

联合相位校正技术在双基雷达月球成像的应用

俞开斌¹, 李明辉¹, 赵荣坤¹, 尹 岩^{2,3,4}, 牛向华^{5,6},
孙京海^{5,6}, 黄丽佳^{2,3,4}

(1. 贵州大学 省部共建公共大数据国家重点实验室, 贵阳 550025; 2. 中国科学院 航天信息研究所, 北京 100094;
3. 目标认知与应用技术重点实验室, 北京 100190; 4. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049;
5. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 6. 贵州射电天文台, 贵阳 550025)

摘要: 随着采用雷达天文学技术开展行星成像研究的发展, 具备高灵敏度的 500 m 口径球面射电望远镜 (Five Hundred Meter Aperture Spherical Radio Telescope, 简称 FAST) 也开展了月球雷达成像的相关研究。基于由三亚非相干散射雷达 (Sanya Incoherent Scatter Radar, SYISR) 和 FAST 组成的双地基雷达系统, 采用包络对齐和相位校正方法, 修正月地间相对运动带来的雷达回波间的误差。由于 FAST 具有高灵敏度, 并且雷达回波的信噪比高, 因此包络对齐仅采用曲线拟合技术就基本可以满足需求。在相位校正方面, 为了提高精度并降低时间消耗, 提出采用相位梯度自聚焦算法与最小熵自聚焦算法相结合的方法。实验证明, 此方法可有效提高月球图像对比度, 降低图片熵值。

关键词: 月球雷达成像; 双基雷达; 相位梯度自聚焦; 最小熵自聚焦

中图分类号: P184 **文献标识码:** A

1 引言

早在 1946 年, 人类就已经发现雷达电磁波能够穿越大气层并被空间中的月球反射^[1]。在随后的雷达发展和天文学发展中, 两者结合形成了一个新的学科——雷达天文学。地基合成孔径雷达成像是天体成像研究的一种重要手段, 以阿雷西博望远镜、绿岸望远镜为代表的地面望远镜在建成后, 持续开展对月球的成像研究, 并取得了众多研究成果^[2-4]。双基合成孔径雷达是合成孔径雷达的一种。相比单基合成孔径雷达, 它能够按需搭配合适的发射机和接收机, 具有高功率、高灵敏度等特点, 因此更加适合探测月球等远距离空间目标。FAST

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-04-05

资助项目: 国家自然科学基金 (12363010); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2023] 一般 352, 黔科合基础-ZK[2023] 一般 039, 黔科合服企 [2023]003)

通讯作者: 李明辉, limh@gzu.edu.cn

自建成以后, 就凭借其巨大的合成孔径和接收面积成为世界一流的大型望远镜^[5, 6]。FAST 建成时的主要功能是接收宇宙中的中子星等天体产生的微弱电磁信号, 它没有信号发射功能, 但其卓越的反射面性能和高灵敏度使其能够作为核心接收系统并协同其他雷达构建 Bi-SAR 系统^[7]。

与常见的地面目标成像不同, 月球等天体成像需要更长的积累时间, 但是这会使月球散射点的回波信号在距离单元中出现跃迁, 进一步使信号无法聚焦在同一个点, 这是所有雷达的长时间成像都会遇到的问题^[7, 8]。为了能够使信号更好地聚焦成像, 研究人员从信号的包络和相位两方面入手: 在包络方面, 为了使散射点的能量重新对齐在同一个距离单元内, 人们开发出了相邻相关法、全局包络最小熵法等包络对齐算法^[9-11]; 在相位方面, 为了使信号达到相干性从而聚焦图像, 人们开发出基于相位梯度的特显点法、相位梯度自聚焦法 (phase gradient autofocus, PGA), 及基于图像质量的最小熵 (minimum entropy autofocus, MEA) 与最大对比度迭代法等相位校正法^[12-16]。在上述相位校正算法中, 基于图像质量的算法需要多次迭代, 这会花费较多的时间和计算资源, 但是这种方法聚焦出的图像质量一般较好; 与之相对, 基于相位梯度的方法迭代次数较少, 但是最终的图像质量相对较差。为了在成像中提升图像质量的同时, 减少算法所需的时间, 本文将基于梯度的 PGA 与基于图像质量的 MEA 相结合, 提出了 PGA-MEA 联合的相位校正方法。

