系统的主要逻辑功能；其次，它是可编程系统，具有灵活的设计方式，可裁减、可扩充、可升级，并具备软硬件在系统可编程的功能。

7.3.1 SOPC 的特点

SOPC 结合了 SOC 和 PLD、FPGA 各自的优点，一般具备以下基本特征：（1）至少包含一个嵌入式处理器内核；（2）具有小容量片内高速 RAM 资源；（3）丰富的 IP Core 资源可供选择；（4）足够的片上可编程逻辑资源；（5）处理器调试接口和 FPGA 编程接口；（6）可能包含部分可编程模拟电路（锁相环等）；（7）单芯片、低功耗、微封装。

7.3.2 SOPC 的技术内容

SOPC 设计技术涵盖了嵌入式系统设计技术的全部内容，除了以处理器和实时多任务操作系统（RTOS）为中心的软件设计技术、以 PCB 和信号完整性分析为基础的高速电路设计技术以外，SOPC 还涉及目前以引起普遍关注的软硬件协同设计技术。由于 SOPC 的主要逻辑设计是在可编程逻辑器件内部进行，而 BGA 封装已被广泛应用在微封装领域中，传统的调试设备，如：逻辑分析仪和数字示波器，已很难进行直接测试分析，因此，必将对以仿真技术为基础的软硬件协同设计技术提出更高的要求。同时，新的调试技术也已不断涌现出来，如 ALTERA 公司的片内逻辑分析仪 signaltap II Logic Analyzer 就是一种价廉物美的片内实时调试工具。

7.3.3 SOPC 在嵌入式系统设计中的优势

(1) 设计的灵活性

SOPC 具有无比的灵活性，只要可编程器件的容量允许，几乎可以实现任何的设计（数字部分）。这使得硬件设计可以同软件设计同步进行，这就加快了设计的速度。同时也有可能使一种设计适应很多不同的应用（只要容量允许），这也使其在某些方面具有了规模优势。

(2) 软硬件协同设计

SOPC 实现了软硬件协同设计共同完成目标。前面介绍了 SOPC 有可能实现相同的硬件电路满足不同的要求。在这里面 FPGA 内部的硬件设计是不相同的,所以在 SOPC 的硬件设计上,实际是硬件软件化。硬件软件化的好处也是在灵活性,并且在 SOPC 设计里软件同硬件的界限不是很明显,设计者可以灵活的分配软硬件的比例。比如有些设计对时间要求不高,内嵌的处理器可以通过软件完成,用户就可以将这部分设计成软件实现。而如果某些功能对实时性要求很高,并且需要很多的计算,软件实现对处理器要求很高,就可以将这部分用硬件实现。这样既提高了系统的性能又没有提高系统时钟频率,从而也降低了系统的功耗。用户甚至可以定制处理器,把需要经常用到的指令组合定制成一条特殊指令,这样也实现了硬件加速。软硬件协同设计可以在付出不多的情况下极大的提高系统的性能,当然这需要设计人员的丰富经验,但随着越来越多的系统设计转向 SOPC,有经验的工程师也会越来越多。

7.3.4 SOPC 的前景

SOPC 是 PLD 和 ASIC 技术融合的结果,目前 0.13 微米的 ASIC 产品制造价格仍然相当昂贵,相反,集成了硬核或软核 CPU、DSP、存储器、外围 I/O 及可编程逻辑的 SOPC 芯片在应用的灵活性和价格上有极大的优势。SOPC 被称为“半导体产业的未来”。

7.4 天文上应用 SOPC 的可行性

7.4.1 灵活性

在天文领域有很多电子设备因为高度的专业性,都需要自己研制。这里面有很大一部分都应用了数字技术,而这些仪器五花八门,功能各异。因为功能上缺乏共性按照传统的思路只能分别的研制,这就导致了天文仪器研制效率低下。现在有了 SOPC,因为 SOPC 的高度灵活性,就有可能简化系统设计,而只改变软件就可以。因此,SOPC 的灵活性适应了天文应用的多样性。

7.4.2 技术支持

现在市场上提供 SOPC 解决方案的有两个大的厂商 XILINX 和 ALTERA,这两

个厂商占据了世界 FPGA(现场可编程逻辑阵列 Field Programmable Gate Array) 市场最大的份额, 在技术支持上有很大的优势。上面谈到的解决方案都有非常完备的文档和丰富的设计样例, 所以很容易得到这些厂商的技术支持。还有一个原因就是 SOPC 的应用是一个纯技术领域的问题, 可以避免与天文需求直接挂钩, 从而便于与供应商之间的沟通, 可以借鉴很多他们在别的领域获得的宝贵经验, 提高工作效率。

7.4.3 开发速度

因为有了完备的开发工具, 最后编程落实到了标准的 C 语言^[53] 和硬件描述语言 (HDL) ^{[54][55][56]} 涉及到驱动程序的库函数很少, 所以减少了软件开发的时间。而硬件方面如果购买现成的开发板的话, 将只涉及到用户接口电路和模拟部分, 这就大大简化了硬件设计。

7.4.4 后续效应

由于前面所说 SOPC 的灵活性, 具有了 SOPC 的开发经验以后很容易将经验转移到别的应用上, 所以说后续效应比较好, 不像把设计依附到某些专有的平台, 如果转到别的应用或者系统升级就意味着以前的学习成果贬值。

7.4.5 安全性

PC 机的安全性差是由于它的复杂性导致的, 复杂的系统会带来很多安全上的问题。在天文上应用的 SOPC 系统, 目的单一, 一般比较简单, 又因为是专有系统, 所以遭黑客攻击的风险较小。

7.4.6 后续支持

当 SOPC 系统不能赶上新的要求时 (比如探测器更新导致可编程器件的速度或规模不能满足要求时), 在一定范围内只需简单的更换更高速度等级更大规模的系统芯片就可以升级, 使其具有更高的性能, 适应天文上新的要求。

7.4.7 成本

天文应用一般来说需求的量很小, 对成本并不是很敏感, 如果说一个硬件能适应很多需求的话, 虽然 SOPC 系统有可能售价上比专有系统高, 但是它可以节

省很多研制费用。这样也就节省了成本。降低了总造价。

基于上述这些方面的考虑，我们应用 ALTERA 公司的可编程片上系统研制了怀柔的全日面磁场望远镜终端系统。下面我们就这个系统做一下全面的介绍。

第八章 基于 SOPC 的全日面磁场望远镜的终端系统

前文中，我们着重讨论了嵌入式系统，特别是其中的 SOPC，在天文观测中应用的优越性与前景，基于这些研究，我们设计了一个用于怀柔 10CM 全日面太阳磁场望远镜上的终端设备。本章将对这一系统进行介绍。

8.1 以太网在天文上观测的应用

很多场合下，天文观测需要大视场多波长的观测，这样因为需要将很多波长的光分别成像，所以很多场合下往往是一台望远镜配备了多台接收设备（如 CCD 相机等），而且随着研究的深入还有可能添加新的接收设备。传统的做法是一台相机由一台计算机控制，这样就需要很多台计算机，从而给控制管理带来很大麻烦，因为缺乏一个统一的控制台，操作人员同时控制几台计算机很麻烦。另外如果添加了新的设备或者更新了某些设备，就需要调整原来的整个系统，这也带来了很多额外的工作。将所有控制接收设备的计算机通过以太网连起来，设置一台主控计算机，通过标准的 TCP/IP^{[57][58]} 协议来进行控制和数据传输，这样可以部分解决问题。随着嵌入式系统的发展，现在嵌入式的计算机已经能够完成原来需要台式计算机才能完成的数据采集工作。通过扩展了网络功能的嵌入式计算机，各种相机的数据可以很容易的通过网络传输到中央控制台。这些嵌入式的数据采集设备可以被做成非常紧凑的标准模块，这样更换起来就很容易，也节省了备件的费用（单一设备简化了需备份的种类）。

通过以太网来控制数据采集设备有几大优点：

（1）连接简单。只需一根电缆就可进行双向的数据传输。通过高度成熟的 TCP/IP 协议可以使双向数据安全的传输到指定的地方。

（2）连接形式多样。以太网可以有多种组网方式，既可以通过集线器（HUB）以共享带宽的方式传输数据，也可以通过交换机实现点对点的并发传输数据。

（3）扩展方便。只需从交换机的空余端口连一根线就可以增加设备。同时因为都是运行标准协议的设备，替换也很方便。

（4）接口标准，编程容易。因为网络协议是标准的，所以对编程很有利，可以很容易找到开发人员，降低了对人员的要求。现代的操作系统大部分集成

了对网络的支持，应用程序访问网络不再需要特殊的程序支持。

(5) 客户端核心程序具有跨平台的能力。因为涉及网络的接口程序 SOCKET 在 WINDOWS 平台和 UNIX 平台上是一样的，所以核心程序可以不用修改地做到跨平台的移植。不像某些专有的系统，厂家只提供单一平台的驱动程序。

(6) 远距高速传输。这几年，以太网已经升级到 100Mb/s，并且使用廉价的双绞线就可以使传输距离达到一百米。同时当千兆以太网普及后还可以升级到千兆网，以提供更高的带宽，满足更高速数据传输的要求。

标准名称	传输介质	传输距离（米）
1000Base-SX	62.5/125 μ m 多模光纤	220
	50/125 μ m 多模光纤	500
1000Base-LX	62.5/125 μ m 多模光纤	550
	50/125 μ m 多模光纤	525
	单模光纤	3000
1000Base-T	五类非屏蔽双绞线	100
100Base-TX	五类非屏蔽双绞线	100

表 8-1：以太网传输标准，传输介质，传输距离的关系

怀柔太阳多通道望远镜 1988 年建后很多年过去了，现在基于前面介绍的原因我们决定用新的系统改造其中全日面磁场望远镜的终端系统。表 8-2 给出了怀柔太阳多通道望远镜 1988 年建成时的全日面磁场望远镜的终端系统框图。

