第11卷 第4期 空间科学学报 Vol. 11, No. 4
1991 年 10 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1991

减法消除 CCD 太阳 Hα 图象干涉条纹的误差分析*

杨晓宁 栗 志
(中国科学院云南天文台，昆明)

摘 要

本文简要介绍了 CCD 产生干涉条纹的原因，对采用减法消除干涉条纹方法进行了论述．通过试验研究，提出了一种计算误差的方法，并对计算结果进行了分析和讨论．

关键词 CCD 干涉条纹 误差分析

一、前 言

CCD (Charge Couple Device) 由于其特有的优点，已在天文望远镜上逐步得到应用．而对薄型 CCD 来说，当其接受单色光时，会产生干涉条纹，使图象数据失真，所以消除 CCD 干涉条纹是个重要问题．文献[1]和文献[2]分别在恒星图象和太阳、恒星光谱方面作了消除 CCD 干涉条纹的工作，文献[3]则在太阳 Hα 单色象干涉条纹的消除方面取得成功。从目前所看到的资料，在消除 CCD 干涉条纹的算法上分为减法(如文献[1]、[3])和除法(如文献[2])两种。对研究人员而言，这两种处理方法会带来多大误差，是一个相当重要的问题．本文通过试验计算，提出了一种计算减法消除干涉条纹带来误差的方法，并对结果进行了分析和讨论．

二、条纹产生的原因

两束光产生干涉必须满足下面三个条件[4]：1. 两束光的振动频率相同；2. 两束光传播的方向不正交；3. 相位差恒为常数．

由于分子或原子发光的间歇性和各自的独立性，使得它们的频率、振动方向和相位不能保持恒定．对于严格的单色光而言，条件 1、2 足以保证产生干涉现象，但要得到稳定干涉场则需满足条件 3．由此得知：两束光要得到稳定干涉条件，它们必须来自一个光源的同一点(通过反射或折射)．

对于薄型 CCD 而言，为保护 CCD 感光硅片，在硅片前面粘了一块约 0.5mm 厚的

本文于 1990 年 11 月 26 日收到．
* 国家自然科学基金重大项目资助课题．

保护玻璃. 由于薄型 CCD 片不可能加工得非常平整,当接受单色光时,入射光线就与保护玻璃的反射光线和玻璃与 CCD 片之间的胶合层的反射光线相互作用,从而产生干涉条纹. 尽管反射率很小,但仍对入射光强度产生影响(如图 2).

三、CCD 干涉条纹象试验及误差分析

1. CCD 图象的表达

从 CCD 的模拟信号图象转变到数字图象信号,可简单分为几个部分(见图 1).

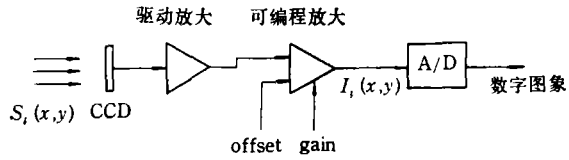

图 1 CCD 电路简图

Fig. 1 CCD circuit diagram

其中: $S_i(x,y)$ 为光强在 CCD 硅片上的分布. gain, offset 为可编程放大器的增益和偏置.

则带干涉条纹的 CCD 图象表达式为

$$I_i(x,y) = \{[S_i(x,y) + F_r(x,y)] \cdot Flat(x,y) + Bias(x,y) + Dark(x,y) + n(x,y) - \text{offset}\} \cdot \text{gain}. \tag{1}$$

其中: $Flat(x,y)$ 为 CCD 平场分布函数. $Bias(x,y)$、$Dark(x,y)$ 分别为 CCD 的偏场和暗场分布函数. $F_r(x,y)$ 是 $S_i(x,y)$ 所产生干涉条纹分量 $n(x,y)$ 为放大器等电子元件产生的随机噪声.

$F_r(x,y)$ 的表达式为

$$F_r(x,y) = \iint S_i(x',y') \cdot W(x,y;x',y')dx'dy'. \tag{2}$$

式中 $W(x,y;x',y')$ 为干涉函数,且 $|W(x,y;x',y')| \leqslant 1$. (2)式表明在 $F_r(x,y)$ 中不仅包含 $S_i(x,y)$ 对应象元入射光自身干涉的成分,还可能包含有其它相邻近的入射光所产生干涉的影响.