本文的结构如下: 首先, 通过简单的成像模型分析月球回波信号和信号成像过程, 并介绍通过 FAST 和 SYISR 联合探测得到的月球数据的特点。然后, 介绍了成像算法中的距离多普勒算法 (range-Doppler algorithm, RDA), 以及所需要的 PGA 和 MEA。最后, 利用该月球数据进行成像对比实验, 结果表明, PGA-MEA 的联合相位校正既提高了图像质量, 还降低了迭代次数。

2 双基 ISAR 成像原理

双地基 ISAR 成像的简化运动模型如图 1a) 所示。在图 1a) 中, 发射机 Ra_1 向月球的 P 区域发射信号, 接收机 a_2 接收 P 区域散射点反射回来的电磁信号, 发射的信号 $s_t(\tau, t_i)$ 通常为式 (1) 所示的线性调频信号 (LFM),

$$s_t(\tau, t_i) = A \times \text{rect}\left(\frac{\tau}{T}\right) \times \exp\left[2\pi j\left(f_c t_i + \frac{1}{2}k\tau^2\right)\right] \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

式中, A 是发射机功率, τ 是信号的距离向上的快时间, t_i 是方位向上第 i 个信号的慢时间, T 表示信号的重复周期, $\text{rect}()$ 表示矩形窗函数, $\exp()$ 是指数函数, j 是虚数单位, f_c 和 k 分别是雷达的载波频率和调频斜率。

如图 1b) 所示, 由于 P 区域中不同散射点与雷达的相对运动存在区别, 所以可以将图 1a) 中雷达和月球的运动重新分解为平动分量和转动分量。其中, 平动分量是 P 区域所有散射点相对于雷达的整体运动分量, 即所有散射点共有的运动分量。在将平动分量分解出后, 月球 P 区域相对于雷达只剩下转动分量。设 $R_t(t_i)$ 表示在 t_i 时刻所有散射点共有的平动分

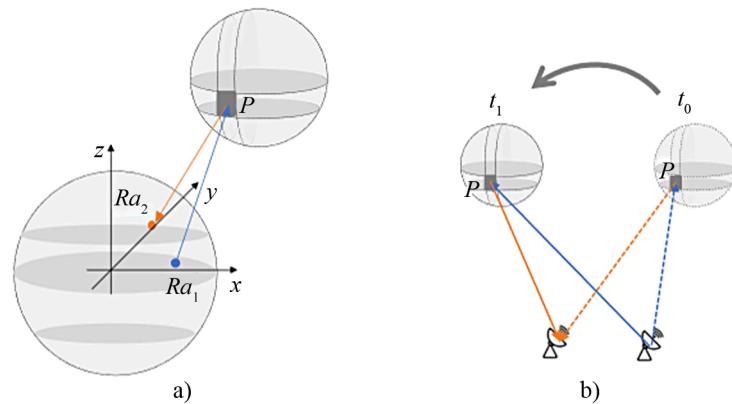


图1 简化 Bi-SAR 月球观测模型

量, 即 t_i 时刻信号传播的往返距离, $R_{r_i}(t_i)$ 表示同一时刻第 l 个散射点的转动分量, 那么该时刻该散射点的回波信号 $S_{r,l}(\tau, t_i)$ 在距离压缩以后可以表示为:

$$S_{r,l}(\tau, t_i) = \rho_l \times A \times \text{sinc} \left[B \left(\tau - \frac{R_t(t_i) + R_{r_i}(t_i)}{C} \right) \right] \times \exp \left[-\frac{4j\pi f_c (R_t(t_i) + R_{r_i}(t_i))}{C} \right], \quad (2)$$

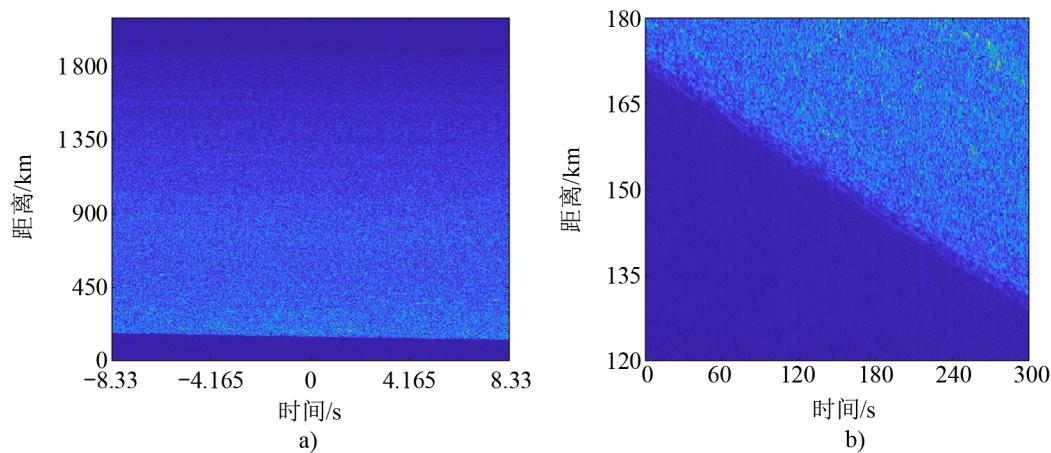
式中 $\text{sinc}()$ 是信号的包络项, $\exp()$ 是信号的相位项。包含了所有散射点的回波信号如式(3)所示:

$$S_r(\tau, t_i) = \sum_{l=1}^L \left[\rho_l \times A \times \text{sinc} \left(B \left(\tau - \frac{R_t(t_i) + R_{r_i}(t_i)}{C} \right) \right) \times \exp \left(-\frac{4j\pi f_c (R_t(t_i) + R_{r_i}(t_i))}{C} \right) \right]. \quad (3)$$

图2所示为FAST与SYISR进行联测得到的月球回波数据中的一段及其局部放大图^[17, 18]。表1为收发装置的部分主要参数, 其中的方位分辨率是根据文献[17, 18]中的内容与雷达方位分辨率公式计算得到的。该数据已完成距离压缩和数据剔除操作, 故该数据中的信号可用式(3)表示。可以看到, 由于观测期间月球与雷达的相对运动, 图2b)所示的慢时间域上的信号存在明显倾斜现象, 强散射点反射的回波形成的亮线也分散在不同距离单元中。平动分量和转动分量均会导致信号回波的包络和相位偏移, 从而造成雷达图像无法聚焦成像, 因此需要对平动和转动分量进行补偿。

3 雷达成像算法和月球成像流程

对月球的成像采用距离多普勒成像算法RDA, 它将信号的包络项与相位项分开进行处理, 即通过包络对齐步骤和相位校正步骤分别补偿和校正相位项中的 $(R_t(t_i) + R_{r_i}(t_i))$ 。包络对齐是对信号运动进行补偿, 使信号在距离时间域上重新对齐用于参考的信号。在散射



注: a) 月球完整图像; b) 信号前端放大。

图2 数据整体图像及部分放大图像

表1 FAST与SYISR的主要参数

FAST		SYISR	
接收带宽	300 600 MHz	发射载频	430 MHz
采样率	1.25 GHz	脉冲带宽	0.3 MHz
降采样后采样率	0.5 MHz	脉冲时宽	0.002 s
距离向单元分辨率	0.3 km	脉冲重复周期	0.06 s
方位分辨率	约 0.96 km	距离分辨率	约 0.5 km

点的转动分量 $R_{rt}(t_i)$ 没有超过距离分辨率时, 包络对齐主要补偿的是运动分量中的平动分量。在相位项中, f_c/C 是信号的波长, $(R_t(t_i) + R_{rt}(t_i))$ 的细微误差会因为载频 f_c 被放大, 使相位项出现误差从而引起散焦, 所以相位校正的剩余误差一般要求达到信号波长的精度。可以注意到, 散射点的平动分量和转动分量都影响了信号中的包络项。当成像时间较短时, 转动分量较小, 散射点的回波能量并没有越过距离单元, 平动分量被补偿以后, 信号的包络可以达到包络对齐的要求; 当成像的积累时间过长时, 转动分量会大于距离分辨率, 散射点的回波会分散在不同距离单元中, 并与其他散射点的能量混合, 这就需要在平动分量基本得到补偿后, 重新针对每一个出现越过距离单元的散射点的转动分量进行二次的局部包络对齐。在包络对齐基本达到要求以后, 再使用相位聚焦算法对信号的相位项进行计算和补偿, 最后, 信号矩阵通过傅里叶变换得到月球表面在距离多普勒域下的雷达图像。RDA 的成像流程如图3所示。

在缺乏星历等辅助数据和软件支持且信噪比较低的情况下, 可利用相邻信号的相关性或信号包络的平均熵来构建信号的平动分量, 然后进行包络对齐。FAST 周围电磁干扰与硬件白噪声的影响极小, 因此, FAST 接收的信号具有很高的信噪比(如图2所示), 并且数据中的背景部分与信号部分界线分明。基于此特性, 我们可采用一种简便可行的平动分量