面阵：	512*512
采样率：	12.5FRAME/SEC
图像传输方式：	复合视频信号
计算机：	PC386
接收系统：	ITI 151 图像处理器
操作系统：	DOS
存储文件格式：	自有格式
文件索引方式：	文本文件，人工索引。

表 8-2：建成时的全日面磁场望远镜的终端系统

经过仔细研究，我们决定在这里尝试采用网络化的嵌入式系统来构造望远镜终端。首先来介绍一下 ALTERA 公司的 SOPC 解决方案。

8.2 ALTERA 公司的 SOPC 解决方案

8.2.1 Cyclone™系列的 FPGA.

2002 年 ALTERA 公司为了争夺大规模应用的市场,推出了 Cyclone™^[52] 器件系列,这是该公司的大容量低成本的产品系列(在某些方面作了简化)。Cyclone 器件具有多达 20,060 个逻辑单元(LE)和 288KBIT 的 RAM,能够集成许多复杂的功能(大概相当于百万门)。Cyclone 器件提供了多个全功能的锁相环(PLL)来管理板级时钟网络,和专用的 I/O 接口同工业标准的外部存储器件相连接。ALTERA 的 NIOS®嵌入处理器和丰富的 IP 库用 Cyclone 器件进行开发。ALTERA 公司的软件使用费也是比较低的,用户可以很容易地从 ALTERA 网站内下载免费的网页版 Quartus® II 软件。这就进一步降低了初学者的门槛和学习的费用,及购买软件但设计失败造成的支出。Cyclone 器件把低成本结构和大批量器件资源相结合,配合以用的软件,能够实现完整的可编程单芯片系统(SOPC)解决方案。

我们之所以在天文应用上选择 Cyclone 器件,主要原因也是因为 Cyclone 器件系列的低价格和高容量。有了这两点就可以很容易的构造适合天文应用的可编程片上系统(SOPC)。

8.2.2 ALTERA 公司的 SOPC 解决方案

在基于 PLD 处理器的工具的使用过程中,最重要的是设计流程。如何能让硬件工程师和软件工程师很好的协同工作,这是高效工作的一个重要因素。ALTERA 推出 SOPC BUILDER 工具,提出了 PLD 的最高度设计抽象,弥补了软件和硬件同时集成的空白。通过追踪整个系统的配置方案,我们就能够用 SOPC BUILDER 透明地调整相应的系统软件反映硬件配置的变化。

在 SOPC BUILDER 下,软件也认为是一个部件,支持便捷地添加 OS。例如,如果你把 RTOS 作为一个部件添加到你的系统中,RTOS 部件的生成程序会检测系统中硬件以太网接口,包括 TPC/IP 软件库。同样地,它会检测 IDE 接口,包括文件系统库和 IDE 器件相应的驱动。最后生成器为你编译 RTOS 内核。

基于 ALTERA 的 SOPC BUILDER,在 NIOS 核上的具体设计流程如下:

- (1) 进入 SOPC BUILDER

SOPC BUILDER 的界面设计有两方面的考虑：第一，它必须具有直观的图形用户接口（GUI），便于设计者准确地添加和配置系统所需的外设——包括存储器，定制外设和 IP 模块。第二，它必须自动完成系统集成工作，这样设计者不必拘泥于定义存储器映射，中断控制和总线控制这样的“制造商工作”。

SOPC BUILDER 的 GUI 是非常直观的，允许设计者配置复杂的系统。除了提供软件和集成的 OS 之外，还包括定义具有多总线主设备，总线仲裁和 DMA 控制的系统。它能自动地把部件添加到系统中。用户从有效外设库中选择，这个库在 SOPC BUILDER 窗口的左边（见图 8-2）。然后，外设出现在当前系统的部件表中，这个表在 SOPC BUILDER 窗口的右边。每个外设可能会启动一个配置向导，指导用户为这个系统配置外设的功能。

部件表 GUI 允许用户输入每个外设基地址和中断优先级（SOPC BUILDER 也可以自动进行分配）。窗口中部的“接插板”可以直观地连接总线体系，分配从设备端的仲裁优先级。垂直线代表主设备；水平线代表从设备。接插板让用户制定主设备和从外设之间的连接，还可以为不同的主设备分配权重。这些权重定义了每个竞争主设备如何访问从设备。

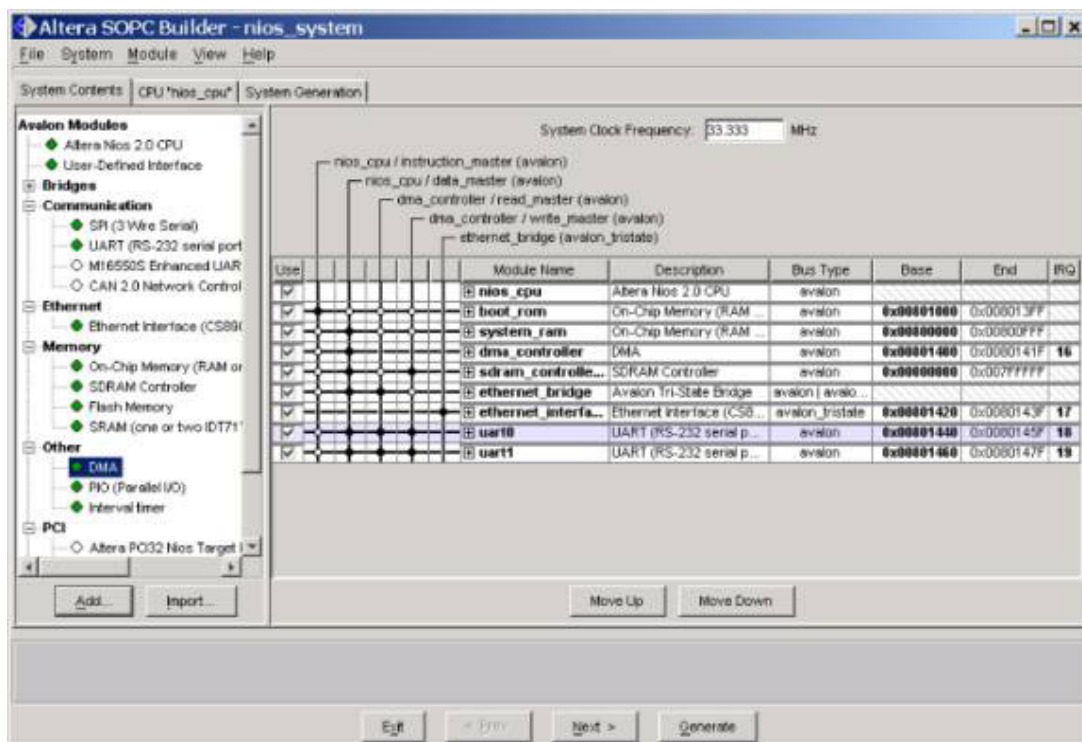


图 8-2：界面友好的 SOPC BUILDER

SOPC Builder 呈现一个直观的 GUI，让用户快速方便地定义和连接复杂的系统。用户从左边的库中添加所需的部件，然后在右边的表中配置它们。接插板指定了主设备和从设备之间的连接关系。

(2) 自动生成和集成软件和硬件

当点击“GENERATE”按钮时，SOPC BUILDER 会生成每个硬件部件以及连接部件的片内总线结构，仲裁和中断逻辑。SOPC BUILDER 也会产生系统可仿真的 RTL 描述，以及为特定硬件配置设计的测试平台，能够（可选）把硬件系统综合到单个网表中。

对于软件设计者，利用设计过程中采集的信息，SOPC BUILDER 能够生成 C 和汇编头文件，这些头文件定义了存储器映射，中断优先级和每个外设寄存器空间的数据结构。这样的自动生成过程帮助软件设计者处理硬件潜在的变化性。如果硬件改变了，SOPC BUILDER 会自动更新这些头文件。SOPC BUILDER 也会为系统中现有的每个外设生成定制的 C 和汇编函数库。例如，如果系统包括一个 UART（通用异步收发机），然后 SOPC BUILDER 就会访问 UART 的寄存器定义一个 C 结构，生成通过 UART 发送和接收数据的 C 和汇编例程。

(3) 系统扩展

SOPC BUILDER 是开放可扩展的。系统有自己的配置文件，格式为 System PTF 文件。该文件是系统的配方，它定义了 SOPC BUILDER 生成完整系统必需的详细信息。还有部件专用信息的文件格式，叫做 CLASS PTF 文件。CLASS PTF 包含 SOPC BUILDER 配置和生成部件所需的详细信息。

下图是 SOPC BUILDER 利用 COMPONENT PTF 文件和 SYSTEM PTF 文件配置和生成系统的流程。SOPC Builder 设计流程有两个阶段：配置—图 8-3 左边所示，和生成—图 8-3 右边所示。SOPC BUILDER GUI 引导用户完成两部分的配置：分别配置每个部件，整体配置系统。部件配置需要汇总参数，所以 CLASS PTF 文件标准包括了为这一要求定义 GUI 的格式。当需要时，SOPC BUILDER 读取该格式，产生相应的部件向导（COMPONENT WIZARD）收集所需的用户数据。SOPC BUILDER 然后把收集的参数值存放在 SYSTEM PTF 文件中。