根据宁静区求标准干涉条纹象的方法[3],

$$F(x,y) = \frac{1}{256}\sum_{i=1}^{256} I_i(x,y) = \frac{1}{256}\left\{\left[\sum_{i=1}^{256} S_i(x,y) + \iint \sum_{i=1}^{256} S_i(x',y') \cdot W(x,y;x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\right] \cdot Flat(x,y) + \sum_{i=1}^{256}[Bias_i(x,y) + Dark_i(x,y) + n_i(x,y) - \text{offset}]\right\} \cdot \text{gain} \tag{3}$$

由于宁静区的亮暗灰度值差别较小,所以迭加平均后可视为常数,偏场和暗场不受迭加平均运算的影响,而 $n_i(x,y)$ 迭加后可看成为 $n_i(x,y)$ 的均值分布. 则有:

$$\bar{s}=\frac{1}{256}\sum_{i=1}^{256}S_i(x,y),\quad Bias(x,y)=\frac{1}{256}\sum_{i=1}^{256}Bias_i(x,y),$$

$$Dark(x,y)=\frac{1}{256}\sum_{i=1}^{256}Dark_i(x,y),\quad \bar{n}(x,y)=\frac{1}{256}\sum_{i=1}^{256}n_i(x,y).$$

代入(3)式,得

$$F(x,y)=\left\{\left[\bar{s}+\bar{s}\iint W(x,y;x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\right]\cdot Flat(x,y)+Bias(x,y)\right.$$
$$\left.+Dark(x,y)+\bar{n}(x,y)-\mathrm{offset}\right\}\cdot \mathrm{gain}. \tag{4}$$

若保持增益 gain 和偏置 offset 不变,则由(1)—(4)式得

$$I_i(x,y)-F(x,y)=\left\{\left[S_i(x,y)-\bar{s}+\iint (S_i(x,y)-\bar{s})\right.\right.$$
$$\left.\cdot W(x,y;x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\right]\cdot Flat(x,y)$$
$$\left.+n(x,y)-\bar{n}(x,y)\right\}\cdot \mathrm{gain}. \tag{5}$$

由(5)式知: $(S_i(x,y)-\bar{s})\cdot Flat(x,y)\cdot$ gain 为无干涉条纹太阳活动区细节分量; $\iint (S_i(x',y')-\bar{s})\cdot W(x,y;x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\cdot$ gain 是太阳活动区细节所产生干涉条纹分量,它的大小决定着减法消除干涉条纹算法的误差. 由于太阳属于强光,所以 $n(x,y)-\bar{n}(x,y)$ 可忽略不计.

2. 干涉条纹图象试验

两束光产生干涉, 其干涉强度为

$$I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi.$$

假设一束等强度平行单色光照在 CCD 面阵上, 经反射光等相互作用产生干涉条纹. 如果在 CCD 面阵每个象元上产生的干涉光对相邻象元的输入不产生影响, 由于反射材料相同,可以认为每个象元上干涉光分量 I_1、I_2 是基本相同的, 而在 CCD 面阵上产生的干涉条纹, 仅仅由于反射层的凹凸不平而产生不同的光程差所致. 则 CCD 面阵上任意两点光强起伏量为 $2\sqrt{I_1I_2}(\cos\Delta\varphi_i-\cos\Delta\varphi_j)$. 其中 $\Delta\varphi_i$, $\Delta\varphi_j$ 为第 i, j 两点各自的光程差. 显然, $\Delta\varphi_i$、$\Delta\varphi_j$ 仅和入射光波长和 CCD 反射层的不平整有关. 当这两项不变时, 干涉条纹的起伏量是随着光强变化而变化的.

太阳 Hα 波段活动区包含许多细节,如黑子、纤维组织、暗条和谱斑等. 文献[3]采用宁静区多帧迭加求平均来获得标准干涉条纹象, 然后与活动区图象进行实时相减来消除干涉条纹. 由于活动区细节光强与宁静区光强不一致, 标准干涉条纹象与活动区干涉条纹象就会有所差异. 与其它细节比较, 黑子或谱斑(这里没有考虑出现耀斑情况)与宁静区光强差较大,所以它们产生干涉条纹的起伏量也就较大,这就给减法消除干涉条纹带来误差, 但误差有多大, 这是下面所要讨论的问题.