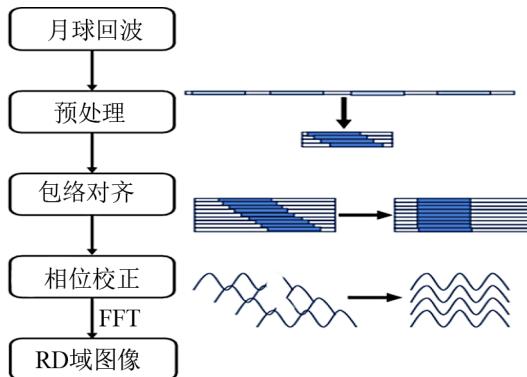


图3 RDA 月球成像全流程

构造方法：首先设定背景噪声的阈值寻找信号的起始位置，然后对所有信号的位置序列进行拟合平滑，最后得到一个近似的信号平动分量。在经过包络对齐的步骤后，式(3)可以表示为：

$$S_r(\tau, t_i) = \sum_{l=1}^L \rho_l \times A \times \text{sinc} \left[B \left(\tau - \frac{R(t_i)}{C} \right) \right] \times \exp \left(-\frac{4j\pi f_c R(t_i)}{C} \right) . \quad (4)$$

式(4)中 $R(t_i)$ 是平动分量的残余分量与转动分量的和。当散射点转动分量未超出距离分辨率时， $R(t_i)$ 对包络项造成的影响可忽略不计，而在相位项上会导致图像无法聚焦。考虑到转动分量较小，可忽略信号中的包络项，式(4)中的相位项则可用式(5)表示：

$$\phi(i) = \exp [-j(\varphi(i) + \varphi)] , \quad (5)$$

其中， $\varphi(i)$ 是第 i 个信号的相位，表示为 $\varphi_i = \frac{2\pi f_c R(t_i)}{C}$ ， φ 是背景噪声等因素引起的干扰相位。相位校正的目的就是以某一个信号的相位作为参考相位，将其他信号的相位重新对齐于该相位，此时信号在方位向经过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 以后可以得到一个聚焦的图像。下文将通过公式说明 PGA 和 MEA 的相位补偿流程。

3.1 PGA 成像原理

20世纪末，PGA 由 Wahl 等人^[13]提出，之后被用于各种成像场景中。基于信号特显点的 PGA 有选点、圆移、加窗、相位计算和迭代这几个主要步骤。为了更好地利用信号中的包络信息并减少算法运算量，PGA 通常会以信号中的特显点作为相位校正的计算矩阵。特显点的定义为信号强度变化较小的距离单元，这种强度的变化幅度可以用归一化均方差作为衡量标准。令 $C_\tau(I)$ 表示第 τ 个快时间对应的距离单元的信号强度， I 表示慢时间方位单元的信号总量，那么 $C_\tau(I)$ 的归一化幅度方差 (normalized amplitude variance, Nav) 可表示为：

$$Nav_\tau = 1 - \frac{\text{mean}(C_\tau(I))^2}{\text{mean}(C_\tau(I)^2)} , \quad (6)$$

式中， $\text{mean}()$ 为均值函数。 Nav_τ 的值越接近 0，证明该距离单元中的信号平稳度越好，一般当 Nav_τ 小于 0.12 时，就认为该距离单元符合特显点要求。为方便后续说明，选取得到

的特显点矩阵的相位表示为 $\phi_n(i)$, n 是矩阵的距离单元素索引, i 是矩阵的方位单元素索引。

通过 Nav_τ 得到特显点矩阵后, 将矩阵在慢时间方位维度上进行傅里叶变换, 并得到该矩阵的距离多普勒域图像矩阵。尽管此时图像并没有完全聚焦, 但是图像的能量仍然能够分布在一个合适的范围内, 并且存在一些强能量点。在距离域上选择每个距离单元中最强的能量点, 圆移到多普勒零频; 然后继续在距离域上进行加窗, 将窗口外所有图像单元置零; 最后重新将距离多普勒域的图像矩阵逆变换到距离时间域。圆移和加窗的目的是保留信号中的有用相位, 并剔除信号中的干扰相位。在干扰相位 φ 已经被完全消除的理想情况下, 特显点矩阵的相位 $\phi_n(i)$ 可以表示为:

$$\phi_n(i) = \exp(-j\varphi_n(i)) . \quad (7)$$

基于复数的特性, 在慢时间维度上对相邻信号两两共轭相乘, 可以得到相邻信号间的相位差 $\Delta\varphi_n(i)$, 表示为:

$$\Delta\varphi_n(i) = \varphi_n(i) - \varphi_n(i-1) . \quad (8)$$

式(8)只是表示第 i 个信号相对于第 $i-1$ 个信号的相位差, 而相位校正需要将指定信号的相位作为参考相位, 其他信号减去相对于参考相位的相位差。将第 1 个信号的相位作为参考相位, 那么其他信号相对于第 1 个信号的相位差 $\varphi_n(i, 1)$ 可以累加计算, 从而得到:

$$\varphi_n(i, 1) = \sum_{ii=1}^i \Delta\varphi_n(ii) . \quad (9)$$

由于相位误差估计是通过多个特显点所得到, 所以在相位估计时还需要将所有特显点估计得到的相位进行加和或平均计算, 最后再进行一阶拟合平滑, 从而得到每个信号所需要的相位补偿。用于补偿的相位 $\varphi_c(i)$ 的计算公式可以表示为:

$$\varphi_c(i) = \text{fit} \left(\sum_{nn=1}^n \Delta\varphi_{nn}(i, 1) \right) , \quad (10)$$

式中的 $\text{fit}()$ 表示拟合函数, 拟合方法为最小二乘法拟合。在实际的应用中, 图像的聚焦程度和干扰误差不会一次性优化, 因此 PGA 一般需要 10 次左右的迭代。随着迭代次数的增加, 干扰误差和聚焦程度逐渐优化, PGA 的加窗操作也需要相应调整, 因此 PGA 优化的一个方向就是改进窗口优化规则。

3.2 MEA 成像原理

MEA 最早由美国林肯实验室的 Kragh 和 Kharbouch^[14] 在 2006 年提出, 该算法需要基于整个图像的质量进行迭代计算, 所以计算量大于基于相位梯度的 PGA。在牺牲计算时间和效率的前提下, MEA 的图像聚焦效果优于 PGA 等基于相位梯度的聚焦算法。

因为 MEA 基于图像熵, 所以需要先定义图像熵。设迭代过程中信号经傅里叶变换所得的距离多普勒域图像为 $Im_{it}(N, M)$, N 、 M 分别表示距离向和方位向的总单元数, 下标 it 表示迭代次数, n 、 m 为对应的索引。 $E_{Im} = |Im|$ 为图像能量的总强度, 熵 (H) 的计算公式为:

$$H = - \sum_{n,m} \frac{|Im_{it}(n, m)|}{E_{Im}} \ln \left(\frac{|Im_{it}(n, m)|}{E_{Im}} \right) . \quad (11)$$

继续将一维相位数组 $\varphi_c(i, it)$ 作为各信号的相位校正量, 可以推出式(11)是 φ_c 的函数, 则须寻找使式(11)表示的图像熵最小化的 φ_c 组合。

坐标下降算法对熵关于相位序列求导, 得到熵的多阶梯度公式。相位的变化区间为 $[-\pi, \pi]$, 在这个区间内, 求取一阶导的零值, 此时对应的相位点即是熵值的最低点。Kragh 和 Kharbouch 详细地推导了更新相位的计算流程, 得到的相位更新公式为^[14]:

$$\varphi_c(i, it + 1) = \varphi_c(i, it) + \arctan \left(\frac{A}{B} \right) , \quad (12)$$

$$A = -H''(it) = \frac{2}{ME_{Im}} \operatorname{real} \left(\frac{\sum_n \operatorname{imag}(Im_{it}(n, M)) \times \sum_m e^{2j\pi it \frac{n}{N}} \times \ln(|Im_{it}(n, m)|^2) \times \overline{Im_{it}(n, m)}}{\sum_m e^{2j\pi it \frac{n}{N}} \times \ln(|Im_{it}(n, m)|^2) \times \overline{Im_{it}(n, m)}} \right) - \frac{2}{M^2 E_{Im}} \sum_n \left(|Im_0(n, M)|^2 \times \sum_m \ln(|Im_{it}(n, m)|^2) \right) , \quad (13)$$

$$B = H'(it) = \frac{2}{ME_{Im}} \times \operatorname{imag} \left(\frac{\sum_n \operatorname{imag}(Im_{it}(n, M)) \times \sum_m e^{2j\pi it \frac{n}{N}} \times \ln(|Im_{it}(n, m)|^2) \times \overline{Im_{it}(n, m)}}{\sum_m e^{2j\pi it \frac{n}{N}} \times \ln(|Im_{it}(n, m)|^2) \times \overline{Im_{it}(n, m)}} \right) , \quad (14)$$