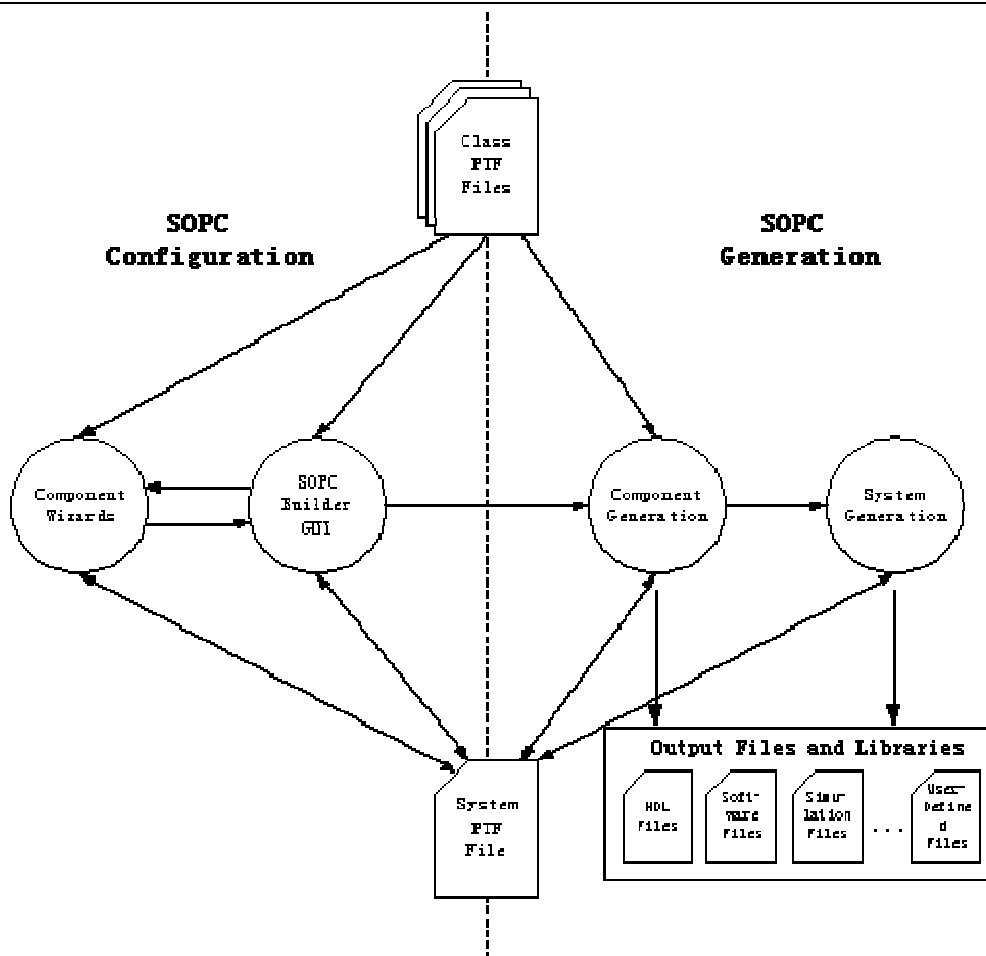


图 8-3: 生成系统的流程

完整系统的生成包括两个阶段，配置和生成。每个部件在 CLASS PTF 文件中定义，SOPC BUILDER 把当前系统的配置信息存放在 SYSTEM PTF 文件中。在 SOPC 生成过程中，SOPC BUILDER 会参考 SYSTEM PTF 文件，用整个系统的信息来生成每个部件。

配置的另一部分是系统配置，用户提供的有关处理器配置，外设连接等数据写入 SYSTEM PTF 中。当这两部分配置都完成后，SOPC Builder 进入到生成阶段，生成设计的输出文件。SOPC Builder 查阅每个 CLASS PTF 文件，允许相关的部件生成程序，它们会正确地输出特定系统配置的硬件和/或软件文件。

简单的部件生成程序可能每次都会输出相同的文件；更多的可配置部件根据用户输入会生成完全不同的结构。例如，NIOS 处理器中包括的 UART 可以配置为软件控制波特率，以更多门换取更大的灵活性。这种配置选项由用户在部件配置阶段进行设置，根据这个设计，UART 生成程序产生所需 UART 的硬件描述。在生成阶段的最后一步，SOPC Builder 创建适合于系统部件的总线结构，把所有的部件连接在一起。

总之该软件将构造一个片上系统的各种组件（IP 核）自动的结合在一起，并且自动生成所需的驱动程序库与相应的头文件。而需要的各种 IP 核有些是随开发工具捆绑销售的，还有一些是需要单独购买的，这些 IP 核都有完备的文档资料，并且被 SOPC BUILDER 所支持，所以使用起来很方便，大大提高了开发速度。

下面就以怀柔新的全日面磁场望远镜的图像采集和处理系统为例，简单介绍一下嵌入式系统在图像采集方面的应用。

8.3 全日面磁场望远镜终端系统

为了加快研制速度，减少硬件设计带来的风险，我们采用了 ALTERA 公司的基于 Cyclone 器件的 NIOS 开发板。这块开发板具有丰富的外设。下表列出了该板上的元件：

Cyclone EP1C20FC400 FPGA	MAX® EPM7128AE CPLD 控制逻辑
SRAM 512k*32	SDR SDRAM 2 M*32
Flash 8 M*8	EPCS4 FPGA 串行配置芯片
CF I 卡接口 (40 个可用 I/O)	10/100 物理层, 媒体控制 (PHY/MAC)
以太网接口 (RJ45)	双串行口 (RS232 DB9)
双路可容忍 5V 输入的扩展口 2*41 I/O	双 JTAG 口
调试用 Mictor 端口	4 个按钮开关
8 个 LED	2 个 7 段数码管
加电复位电路	
表 8-3: NIOS 开发板上的元件	

为了让用户做到买来就能用，厂商随开发板送诸如编程电缆，电源，网线，串行电缆等附件。在开发包里还集成了全功能版的 QUARTUSII 和 SOPC BUILDER 软件，以及 NIOS 的 C/C++ 语言编译程序。

我们用 SOPC BUILDER 构造的 CPU 模块（NIOS, AVALON BUS, SDRAM 接口，通用 IO, DMA 控制器，用户接口，片上内存，以太网接口等）下面简单介绍一下用得上的各个功能模块。

8.3.1 相关模块介绍

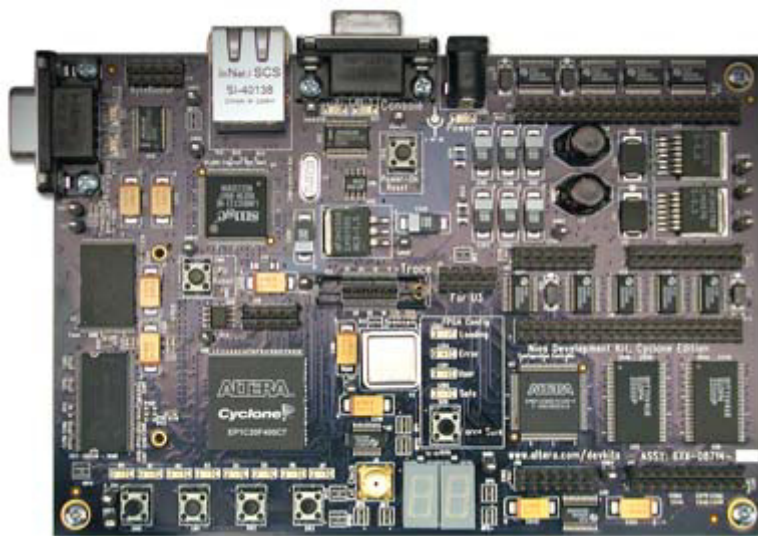


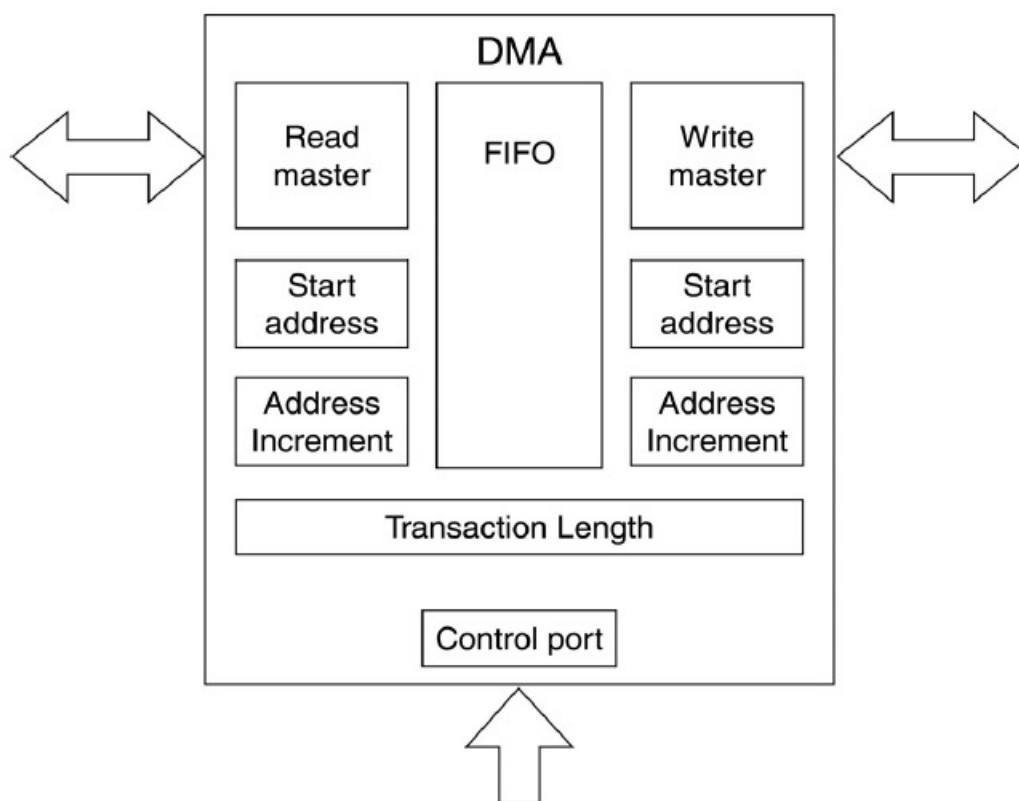
图 8-4: ALTERA 公司 cyclone 版 nios 开发板^[52]

(1) NIOS 处理器内核

NIOS 处理器内核是 ALTERA 公司开发的基于该公司 FPGA 的软处理器内核。该款处理器核是高度可定制的处理内核，用户可以根据需要来裁减该内核。可以选择处理器字长是 16 位还是 32 位，并在处理器的性能和系统开销之间进行选择，用户甚至还能定制自己需要的处理器指令。ALTERA 公司提供了该处理器的 C/C++ 语言和汇编语言的编译程序。