图 2—图 4 是同一活动区图象 (512 × 512 × 8bit). 活动区中细节在 3 幅图中几何位置各不相同,而干涉条纹的形状位置不变. 在活动区中选定黑子 A 点、谱斑 B 点和宁静区 C 点. 先对图 2—图4 中 A 点测量灰度值,分别得到 Ai($i=1,2,3$) 3 个灰度值参数和

各自在图中的几何位置参数，把 Ai 3点两两相减，就能得到黑子在干涉条纹象中不同位置时的起伏值(或差值) $\Delta_1 i$. 同样，对标准干涉条纹象(图 5)与 Ai 相应位置的 3 点进行灰度值测量，并得到它们的起伏值 Δ_{2i}. 由于条纹的起伏量随入射光强不同而改变，通过Δ_{1i}、Δ_{2i} 比较，可以估算出减法消干涉条纹的误差大小. 测量数据见表 1. 同理，对活动区中谱斑 B 点和活动区内宁静区 C 点按上述方法分别进行测量，并列于表 2、表 3. 在测量时，考虑到噪声对测量值的干扰，每点采用 4 × 4 点相邻象素灰度值求和平均作为测量值.

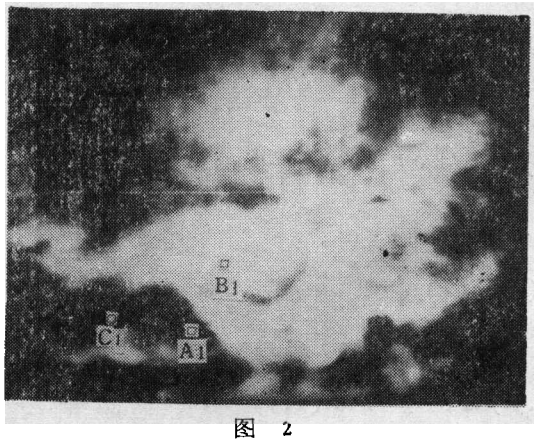

图 2

Fig. 2

其中 F_i 为标准干涉条纹象中相应 x、y 坐标的亮度. 以下相同.

从表 1 中可看到，活动区中黑子在图象中不同位置时，因干涉条纹影响，其灰度值发生变化. 但它们之间的亮度差值与纯干涉条纹象中相应位置的亮度差值比较接近，差值的最大误差值 ($|\Delta_{1i} - \Delta_{2i}|$) 为 3.19 个灰度单位(图象灰度值范围 0—255). 也就是说，在活动区图象中，与黑子灰度值原本相同的象素灰度值（不论这些象素相邻与否），在用减法消干涉条纹处理后，它们之间将产生最大为 3.19灰度单位的误差. 同理，表 2、表 3 的最大误差为 1.38 和 0.94 灰度单位. 通过测量，可分别求得消去干涉条纹后 A、B、C 3 点的灰度值为 $g_1 = 102.94$、$g_2 = 179.94$、$g_3 = 160.19$，构成标准干涉条纹宁静区灰度值为 $g_4 = 162.00$. 由计算可分别得到消除条纹后，A、B、C 3 点的灰度与标准条纹的灰度差分别占 g_4 的 36.57%、11.07%、1.12%，其各自对应的测量误差最大为：3.10%、0.77%、0.59%. 这说明与构成标准干涉

