

文章编号: 1672-2892(2012)05-0571-04

射电成像中电离层扰动的最小熵校正方法

张雄彬, 王军锋

(上海交通大学 信号处理与系统研究所, 上海 200240)

摘 要: 在合成孔径射电成像中, 电离层的扰动会在接收信号中引入相位误差, 导致图像出现模糊和漂移。本文提出了一种新方法, 以校正这种相位误差。使用熵作为衡量射电天文图像质量的指标, 熵越小代表图像质量越高, 当熵值达到最小时, 认为相位误差被校正。相比其他传统方法, 本方法仅利用脏图本身就能够校正相位误差。

关键词: 射电天文; 最小熵; 脏图; 相位校正

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

Minimum-entropy correction of phase errors caused by ionospheric disturbance

ZHANG Xiong-bin, WANG Jun-feng

(Department of Electronic Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper presents a new method to correct the phase error caused by ionospheric disturbance in the synthetic aperture radio imaging. Entropy is used to measure the quality of the image. Smaller entropy means better quality. The phase error is corrected such that the entropy of the image is minimized. Compared with the traditional methods, the proposed scheme only uses the dirty map itself to correct the phase error.

Key words: radio astronomy; minimum-entropy; dirty map; phase correction

在射电天文中, 通常用合成孔径射电望远镜来测量天图。合成孔径望远镜由多对二元干涉仪组成, 每一对干涉仪测量的数值代表一个天区亮度分布的傅里叶变换, 这些数值组成了脏图。由于电离层的扰动会对射电天文信号造成干扰, 在接收到的天图中, 射电源被平移且变得模糊。为校正相位误差, 尽量消除这两种影响, 可以采用很多传统方法, 如电离层模型法^[1-2]、双频法^[3]等。但这些方法都需要额外的测量数据, 从而增加设备或者测量方法的复杂度。本文提出的最小熵方法最初被应用在雷达图像处理中进行相位校正^[4]。它基于的原理是, 当图像的熵^[5-7]达到最小时, 图像的锐利度最大, 也最清晰。本文中, 最小熵方法被用来校正电离层扰动造成的相位误差, 它在数据需求方面具有很大优势, 仅利用脏图本身就可以完成校正。

1 相位校正

令 $g_0(k, l)$ 表示被校正的脏图数据, $f_1(m, l)$ 表示 $g_0(k, l)$ 在 k 方向上进行傅里叶变换后的图像数据, $\Delta\varphi_m$ 表示相位误差, 则校正后的图像为:

$$g_1(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} f_1(m, l) \exp[-j\Delta\varphi_m] \exp\left(-j\frac{2\pi}{M}km\right) \quad (1)$$

式中 M, N 是脏图中行和列的总数。

把 $|g_1(k, l)|^2$ 的熵定义为:

$$\varepsilon \left[|g_1(k, l)|^2 \right] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} \frac{|g_1(k, l)|^2}{S} \ln \frac{S}{|g_1(k, l)|^2} \quad (2)$$

式中

$$S = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |g_1(k, l)|^2 \quad (3)$$

熵被用来衡量一个分布函数的平滑度, 一个函数越平滑, 那么熵值越大。在合成孔径射电天文成像中, 当相位误差被校正时, 图像达到最尖锐, 同时熵值达到最小值。因此, 通过熵值可以估计相位误差被校正的程度。式(2)可以写成:

$$\varepsilon \left[|g_1(k, l)|^2 \right] = \ln S - \frac{1}{S} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |g_1(k, l)|^2 \ln |g_1(k, l)|^2 \quad (4)$$

由于 S 是一个常数, 所以熵可以被重新定义为:

$$\varepsilon' \left[|g_1(k, l)|^2 \right] = - \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |g_1(k, l)|^2 \ln |g_1(k, l)|^2 \quad (5)$$

在 $\varepsilon' \left[|g_1(k, l)|^2 \right]$ 达到最小时, $\Delta\varphi_m$ 应该满足:

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g_1(k, l)|^2 \right]}{\partial \Delta\varphi_m} = 0 \quad (6)$$

根据式(5), 有

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g_1(k, l)|^2 \right]}{\partial \Delta\varphi_m} = - \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} \left[1 + \ln |g_1(k, l)|^2 \right] \frac{\partial |g_1(k, l)|^2}{\partial \Delta\varphi_m} \quad (7)$$

因为 $|g_1(k, l)|^2 = g_1(k, l)g_1^*(k, l)$

$$\frac{\partial |g_1(k, l)|^2}{\partial \Delta\varphi_m} = 2 \operatorname{Re} \left[g_1^*(k, l) \frac{\partial g_1(k, l)}{\partial \Delta\varphi_m} \right] \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中得到:

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g_1(k, l)|^2 \right]}{\partial \Delta\varphi_m} = -2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} \left[1 + \ln |g_1(k, l)|^2 \right] g_1^*(k, l) \frac{\partial g_1(k, l)}{\partial \Delta\varphi_m} \right\} \quad (9)$$

另外为了方便表达, 用 $m', \Delta\varphi_{m'}$ 替代 m 和 $\Delta\varphi_m$, 式(1)可以写成:

$$g_1(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} f_1(m', l) \exp[-j\Delta\varphi_{m'}] \exp\left(-j\frac{2\pi}{M}km'\right) \quad (10)$$

对式(10)求 $g_1(k, l)$ 对 $\Delta\varphi_{m'}$ 的偏导, 得:

$$\frac{\partial g_1(k, l)}{\partial \Delta\varphi_m} = -jf'(m, l) \exp[-j\Delta\varphi_m] \exp\left(-j\frac{2\pi}{M}km\right) \quad (11)$$