(2) DMA 控制器

DMA 控制器实际上也是一个功能简单的处理器，它所能做的就是根据控制寄存器的指示来传输数据，这里数据传输可以是不同的宽度，DMA 控制器内部有平衡两个从设备速度差的缓冲器（FIFO），这样可以达到很高的性能。DMA 控制器是 AVALON 总线上的一个主设备，它有权控制 AVALON 总线。具有同 CPU 同等的地位，如果主设备同时访问同一个从设备，需要仲裁机构来解决优先级的的问题。图 8-5 是 DMA 控制器结构。

图 8-5: DMA 控制器的结构^[59]

它可以实现两个从设备之间的自动传输，就有很高的性能，传输过程中不需要主机干预。

(3) AVALON BUS

这也是 ALTERA 公司开发的专门为 NIOS 处理器适用的总线标准，在这里 AVALON 总线也具有很大的灵活性，它可以是 8、16、32 和 64 位的宽度，总线会自动处理各种情况的连接。AVALON 总线也可以适应同步和异步等不同总线标准。然而最重要的是，AVALON 总线不是一个真正意义上的总线，它是由多路开关和仲裁机制构成的，这就决定了总线不像真正的总线在同一时刻只能访问一个设备，在这里，只要不同的主设备访问的从设备不是一个，AVALON 总线就可以使这些不同的访问并发执行。这是一个很优秀的特性，在一个处理器访问外设的同时别的处理器或者主设备也可以访问另一个外设，这样就在不提高系统的主频的前提下大大提高了系统的吞吐量。我们认为这个特性尤其适合应用在进行大规模简单计算的场合（像 CCD 图像数据的平常改正，图像的累加等天文上的应用）。下面是一个例子，在 NIOS 访问 RAM 时，DMA 控制器也在向以太网控制器传输数据。当两个主设备同时访问一个从设备时，AVALON 总线会进

行仲裁，让优先级高的先访问。

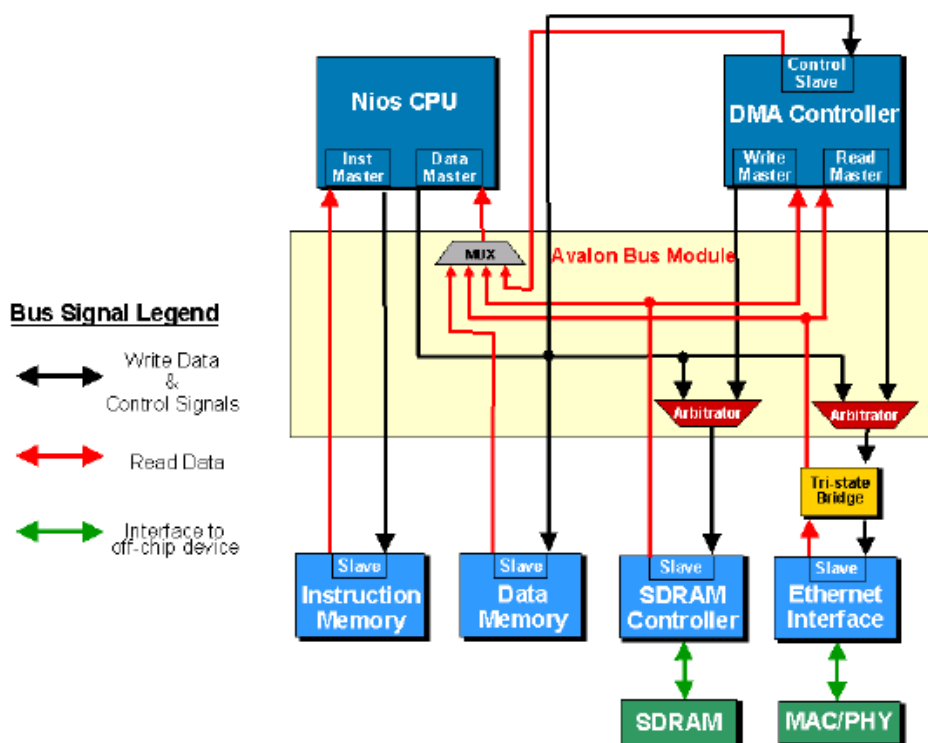


图 8-6: AVALON 总线^[60]

这张示意图显示了当有多个主设备申请访问从设备时，如果从设备可以被同时访问，这种访问就是并发的，如果访问同一从设备访问的顺序由总线仲裁机构（ARBITRATOR）决定，访问的优先级在 SOPC BUILDER 中被指定。

(4) SDRAM 控制器

SDRAM 的控制是比较复杂的一般用户编写 SDRAM 的控制程序的难度比较大。Nios 集成了一个处理管道数据转换的速度超过 100MHz 的 SDRAM 控制器。这样就大大减少了开发的风险，使用户能专注到自己专业的部分。当 SDRAM 不能满足需求时，可以选择更高性能的 DDR 内存，同样用户可以在自己开发和购买现成的 IP 之间进行选择。

(5) 以太网接口

ALTERA 公司提供了以太网的接口，可以将整个系统芯片连接到 10/100 兆的以太网控制器 LAN91C111 上。整套 NIOS 开发工具还包括简化的 TCP/IP 协议软件库。这样用户可以很容易的开发基于网络的应用。

(6) 用户定义的接口

SOPC BUILDER 允许用户的逻辑同 AVALON 总线相连，连接的规范是式对用户开放的。用户可以选择将自己设计的逻辑通过 SOPC BUILDER 嵌到 CPU 单元或者只在 CPU 单元将接口开放，在外部将自己的逻辑同处理器相连。在我们的应用里采用是把自己的逻辑放在外面，生成 CPU 模块时只留一个联接该逻辑单元的接口，这样对于非专业用户来说简单一点，更加符合常规的设计方法。

8.3.2 系统构成

从总的来说系统被分成硬件和配套的软件。其实在 SOPC 的设计里从广义上讲都可算是软件。但是我们在这里还是按照一般的分类，把设计 FPGA 的 HDL 算成硬件设计的范畴，而把在 NIOS 处理器上运行的程序和 PC 端运行的程序算作软件。

(1) 硬件

图 8-7 是系统组成的示意图。系统的核心是 NIOS 系统板，板载的外设都是标准设备，基本上所有的嵌入式是系统都需要用到。至于不同的部分都被放到 FPGA 内。这些部分是高度可定制的，可以按需要定制，这样就不需要改动硬件电路的设计，只需改动电平转换电路就可以适应几乎所有的需求（只要资源允许）。从 FPGA 的组成图里也显示了软硬件协同设计的思想，NIOS 处理器的性能不足以完成大面阵的质心计算和实时的图像叠加。所以这部分就被设计成用硬件完成。软硬件协同用很少的资源实现了很高的性能，同时保证了系统的实时性。

这里硬件设计的主要形式是 HDL(硬件描述语言)。需要动硬件的几乎可以说是没有，所有的硬件改动都是通过改动 FPGA 内部的“程序”完成的。

(a) FPGA 内部的逻辑

图 8-8 是根据前面描述的几个组件通过 SOPC BUILDER 构造的处理器模块，在生成处理器的 HDL 代码的同时，SOPC BUILDER 也将需要的驱动程序编译成库文件，构成针对这个处理器的 SDK。