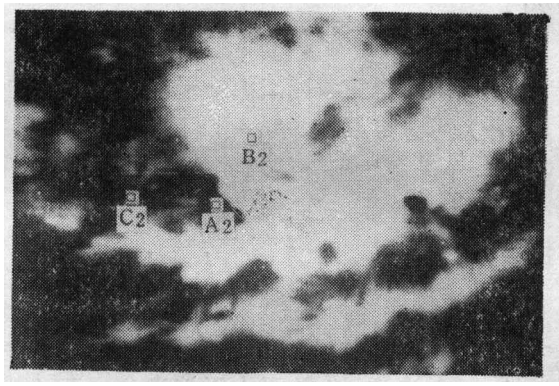

图 3

Fig. 3

表 1 黑子测量误差表

图象名	坐标		灰度值 A_i $i=1,2,3$	差值 Δ_{1i}	灰度值 F_i $i=1,2,3$	差值 Δ_{2i}	误差值 $\lvert\Delta_{1i}-\Delta_{2i}\rvert$
	x	y					
S_1.DAT	179	99	106.50	$A_1-A_2=-9.50$	168.75	$F_1-F_2=-6.31$	3.19
S_2.DAT	188	230	116.00	$A_2-A_3=6.31$	175.06	$F_2-F_3=5.44$	0.69
S_3.DAT	183	135	109.69	$A_3-A_1=3.19$	169.63	$F_3-F_1=0.88$	2.31

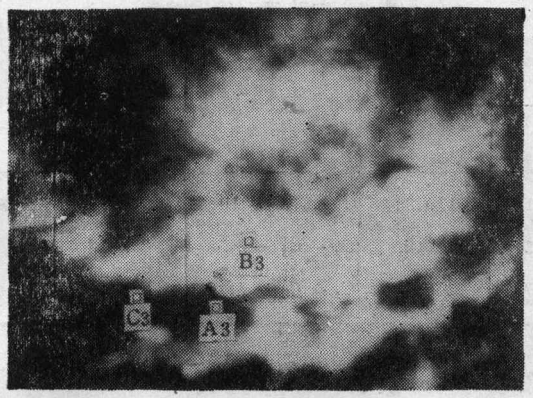

图 4

Fig. 4

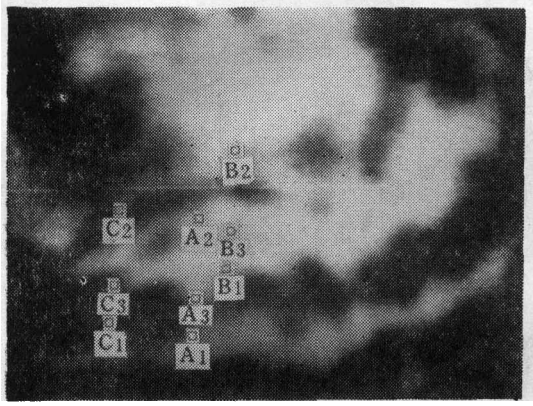

图 5　纯干涉条纹象

Fig. 5　The pure image of the interference fringe



图 6　消去干涉条纹后图象

Fig. 6　The defringer image

条纹宁静区灰度值相比，活动区中的细节灰度值与之相差越大，则消除条纹后所产生的误差也随着增大。

若以表 1 中最大误差为绝对误差，则最大绝对误差为 $\Delta\max = 3.19$ 灰度单位。

最大相对误差为：$\delta_1 = \Delta\max/g_1 = 3.10\%$。

表 2　谱斑测量误差表

图象名	坐标		灰度值 B_i $i=1,2,3$	差值 Δ_{1i}	灰度值 F_i $i=1,2,3$	差值 Δ_{2i}	误差值 $\lvert\Delta_{1i}-\Delta_{2i}\rvert$
	x	y					
S_1.DAT	208	178	197.31	$B_1-B_2=7.88$	179.19	$F_1-F_2=7.69$	0.19
S_2.DAT	217	309	189.44	$B_2-B_3=-3.13$	171.50	$F_2-F_3=-4.31$	1.19
S_3.DAT	212	214	192.56	$B_3-B_1=-4.75$	175.81	$F_3-F_1=-3.38$	1.38

表 3 宁静区测量误差表

图象名	坐标		灰度值 C_i $i=1,2,3$	差值 $\triangle_{1i}$	灰度值 F_i $i=1,2,3$	差值 $\triangle_{2i}$	误差值 $\lvert\triangle_{1i}-\triangle_{2i}\rvert$
	x	y					
S_1.DAT	113	111	150.31	$C_1-C_2=-10.13$	151.75	$F_1-F_2=-10.50$	0.38
S_2.DAT	112	242	160.44	$C_2-C_3=2.38$	162.25	$F_2-F_3=1.81$	0.56
S_3.DAT	117	147	158.06	$C_3-C_1=7.75$	160.44	$F_3-F_1=8.69$	0.94