式中, $\operatorname{real}()$ 是取实数的函数, $\operatorname{imag}()$ 是取虚数的函数, $\overline{Im_{it}}$ 表示 Im_{it} 的共轭。

在不以图像质量变化为迭代判断标准的前提下, PGA 一般都会设置 10 次左右的迭代, 并在迭代结束后使用图像质量最好的那次迭代作为 PGA 的迭代结果, 然后进入 MEA 的迭代循环中。图 4 展示了基于 PGA 与 MEA 联合相位校正的月球成像全流程。

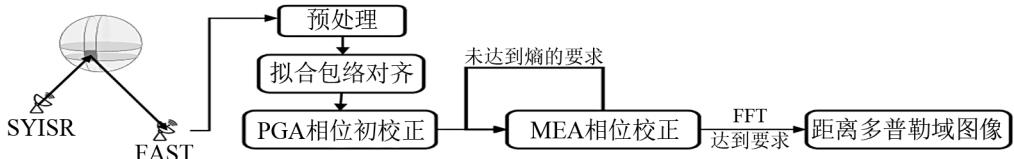


图 4 SYISR-FAST 成像流程

4 结果展示

相位校正分别使用 PGA、MEA、PGA-MEA 三种方法进行成像对比。在相位校正前, 三种方法都通过拟合曲线的方式对齐信号的包络项。相位校正的迭代曲线如图 5 所示。可以看到, PGA 曲线贴着 y 轴直线下降, 但是在后续的迭代时, PGA 的熵就无法继续下降, 相位优化出现瓶颈。MEA 在 2000 多次的迭代中, 熵曲线一直在下降, 但是整体的迭代次数过

多; PGA-MEA 优化了迭代初始时的相位值, 将迭代次数降到 500 次左右。虽然 PGA-MEA 的迭代次数相对于 PGA 仍然很多, 但是也有效地继续降低了图像熵, 使图像更加聚焦。

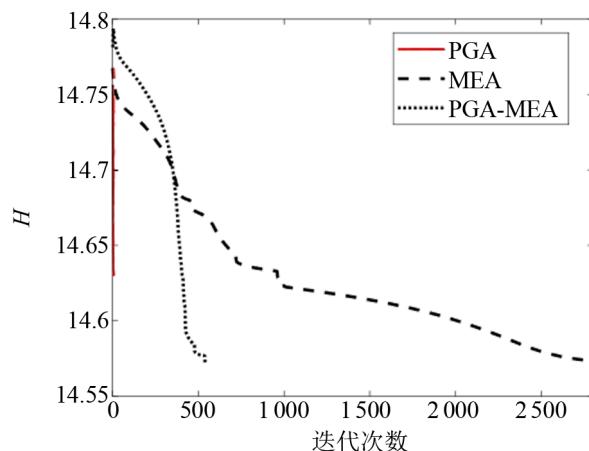
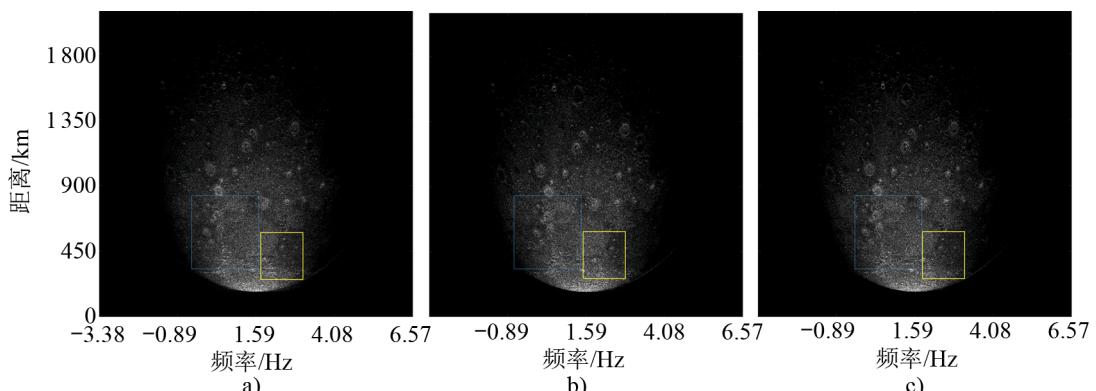