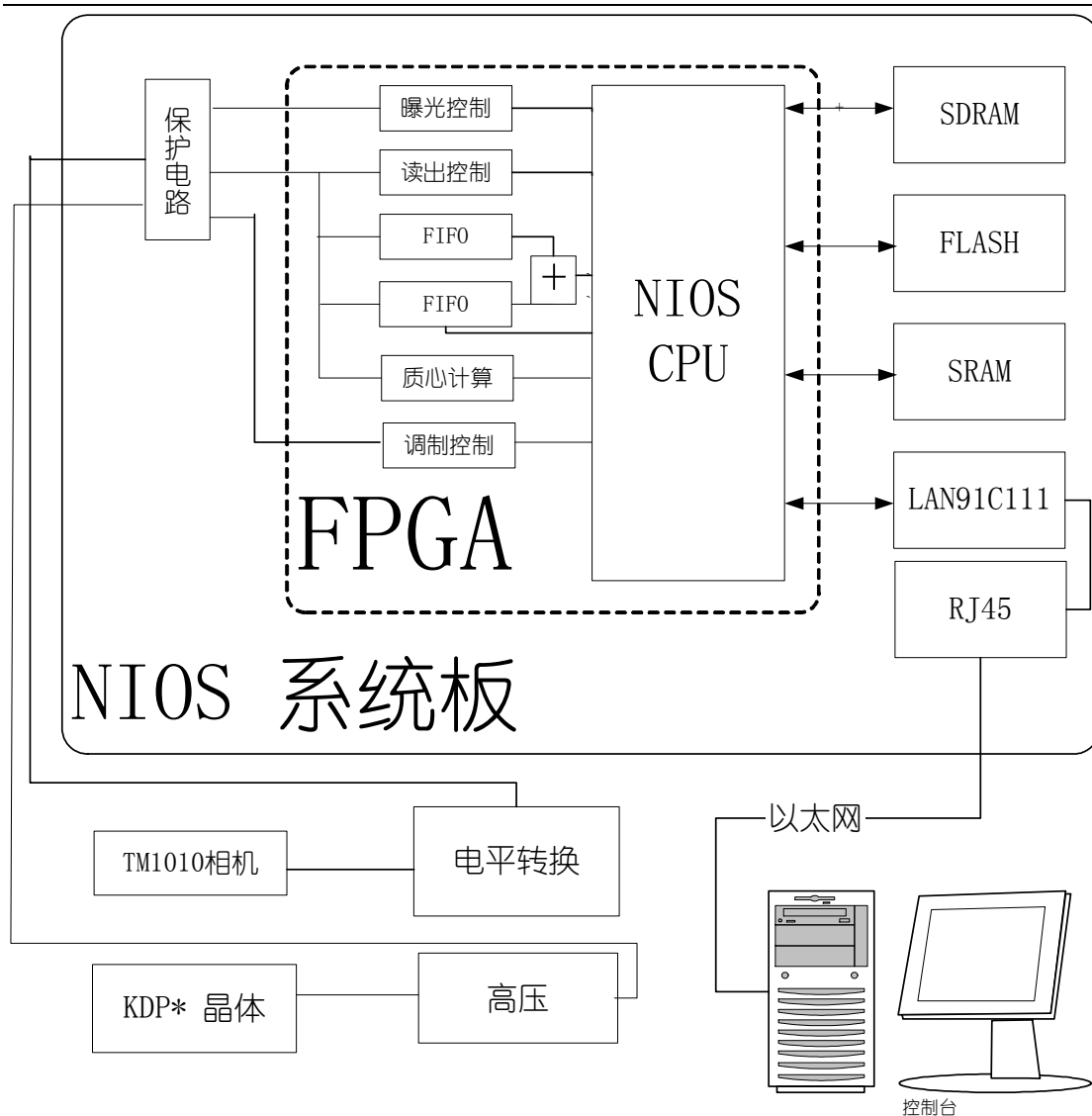


图 8-7 整个终端系统的组成

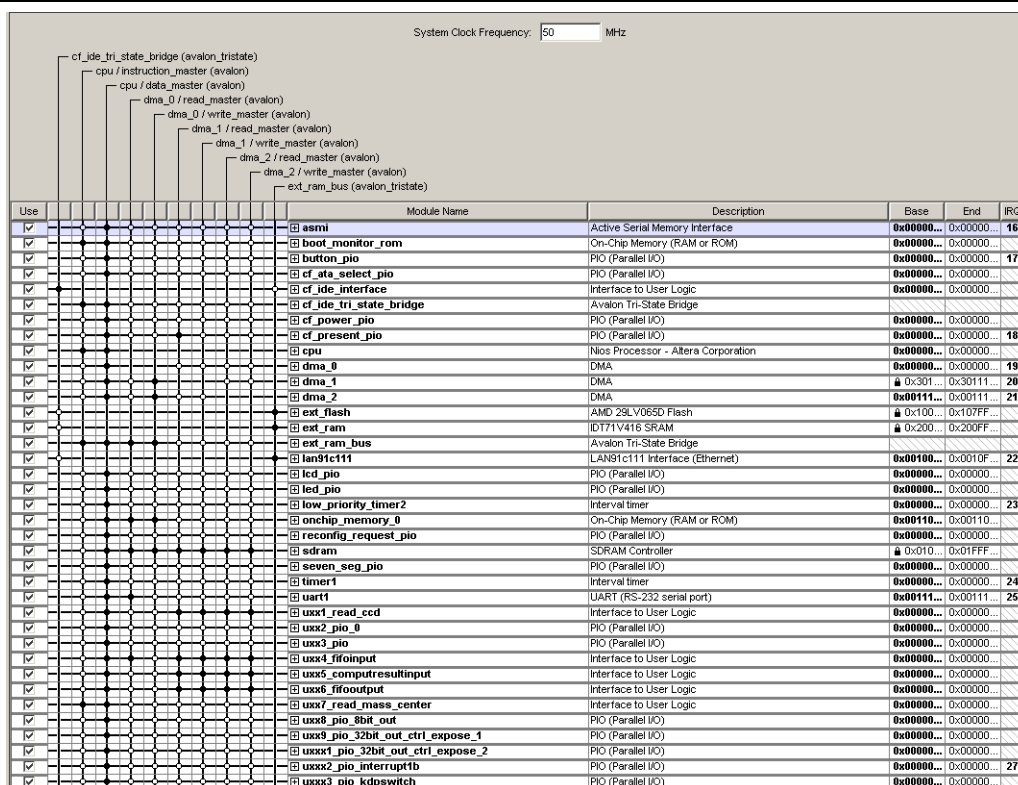


图 8-8: SOPC BUILDER 构造的 CPU 模块

该图显示了 SOPC BUILDER 构造的 CPU 模块的组成，左边的区域代表了主从设备之间的互联，黑点代表相应的主设备与从设备之间相连，空心点代表没有互连，精心选择连接的规则可以有效的减小占用的资源。

FPGA 内部 NIOS 模块之外的逻辑基本上是通过逻辑图输入完成的，这样做上手快，清晰，直观，很适于向天文应用这样的使用频率很低的使用者应用。原理图输入不需要记忆很多难记的 HDL 语法。从系统图中可以了解到我们将计算全日面质心的逻辑集成到 FPGA 的内部，这样消耗的资源很少，只是利用了 FPGA 内部剩余的资源，这种“搭便车”降低了系统的总造价。在实际应用中因为相机的输出信号是 RS422 格式，而 FPGA 不支持这种电平标准，我们作了一块电平转换板，功能就是将信号转成 FPGA 接受的电平标准，同时让 TM1010 的电缆能直接插到系统板上。这是在设计中唯一需要改动的部分。证明了 FPGA 方案的极强的适应性。图 8-9 是完整的系统照片，只有一块非常简单的电平转换板是自制的，同时该板还负责输出 KD*P 的调制信号。

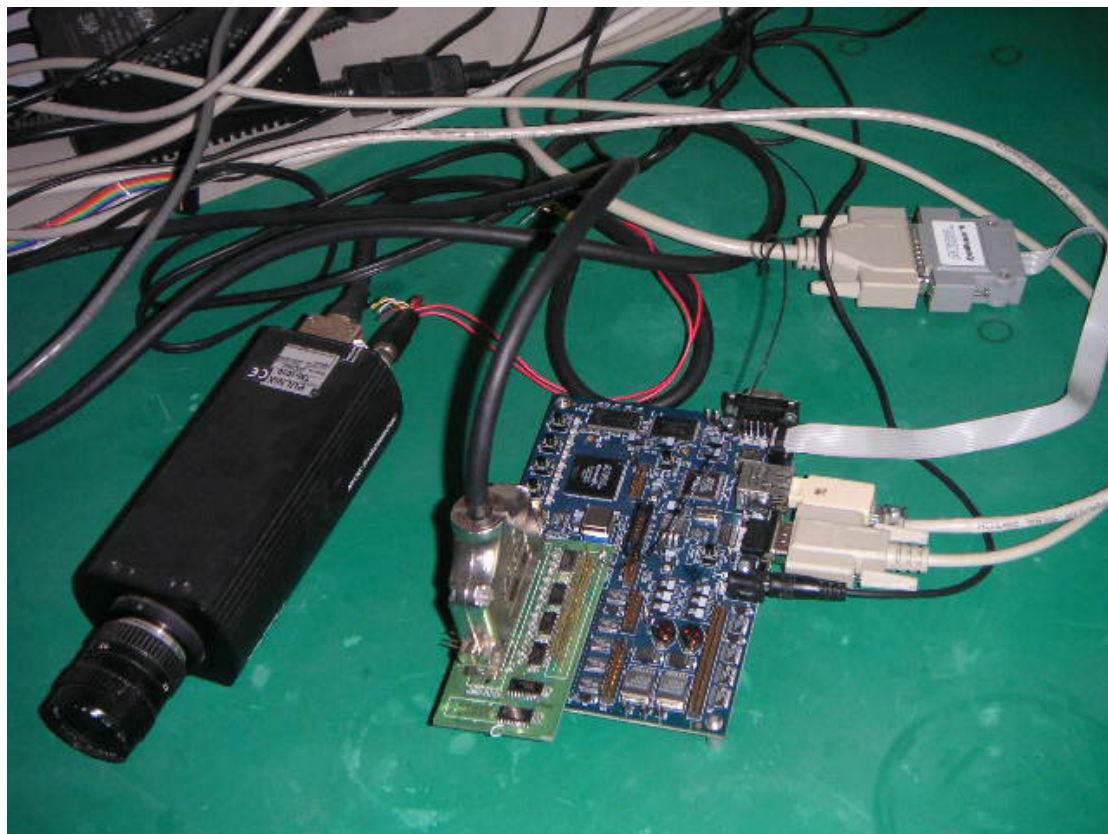


图 8-9：完整的采集系统

左面是 PULNIX 公司的 TM1010 CCD，右面的印刷板是 NIOS 开发板，上面搭载的是自制的电平转换板。相机通过转换板与开发板相连。扁平电缆是用于调试和加载程序，观测时是不需要连接的。实际应用时只需将网线同控制计算机相连。

(b) CCD 相机

我们选择的是 PULNIX 公司的 TM1010 型相机。该款相机的指标如图 8-10。这是一款 10 位的连续扫描的数字输出的相机，靶面尺寸是 1 英寸。面阵规格：1008*1018。帧速率高达 15 帧/秒。

Imager	1" (9.1mm x 9.2mm) progressive scanning interline transfer CCD
Pixel	1024 (H) x 1024 (V)
Cell size	9.0 μm x 9.0 μm
Scanning	1050 lines; 15 Hz
Sync	Internal/external auto switch HD/VD, 4.0 Vp-p impedance 4.7K Ω VD=15 Hz $\pm 5\%$, non-interlace HD=15.734 kHz $\pm 3\%$
Data clock output	20.034 MHz (std), 10 and 5 MHz selectable
Resolution	Digital: 1008 (H) x 1018 (V)
S/N ratio	60dB at CDS
Min. illumination	1.0 lux, f=1.4 without IR cut filter (no shutter). Sensitivity: 10 $\mu\text{V/e-}$
Video output	Digital 10-bit RS-644 output Analog 1.0 Vp-p composite video, 75 Ω
AGC	OFF
Gamma	1.0
Lens mount	C-mount
Power req.	12V DC, 700 mA
Operating temp.	-10 $^{\circ}\text{C}$ to 50 $^{\circ}\text{C}$
Vibration & shock	Vibration: 7Grms (10 to 2000 Hz), Shock: 70G
Size (W x H x L)	51.2mm x 67.4mm x 151.2 mm (2.02" x 2.65" x 5.95")
Weight	463g w/o tripod mount (tripod mount is 60g)
Auto iris connector	None
Functional options	TBD
Accessories	DC-31 31-pin mating connector; 30DG-02-40 digital cable, CS-232 RS-232 cable & software
Power cable	12P-02S
Power supply	K25-12V or PD-12UE, PD-12UU, PD-12UUP, PD-12UEP