消除干涉条纹后图象的均方误差(以图 2 为例):

$$\delta_2=\sqrt{\sum_{x=1}^{512}\sum_{y=1}^{512}(s_1(x,y)-g_4)^2\cdot\delta_1/512}\approx 0.46 \quad \text{灰度单位}$$

四、结果与讨论

1.从上面分析知,减法消干涉条纹会带来一些误差,且测量误差随着被测量处与标准条纹处的灰度差的增大而增大,但一般情况下,此方法能保证资料的可用性. 当活动区出现耀斑等异常现象时,误差会相应增大,遇到此类情况时,研究人员可根据前面所提供的方法计算误差,以确保资料的可用性. 图 6 为消除干涉条纹后的图象.

2. 此方法能消除偏场和暗场的影响.

3. 因 $(s(x,y)-\bar{s})\cdot Flat(x,y)\leqslant s(x,y)\cdot Flat(x,y)$, 所以减法在一定程度上可起到减小平场影响的作用.

4. 在使用 CCD 时,不可能保证入射光完全垂直于 CCD 片,这样对入射到每个象元的单色光,除自身干涉产生作用外,还可能受相邻象元入射光干涉的影响.

若假设每个象元的入射光只对自身产生干涉作用,而不考虑对邻近象元的影响,则

$$F_r(x,y)=\iint s(x',y')\cdot W(x,y;x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'=s(x,y)\cdot W(x,y)$$

这样,只要能精确测得暗场 $Dark(x,y)$ 和偏场 $Bias(x,y)$, 就能用除法来消除干涉条纹, 即先求得

$$C_1(x,y)=(Bias(x,y)+Dark(x,y)+n(x,y)-\text{offset})\cdot\text{gain}$$

$$C_2(x,y)=(Bias(x,y)+Dark(x,y)+\bar{n}(x,y)-\text{offset})\cdot\text{gain}$$

则由(1)、(4)式得

$$\frac{I_i(x,y)-C_1(x,y)}{F(x,y)-C_2(x,y)}=\frac{S_i(x,y)+S_i(x,y)\cdot W(x,y)+n(x,y,t_1)-n(x,y,t_2)}{\bar{s}+\bar{s}\cdot W(x,y)}$$

$$\simeq\frac{S_i(x,y)(1+W(x,y))}{\bar{s}(1+W(x,y))},$$

所以 $$S_i(x,y)=\frac{I_i(x,y)-C_1(x,y)}{F(x,y)-C_2(x,y)}\cdot\bar{s}.$$

$n(x,y,t_i)$ 是平稳随机噪声，在进行太阳这种强光观测中，$n(x,y,t_i)$ 可忽略不计。由于除法的敏感性，一旦 $C_1(x,y)$、$C_2(x,y)$ 处理不当，就会带来更大误差。

作者曾与杨为民博士进行过有益的讨论，在此表示感谢。

参　考　文　献

[1] 陈建生等，天文学报，第 28 卷，第 303 页，1987.
[2] 秦松年等，天文学报，第 30 卷，第 387 页，1989.
[3] 杨晓宁等，空间科学学报，第 10 卷，第 237 页，1990.
[4] 赵达尊等，波动光学，宇航出版社，1988.

ERROR ANALYSIS FOR THE REMOVAL OF THE INTERFERENCE FRINGES FROM A SOLAR IMAGE OBTAINED WITH A CCD SYSTEM BY MEANS OF THE SUBTRACTION

Yang Xiao-ning　Li Zhi

(Yunnan Observatory, Academia Sinica, Kunming)

Abstract

This paper briefly reports the causes of the pdoduction of interference fringes of a CCD system. A method for removing the interference fringes, by means of the subtraction, from the solar Hα image obtained with the CCD system is also described. A method for estimating the error is proposed through tests and studies and the calculated results are analysed and discussed.

Key words　CCD, Interference fringe, Error analysis