图 5 熵迭代变化曲线

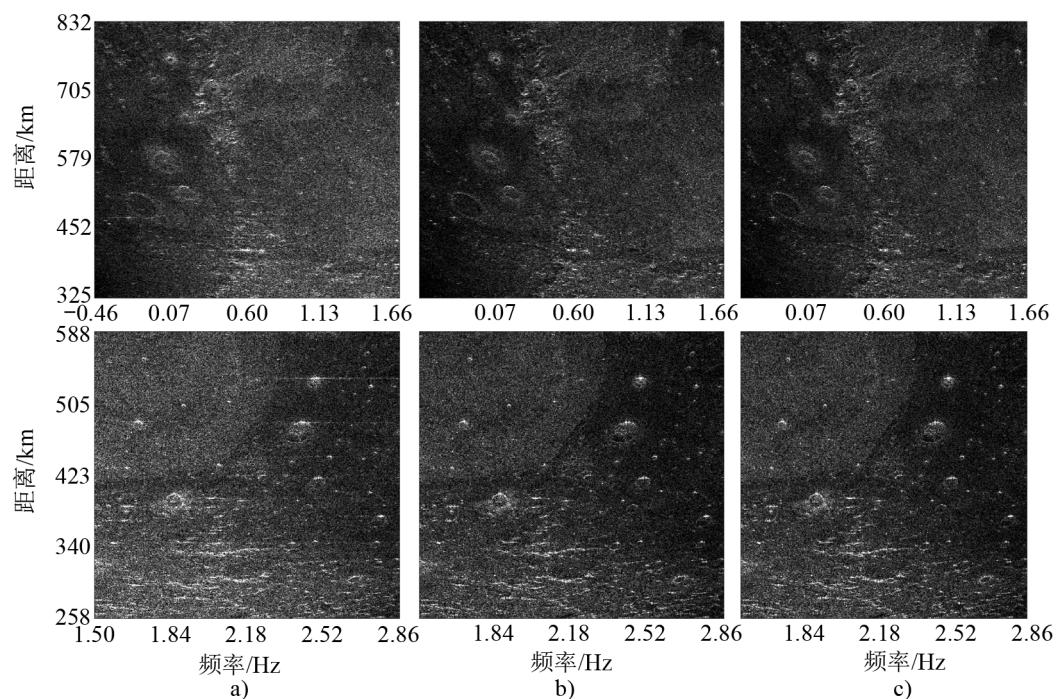
图 6 是三种方法得到的成像结果, 由于图 6 中三幅图像区别不大, 将图中的蓝色和黄色区域放大得到图 7。在图 7 的细节对比中, 基于 PGA 优化的图像散射点仍然有不同程度上的散焦现象; 相对的, 基于 MEA 和 PGA-MEA 优化的图像中, 散射点的散焦现象被很好地抑制住了。这表明基于图像质量的算法确实能够更好地补偿信号的相位误差。结合迭代曲线, 也可以明显看出基于图像质量的相位校正算法的迭代效率会受到初始相位的影响。所以, 在对基于图像质量的相位校正算法进行研究和改进时, 可以先对信号进行初步的相位梯度粗计算, 以提高相位补偿的效率。



注: a) 拟合 +PGA; b) 拟合 +MEA; c) 拟合 +PGA+MEA。

图 6 三种方法成像结果的整体图像

对成像实验的过程和图像结果进行数值化处理, 得到表 2。其中 PGA 迭代时在第 7 次得到最小熵和最大对比度, 之后图像质量重新变差, 所以表中记录为 7。MEA 和 PGA-MEA



注: a) 拟合 +PGA; b) 拟合 +MEA; c) 拟合 +PGA+MEA。

图7 局部区域图像对比图

的熵和对比度都是单调变化的, 所以表中数值是迭代结束时的迭代次数。在熵值中, MEA 和 PGA-MEA 四舍五入后的小数点后四位都相同, 但是在继续精细到后面位数时, 后者的数值更低。相比于熵值的差异, 图像对比度的提升更加明显, 这表明良好的初始相位对提高图像质量具有积极作用。

表2 不同方法的运行时间与图像质量数值化表

方法	拟合 +PGA	拟合 +MEA	拟合 +PGA-MEA
迭代次数	7	2 793	554
运行时间/s	11.833 8	5 129.85	1 070.06
熵值	11.258 3	11.255 5	11.255 5
对比度	2.338 5	2.377 5	2.378 2

5 总结与展望

月球的低分辨率成像能够提供月球表面的基本特征, 高分辨率成像还能进一步地分析表面地形地质结构, 帮助后续的月球研究。本文基于 FAST 与 SYISR 联合观测得到的数据