图 8-10: PULNIX TM1010 型 CCD 相机的指标^[61]

(c) KD*P 调制电路

KD*P 调制电路也被集成进 FPGA，为了同曝光同步，KD*P 翻转信号与曝光控制同步。

(2) 软件

软件设计被分成两部分嵌入式系统的程序和 PC 机一端的程序。由于 NIOS 处理器的性能不足以完成数据实时采集,所以我们在采集和处理图像时应用了 DMA 控制器。又因为需要并发的传输几组数据,所以我们利用 SOPC BUILDER 构造了几路 DMA 控制器。图像采集的软件很简单,首先是复位 FIFO 和读出控制逻辑。做了这项工作后读出控制器就会在采集到相机的帧同步信号后开始数据的传输。数据先被写入 FIFO,然后被 DMA 控制器传输到 SDRAM。图像叠加也是通过 DMA 控制器,只是传输的方向有所不同。将 SDRAM 的缓冲区用 0 填充,然后将 SDRAM 内的数据传到一个 FIFO。这个 FIFO 与同相机相连的 FIFO 作加法(用硬件加法器实现),这样就实现了图像的累加。

前面叙述的过程中用到了两个 FIFO,一个是用于缓冲相机传输来的原始数据,另一个是用来缓冲累加的中间结果。

数据传输应用了标准的 TCP/IP 协议,因为用 IP 包的话需要计算数据的校验和,NIOS 处理器没有足够的处理能力完成实时传输的要求。因为我们不做网间传输,只是通过以太网将数据从 NIOS 系统板传输到 PC 机,距离很短。所以在这里校验是不必要的,我们用的是 UDP(用户数据报协议 User Datagram Protocol)包传输。在网络中它与 TCP 协议一样用于处理数据包,UDP 不提供数据报分组、组装和不对数据包的排序的。关于 UDP 协议的详细介绍请参考文献 RFC768^{[57][58]}(RFC Request For Comments)。

这里 ALTERA 公司提供了 TCP/IP 的驱动程序,调用方法类似标准的网络应用程序接口 Socket,这也是为了简化学习过程。ALTERA 公司提供了全部的源程序,用户可以在这个基础上进行修改,以提高性能。在实际应用中,我们发现厂家提供的驱动程序的性能不能满足我们实时传输数据的要求。我们仔细研究了源程序,找到了低效的原因,对驱动程序进行了修改,从而满足了我们的需要。如果采用现成的图像板提供的驱动程序,生产厂商是不会提供源程序的,所以修改也是不可能的。这是系统开放带来的好处,可以构成更适合用户需要的系统。

关于 PC 端的程序,因为采用了标准的 Socket Api,编程也变得很简单和更加通用,不用学习特殊的函数调用。必须强调指出的是:一般来说 WINDOWS 平台的应用程序接口同 UNIX, LINUX 等平台的是不相同的,但是这些平台上都有标准的 SOCKET 接口。就是说在网络传输方面,程序的接口是一致的,这样网络应

用程序就在某些方面具有了兼容性，核心程序可以在不同平台上编译。这方面的优越性是我们的方案具有核心程序跨平台优势带来的，核心程序在不同平台之间转换时可能只作很少的修改。

8.4 总结与讨论

表 9-4 列出了系统在更新后同原系统的比较。

	以前的系统	新的系统
像素大小	9um	9um
面阵	512*512	1K*1K
速度	12.5 帧/秒 (隔行扫描)	15 帧/秒 (最大) (逐行扫描)
处理方式	151 图像处理器	FPGA
计算机	386	P4
操作系统	DOS	WIN2000
存储方式	自有格式	Fits
表 8-4: 全日面磁场望远镜新旧系统比较		

2004 年 5 月 18 日，该系统进行了首次试观测，图 8-11 显示了该系统配合怀柔全日面太阳磁场望远镜观测到的太阳的全日面磁图

以上我们介绍了我们的可编程嵌入式系统在天文上应用的一个实例--基于 SOPC 的网络化的全日面磁场望远镜终端系统。现在我们总结一下应用此方案带来的好处。

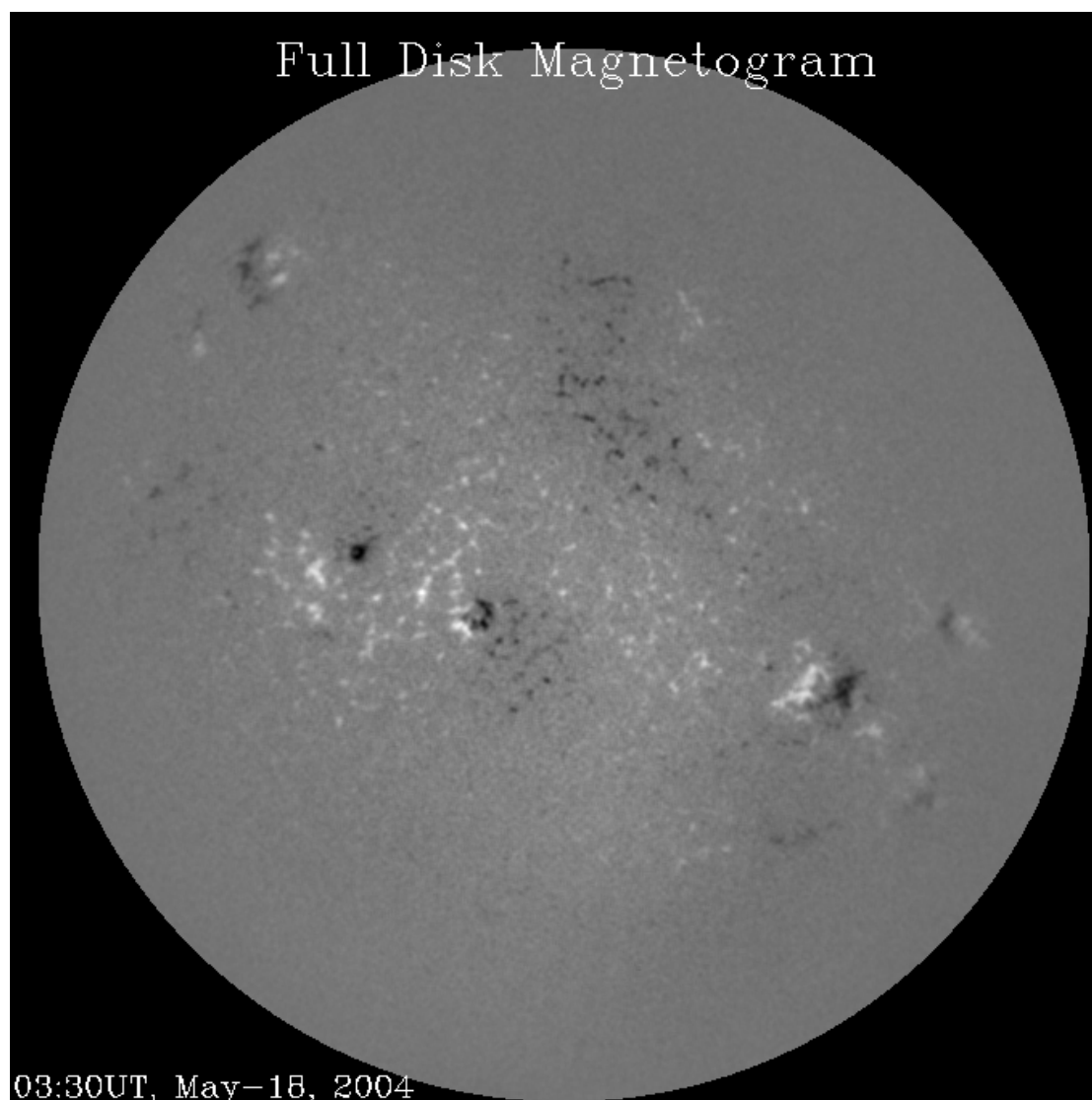


图 8-11 用该系统观测到的全日面磁图

8.4.1 灵活，可扩展，可以根据需要裁剪系统降低造价，适合小规模多变的应用

基于 FPGA 的 SOPC 方案具有在应用环境改变后只需改变软件而硬件保持不变的能力，这样就使同一硬件平台可以适应很多不同的需要，这是别的方案不具备的好处。SOPC 系统受到的限制只是芯片速度和 FPGA 的规模，而这些都是可以定制的。对 FPGA 厂商来说同一系列的不同规模的 FPGA 可以具有相同的管脚的定义，同时还有不同速度等级的芯片以供选择，这样应用者就可以在相同的硬件平台上连接不同芯片以满足不同规模的需要，开发者也可以通过这样的裁

剪降低造价。这个特性在天文上很有用，因为天文应用的特点是没有很大需求量，但需求变化多端。这样我们就可以把里面所有的数字部分抽象出来交给 FPGA 构造的 SOPC 平台，针对不同的需求只是改变模拟前端和驱动程序，可以将不同波长（可见光，红外，射电）的探测器统一到相同硬件平台下。

8.4.2 高开发效率，获得的知识具有普遍性

当所有的数字设计都集中到兼容的 SOPC 硬件平台上时，开发者首先省掉的是硬件设计的风险和时间，而且由于统一的硬件平台使开发者从一个设计后取得经验可以很大程度上一直到另一个应用上，这就提高了开发效率同时开发者从一个项目中获得的知识能得到广泛的应用。