将式(1)代入式(9), 整理可得:

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g_1(k, l)|^2 \right]}{\partial \Delta\varphi_m} = -2 \operatorname{Im} \{ \exp[-j\Delta\varphi_m] \alpha(m) \} \quad (12)$$

式中

$$\alpha(m) = \sum_{l=0}^{N-1} f_1(m, l) \times \sum_{k=0}^{M-1} \left[1 + \ln |g_1(k, l)|^2 \right] g_1^*(k, l) \exp\left(-j\frac{2\pi}{M}km\right) \quad (13)$$

将式(12)代入式(6), 得:

$$\Delta\varphi_m = c\pi + \angle\alpha(m) \quad (14)$$

式中 c 是一个整数, 令 $c=0$ 得到:

$$\Delta\varphi_m = \angle\alpha(m) \quad (15)$$

2 算法

根据最小熵校正法的原理,使用脏图作为原始数据,令 φ_m 为0,根据式(1)计算,得到初始 $g_1(k,l)$;然后由式(13)计算得到 $\alpha(m)$,进一步由式(15)得到 $\Delta\varphi_m$ 。如果 $\Delta\varphi_m$ 没有达到足够小,程序将根据得到的新的 $\Delta\varphi_m$ 值,由式(1)重新计算 $g_1(k,l)$;如果 $\Delta\varphi_m$ 足够小,则循环结束,算法流程图如图1所示。

3 结果

本文选用的数据来自已经过预处理的射电天文观测数据,并取其中的脏图当作源数据。随机选择数据的测试区域,为了降低运算量,截取其中 512×512 大小的数据区域。

随机选择4块脏图区域进行处理,将相位误差初始化为0,并设置不同阈值来进行实验,图2是其中1组图片的图像处理结果。图2(a)是原始脏图,图2(b)是阈值设为0.005时经过最小熵方法进行校正后的图像,图2(c)是阈值设为0.0001时经过校正后的图像。4副图像都经过这样的处理,其对应的熵值见表1。

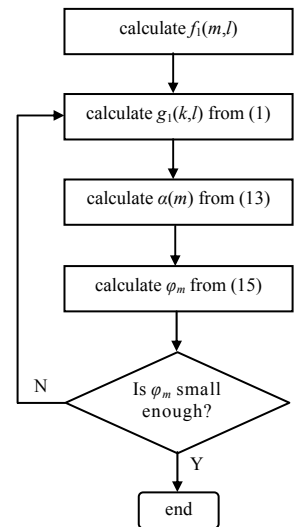


Fig.1 Algorithm flow chart
图1 算法流程图

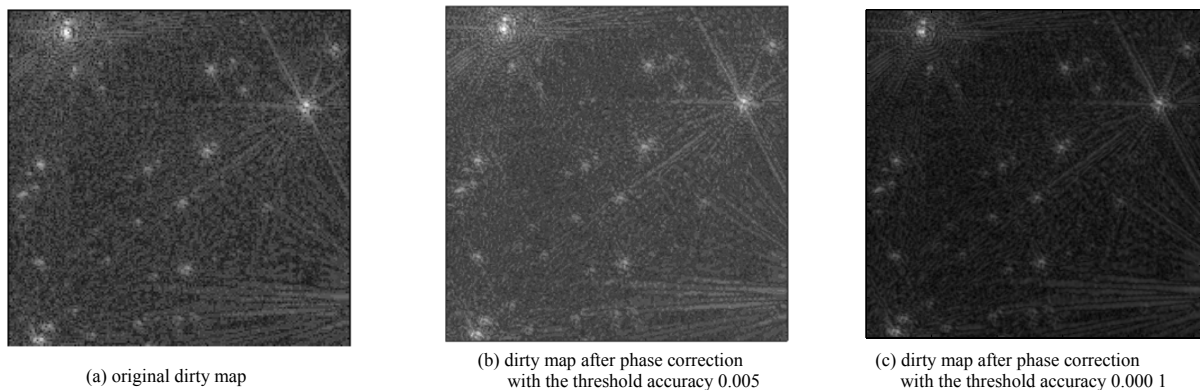


Fig.2 Effect of minimum-entropy correction
图2 最小熵校正结果

表1 最小熵方法校正前后图像熵值

Table1 Image entropy before and after minimum-entropy correction

image entropy	origin image	threshold 0.005	threshold 0.0001
1 st group	12.285 4	12.277 4	12.276 7
2 nd group	12.263 1	12.255 9	12.255 1
3 rd group	12.287 8	12.280 5	12.280 0
4 th group	12.343 6	12.334 0	12.333 4

从图中能明显看到,校正过的图像要比原始图像更加尖锐,并且背景噪声的影响也被削弱了。但是阈值为0.005和阈值0.0001的2幅图像就很难用肉眼进行评判了,所以要采用客观标准进行定量评判。从表1中可以看到,原始图像的熵值最大,随着误差阈值的降低,得到校正后的图像熵值也越来越低。但当阈值降低到一定程度后,熵值的下降逐渐缓慢。从表中还可以看到,从原始图像到阈值为0.005的校正图像,熵值平均下降0.008;而从阈值为0.005到阈值为0.0001的校正图像,熵值平均只下降0.0006。所以可以认为,当阈值达到0.0001时,相位误差已经得到了充分校正。

4 结论

最小熵方法能够有效校正由电离层造成的相位误差,尽管由于电离层模型简单,该方法并不能完全消除电离层扰动造成的相位干扰,但是可以使脏图变得更加尖锐;另一方面,这种方法在校正电离层造成相位干扰的同时,还对其他因素造成的相位误差进行一定的校正。

(下转第603页)