进行月球成像实验, 结果表明传统雷达成像算法仍适用于月球等天体的成像研究。通过将 PGA 与 MEA 结合实现误差补偿, 成像结果的直观对比与定量分析都表明, PGA 与 MEA 相结合的成像方法兼具两者优点并有效弥补了其局限性, 即在提升 PGA 图像质量的同时, 还将 MEA 的成像时间缩短了 4/5。尽管目前成像实验只是低分辨率的月球数据, 没有再进一步地测试高分辨率数据的成像效果, 但是多种算法相结合的月球成像方法也能够为后续月球高分辨率成像研究提供有益参考。

目前, FAST 已经与其他雷达执行了新的月球区域探测任务, 并取得了理论上能达到 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 分辨率的月球回波数据。而国内的相关研究人员正在对该数据进行分析和处理, 使这些数据能够生成清晰的雷达图像。未来, 随着对月球等地外天体的研究需求日益增长, 发展更高分辨率和成像清晰度的远距离雷达成像技术日趋关键。

致谢

本文中的月球数据来自 FAST 和 SYISR 的联合观测。感谢中国科学院国家天文台、中国科学院航天信息研究所和中国科学院地质与地球物理研究所的数据和技术支持, 以及贵州大学公共大数据国家重点实验室的计算支持。

参考文献:

- [1] Mofenson J. Electronics, 1946, 19: 92
- [2] Thompson T. The Moon and the Planets, 1979, 20: 179
- [3] Vierinen J, Tveito T, Gustavsson B, et al. Icarus, 2017, 297: 179
- [4] Xu J, Ding C, Su Y, et al. Remote Sensing, 2024, 16: 3484
- [5] Jiang P, Yue Y, Gan H, et al. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62: 1
- [6] Jiang P, Tang N Y, Hou L G, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20: 064
- [7] Yin Y, Sun J, Huang L, et al. Remote Sensing, 2023, 15: 4045
- [8] Reigber A, Scheiber R, Jager M, et al. Proceedings of the IEEE, 2012, 101: 759
- [9] Long T, Liang Z, Liu Q. Science China: Information Sciences, 2019, 62: 1
- [10] 闫雅琼, 贺志毅. 现代防御技术, 2017, 45: 111
- [11] 莫俊贤, 张月, 陈锦帆, 等. 现代雷达, 2024, 46: 52
- [12] 黄璐, 王洋, 金胜. 无线电工程, 2017, 47: 23
- [13] Wahl D E, Eichel P, Ghiglia D, et al. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 30: 827
- [14] Kragh T J, Kharbouch A A. Proc ASAP Workshop. 2006: 1
- [15] 李志远, 郭嘉逸, 张月婷, 等. 雷达学报, 2022, 11: 83
- [16] 徐刚, 杨磊, 张磊, 等. 电子与信息学报, 2011, 33: 1809
- [17] Li M, Yue X, Ding F, et al. Remote Sensing, 2022, 14: 2048
- [18] 李鸣远, 王永辉, 尹翰林, 等. 地球与行星物理论评, 2021, 52: 450

Application of Combined Phase Correction Technique in Lunar Imaging Based on Bi-SAR

YU Kaibin¹, LI Minghui¹, ZHAO Rongkun¹, YIN Yan^{2,3,4}, NIU Xianghua^{5,6},
SUN Jinghai^{5,6}, HUANG Lijia^{2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Public Big Data, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. Key Laboratory of Target Cognition and Application Technology, Beijing 100190, China; 4. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 6. Guizhou Radio Astronomy Observatory, Guiyang 550025, China)

Abstract: With the development of planetary imaging research using radar astronomy technology, researchers have conducted related research on lunar radar imaging utilizing. This article is based on a dual ground-based radar system consisting of Sanya Incoherent Scatter Radar (SYISR) and FAST, using envelope alignment and phase correction methods to rectify the errors in radar echoes caused by relative motion between the moon and the ground. Due to the high sensitivity of the FAST and a high signal-to-noise ratio of radar echoes, envelope alignment can basically meet the requirements using only curve fitting techniques. In terms of phase correction, in order to improve accuracy and reduce time consumption, this paper proposes a method that combines phase gradient autofocus algorithm with minimum entropy autofocus algorithm. Through experiments, it has been proven that the contrast of lunar images corrected by this method is improved, and the entropy values of the images are reduced.

Key words: Lunar radar imaging; dual base radar; phase gradient autofocus (PGA); minimum entropy autofocus (MEA)