8.4.3 成本可以接受

应该指出的是基于 FPGA 的 SOPC 系统的造价对于大规模应用来讲是很高的，因为 FPGA 的售价相对于商品化的 DSP 和 MCU 来说是比较高的。所以这样的系统我们认为不是很适合大规模的应用。但天文应用通常是单件或者小批量的，而在天文仪器开发中研发的费用会占很大的比例，所以在硬件平台上多投入的资金，会从节省的研发费用里得到补偿。通过构造全日面磁场望远镜的终端系统，我们认为这个方案在成本上是可以接受的。

8.4.4 开放系统使维护简单，升级容易，便于后续的改进

ALTERA 公司的 SOPC 解决方案的软件驱动程序提供了源代码，不像专有的系统只提供程序的接口，这有可能使用户产生误解。开放的源代码使用户可以对其进行修改，以得到更符合要求的系统。

8.4.5 网络化带来了跨平台的能力并且连结简单

当我们把天文仪器接入以太网，并且这些设备的连接遵守 TCP/IP 协议，我们就有可能使客户端的程序具有跨平台的能力。因为常用的现代的操作系统都具有网络接口，而且调用方式都是类似的，开发者的程序只需做最小的修改就可以进行移植。同时更大胆的计划是在客户端的应用程序由 JAVA 语言写成，这样甚至不用修改就可以使客户端程序具有跨平台的能力。

8.5 嵌入式系统在天文观测中的应用前景

在全日面磁场望远镜终端系统研制中取得成功以后，为验证并扩展此项技术的成果应用，我们又将相同的硬件应用到国家天文台 CCD 实验室研制的网络控制的 TC215 和 TH7899 CCD 芯片的相机，同样获得了成功。在此基础上，该实验室又选用此项技术应用到 CMOS 传感器相机的实验中，也获得了预期的成功。SOPC 全日面磁场接收系统的试制成功，及在很短时间内就已在多台科学级的相机上应用成功，充分说明该技术能大大缩短研制时间。同时，其较低的制作成本，也使其具有很大的天文应用前景。另外，由于该系统的工具软件具有仿真能力，可以在系统设计时进行验证，因而提高了设计的正确性。总之嵌入式系统在天文观测中具有很好的应用前景。

现代的天文望远镜有可能具有很多通道，需要很多探测器同时进行观测。下面我们通过怀柔的多通道望远镜介绍一下基于 SOPC 的解决方案。

怀柔的多通道望远镜多达 14 个通道，每个通道都需要一个 CCD 相机，如果按照传统的办法就需要同样多台的 PC 机，这样很不便于操作。望远镜建成时的系统如图 8-12 所示。受当时电子技术的限制，有很多 CCD 的信号纪录还只能是由录像机完成，被 151 图像处理器数字化的图像则被重新采样成 512*512 大大降低了系统的空间分辨率。同时也需要很多计算机来进行数据采集，导致观测人员需要同时照看很多监视器，繁琐的重复性工作量大。

图 8-13 是新方案的系统图。应用了我们新的网络化的 SOPC 方案后系统可以得到减化，只需一台计算机就可以进行所有的数据采集和监控的工作，应用 WINDOWS 强大的图形功能使计算机能实时的显示所有的相机采集的图像（尺寸有所缩小）。基于网络的设备具有良好的扩展性，在以太网的带宽允许的情况下，我们还可以连接更多的网络化的 SOPC 模块。

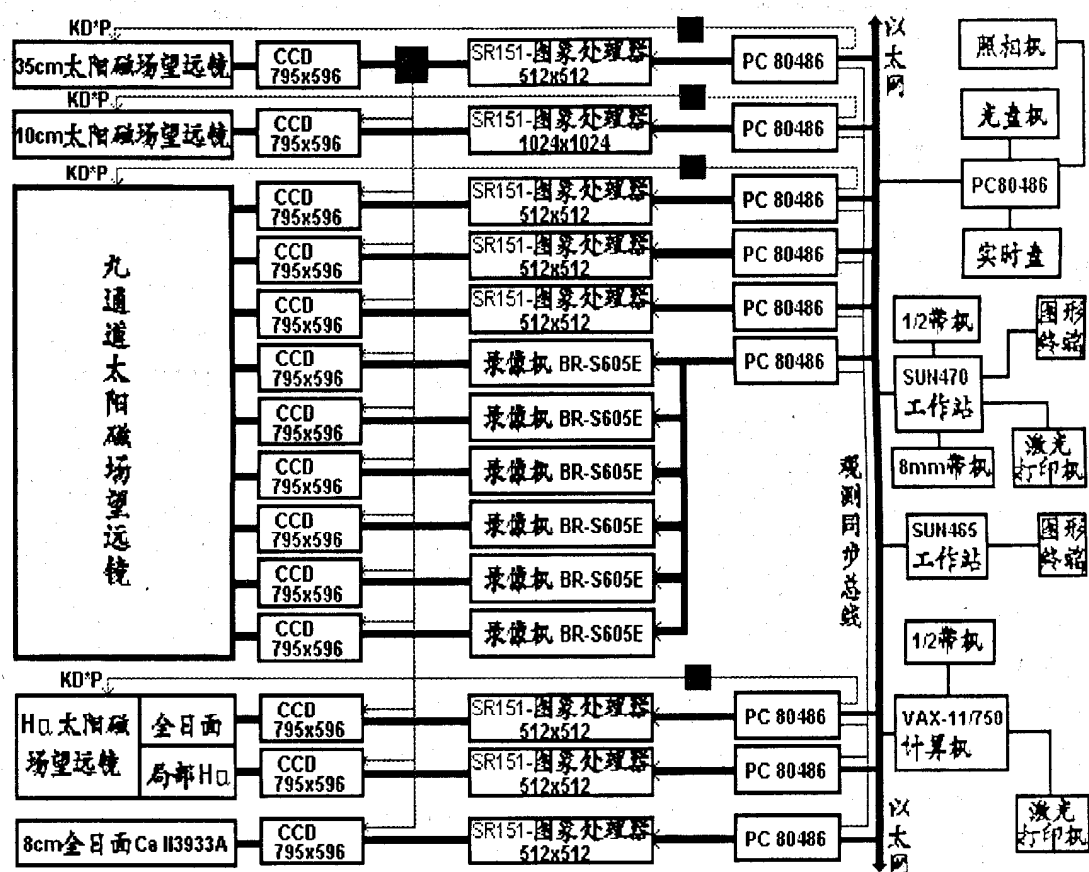
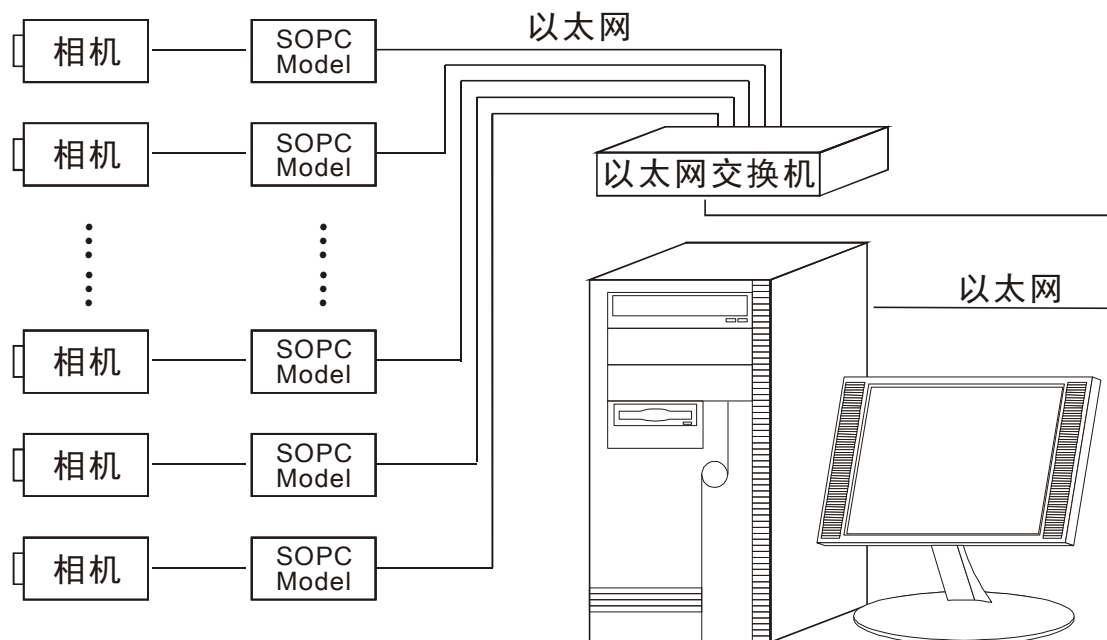
图 8-12: 怀柔多通道望远镜接收系统^[35]

图 8-13: 构造中的新的怀柔多通道望远镜接收系统

这里充分体现了通过以太网联接观测设备的一大好处：扩展方便！只需购买一台标准的以太网交换机就可以实现一个控制台管理多个设备的目的。为了使所有的观测设备能并发的传输观测数据，控制台所在的计算机的以太网卡采用千兆网卡，以太网交换机会自动处理百兆千兆转换的问题。而由于交换机的大量生产，使得其售价远远小于专有设备的售价。同时由于涉及到网络的设备被大量应用，有很多厂家在生产，我们不用担心货源的问题。近年来网络连接正在走向万兆以太网，这就给我们更大的带宽来满足未来的需要，而这种升级是很平滑的，不需要改动应用程序软件，只需更换低层的驱动程序。这些工作是由设备提供商做的，用户所做的就是”享受”高速联接带来的好处。所有这些，都使得我们所研制的系统具有了广阔的天文应用空间。

第九章 结束语

太阳磁场的观测研究，是太阳物理研究的重要课题。以实验物理为主的太阳磁场研究，依赖于太阳磁场观测技术的发展。自 1908 年 Hale 观测到太阳黑子区域的磁场以来，太阳磁场的观测实现了由点到线，由线到面的过渡；发展高时间分辨率、高空间分辨率和高偏振分辨率的仪器观测太阳磁场，成为太阳物理学研究的重要课题。而高精度的跟踪能力和高速度的数据处理能力是保证此项研究的先决条件。

本论文基于以上背景，以获取高时间、高空间分辨率太阳磁场资料为目的，结合当代太阳物理研究的需求和现代的高科技水平，研究可用于太阳望远镜和其他类似望远镜的导行方案和图像终端设备。

本文的主要贡献有

1 重点讨论了处于国际水平、并可实际用于现有望远镜的两种导行方案，即基于相关算法的太阳局部像导行和基于质心算法的太阳全日面像导行方案，深入讨论了这两种方案的关键技术，通过计算机模拟计算，得到影响导行精度的主要参数及技术指标，得出了数字仿真和物理实测结果，为今后此项工作的软件研究和硬件选择提供了重要的技术指导。

2 完成了具有强大处理能力新一代 SOPC 图像终端设备的设计研制。是实现上述任何一种方案的技术保证，同时又是提高望远镜时间分辨率的重要手段。为此，我们在研制了传统意义上的新一代太阳磁场观测设备终端系统的基础上，进行了嵌入式系统在太阳磁场观测中的应用研究，在国内首次提出了一个新的太阳磁场终端系统概念——基于可编程片上系统（SOPC）的终端系统，此项研究目前在国际上尚属前沿课题。我们以怀柔基地多通道望远镜中全日面磁场望远镜的终端系统改造为试验平台，成功地将基于 SOPC 技术的终端处理系统应用于此课题，获得了满意的太阳图像。为验证并扩展此项技术的应用成果，我们又将其应用到国家天文台 CCD 实验室研制的网络控制的 TC215 和 TH7899 CCD 芯片的相机，同样得到了预期的效果。此项技术的应用成功，大大降低了天文观测终端设备的研制成本和研制时间，可以说，它将太阳望远镜终端系统的研制带入了网络时代。

3 实现了观测设备的网络化。总之，通过本论文的研究论证及已经取得的部分结果，为下一步的研究工作打下了坚实的基础；为太阳望远镜跟踪精度与终端处理技术方面的研究提供了有益的参考和帮助；尤其为将可编程片

上系统 (SOPC) 应用于望远镜的终端系统这项技术的发展提供了技术储备和供鉴。

致谢

在此论文即将结束之际，心中感慨万千。回忆这几年走过的求学之路，步步都离不开师长、同仁给予的关怀与鼓励。

首先，我要感谢我的导师艾国祥院士。他治学严谨，却勇于创新；他思维敏捷，却肯于脚踏实地；他对科学那种锲而不舍的执著精神深深感染着我。在他的悉心指导与影响下，我不仅在专业能力上获得了长足的长进，而且对科研方法和系统研究的全局把握方面有了一定的能力。我很庆幸在我的人生路上曾有一位这样的导师为我引路。

感谢导师邓元勇研究员，在我的课题研究中给予的大力支持，他不仅从天文学家的角度对我的课题提出很多有益的建议，而且亲自验证我的研究结论，使我对自己的研究充满信心。在我的论文写作过程中，邓元勇研究员同样花费了很多精力，从文章整体构思、章节编排到文字修改，处处包含着他的关心与指导，使我受益匪浅，用良师益友称呼他是再贴切不过的了。

感谢叶彬浔研究员对我的论文提出了很多中肯的批评和有益的建议，使我的论文得以完善；感谢王东光高工在我的望远镜终端系统试观测时提供的技术支持和在论文写作中提供的帮助，感谢张源源帮助我绘制了论文中的部分插图；感谢汪国平观测员为我提供了文中的观测资料；感谢姜爱民高工提供了局部导行方案中曲面拟合方面的技术资料；感谢林佳本同学提供了关于图像后处理消除抖动的相关资料。

感谢张洪起研究员、李威站长、李焕荣老站长对本人工作的大力支持；感谢怀柔基地和 CCD 探测器技术实验室的全体同仁在技术和其他各方面给予的帮助与合作。

参考文献:

- [1] Hale, G.E., Ap.J., 1908, 28, 315
- [2] Lyot, B., Comptes Rendus, 1933, 197, 1593
- [3] Ohman, Y., Nature, 1938, pp141-157
- [4] Babcock, H.W., Ap.J., 1953, pp118-387
- [5] Stepanov V.E and Severny A.B., IZV.Crim.Astrophys.Obs.28(1962), 116
- [6] Beckers, J.M., Solar Phys., 1968, 3, 258
- [7] Mein, P.; Blondel, M., Multi-Channel Subtractive Double Pass Spectrograph, Solar Physics, 27, 48
- [8] 艾国祥, 胡岳风, 中国科学 A, 8(1986a), pp889-896
- [9] 艾国祥, 胡岳风, 中国科学 A, 9(1986b), 987
- [10] Unno, W., Publ.Astron.Soc.Japan, 8, 108.
- [11] Rachkovsky, D. N., 1962, Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs., 27, 148
- [12] Jefferies, J., Lites, B. W. and Skumanich, A., 1989, ApJ, 343, 920
- [13] Landi, D. E., 1982, Solar Phys., 79, 291
- [14] 王同江, 艾国祥, 邓元勇, 1996, 北京天文台台刊, 28, 31
- [15] "Filament activation and magnetic reconnection", Deng Yuanyong; Lin, Yong; Schmieder Brigitte; Engvold, O., Solar Physics, 2002, 209, 153-170
- [16] 邓元勇, 艾国祥, 汪景秀, 太阳强磁区的精细结构形态, 天文学进展, 1995, 13(4), 335
- [17] Zhang, Jun; Lin, Ganghua; Wang, Jingxiu; Wang, Haimin; Zirin, Harold, "The evolution of intranetwork magnetic elements", A&A, v.338, p.322-328 (1998)
- [18] Deng, Y, Wang, J., Liu, Y., et al., private communications, 2000
- [19] Soltau D., and Wiehr E., 1984, A&Ap, 1984, 141, 159
- [20] Kuveler G., Wiehr E., Thomas D., et al., "Automatic Guiding of the Primary Image of Solar Gregory Telescopes", Solar physics, 1998, 182, 247-255
- [21] Wulser J., Hudson H., Nishio M., et al, "Precise Determinations of the Coordinate system for YOHKOH Telescopes and the Application of a Transit of Mercury", Solar Physics, 1998, 180 131-156
- [22] Thompson W. and Carter M., "EUV Full-sun Imaging and Pointing Calibration of the SOHO/CDS" Solar Physics, 1998, 178, 71-83
- [23] 陈新知, 多通道组合太阳望远镜驱动电控设计报告, 光学技术增刊, 1995, p167-p173
- [24] 王家宁, 胡柯良 私人通讯, 1997
- [25] 杨世模, 邓元勇, 胡柯良 私人通讯, 1999
- [26] 空间太阳望远镜 A 相研究报告, 1996
- [27] Muller, R., NATO ASI Series C, 1989, 261, 321
- [28] R.E.布莱赫特 著 肖先赐等译, 数字信号处理的快速算法, 科学出版社, 1992, p90
- [29] Hu, Keliang; Deng, Yuanyong; Song, Qian, Analysis about the precision of correlation tracker in space solar telescope (SST), Proc. of SPIE, 2003 Vol.4853, pp612-620.

- [30] 林佳本, 山东大学硕士论文, 2002
- [31] G.E.吉布森 著 林元章 等译, 宁静太阳, 科学出版社, 1981[32]
- [32] Zirin, H., Aust. J. Phys., 1985, 38, 961
- [33] Hagyard, M., Cumings, N., West, E., Smith, J., Solar phys., 1982, 80, 33
- [34] 艾国祥、胡岳风, 北京天文台台刊, 1986, 8, 1
- [35] 张斌等, 多通道太阳望远镜后端数据处理系统, 光学技术增刊, 152-158, 1995
- [36] H. Wang, C. Denker, T. Spirock, P. R. Goode, S. Yang, W. Marquette, J. Varsik, R. J. Fear, J. Nenow, D. D. Dingley, 1998, Solar Physics, 183, 1
- [37] <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/maggraph.html>
- [38] VIPER-QUAD 数据手册(www.coreco.com)
- [39] PYTHON 数据手册(www.coreco.com)
- [40] TMS320C6201 数据手册(www.ti.com)
- [41] 张雄伟等, DSP 芯片的原理与开发应用, 电子工业出版社, 2000
- [42] 郑南宁, 数字信号处理, 西安交通大学出版社, 1996
- [43] 任丽香等, TMS320C6000 系列 DSPs 的原理与应用, 电子工业出版社, 2000
- [44] Sapera User Menu (oc_comm._sapu0.pdf p17)
- [45] <http://msdn.Microsoft.com>
- [46] Davis Chapman 著 孟文 译, VC++.NET 入门, 中国电力出版社, 2003
- [47] David Sceppa, ADO 编程技术, 清华大学出版社, 2001
- [48] 施伯乐等译, 数据库处理--基础、设计与实现(第七版), 电子工业出版社, 2001
- [49] 美.伯杰著吕骏译, 嵌入式系统设计, 电子工业出版社, 2002
- [50] Wayne Wolf 著, 嵌入式计算机系统设计原理, 机械工业出版社, 2002
- [51] (美)Jean J. Labrsse 著, 嵌入式系统构件, 机械工业出版社, 2002
- [52] <http://www.altera.com>
- [53] 张辉 译, GNU/Linux 编程指南入门. (第二版), 清华大学出版社, 2002
- [54] 曾繁泰等, VHDL 程序设计, 清华大学出版社, 2001
- [55] 乔长阁等, VHDL 简明教程, 清华大学出版社, 1997
- [56] 李广军等, 可编程 ASIC 设计与应用, 电子科技大学出版社, 2000
- [57] RFC768 User Datagram Protocol <http://www.rfc-editor.org/>
- [58] RFC 791 - Internet Protocol <http://www.rfc-editor.org/>
- [59] ALTERA, NIOS DMA 手册, p2, ALTERA, 2003
- [60] ALTERA, NIOS AVALON 手册, p14, ALTERA, 2003
- [61] PULNIX TM1010 数据手册