

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.02

近地小行星地基雷达探测研究现状

张 翔^{1,2}, 季江徽^{1,3}

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 行星科学重点实验室, 南京 210008)

摘要: 地基雷达探测是研究太阳系中小行星的重要方法。雷达探测主要有两种方式: (1) 连续波探测, 可得到小行星表面的粗糙度等参数; (2) 延迟多普勒探测, 用于反演小行星的三维形状模型并确定自转轴状态。与其他探测方法相比, 雷达观测具有分辨率高等优势。简要介绍了地基雷达探测的原理和方式, 以及通过雷达成像建立小行星形状模型的方法。同时举例说明了雷达探测小行星的成果, 并对包括雷达在内的多种探测方法进行了比较。

关键词: 小行星; 地基雷达探测; 延迟多普勒图像; 形状模型

中图分类号: P165, P185.7

文献标识码: A

1 引 言

太阳系中存在着大量的小行星, 按照轨道半长径可分成近地小行星、主带小行星、特洛伊小行星、海王星外天体等。其中近地小行星由于靠近地球轨道, 对其开展监测与研究显得尤为重要。近地小行星可分为四类: 阿波希利型 (Apohele, 又称 Atiras), 阿登型 (Aten), 阿波罗型 (Apollo) 和阿莫尔型 (Amor)。这些小天体的轨道与地球轨道接近或相交, 是地球与人类安全的主要威胁。开展近地小行星研究, 不仅可以深入了解他们在早期太阳系中的起源和形成演化规律, 亦为将来采取有效的措施来规避潜在威胁提供关键的科学依据, 具有现实意义。

近地小行星探测手段主要有近距离空间探测器探测 (如飞越探测、附着探测、伴飞探测与采样返回探测等)、空间望远镜探测、地基望远镜探测等。在获取小行星三维形状模型方面, 主要是通过地基光学与雷达探测来实现。通过地面光学观测得到小行星光变曲线, 进而可以反演其形状。但光变曲线只能给出小行星的总光度, 不涉及小行星表面的小尺度结构,

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-10-22

资助项目: 国家自然科学基金 (11273068, 10973044, 10933004); 中国科学院新兴与交叉学科布局试点项目 (KJZD-EW-Z001); 江苏省自然科学基金 (BK2009341); 中国科学院天文财政专项; 紫金山天文台小行星基金

通讯作者: 季江徽, jijh@pmo.ac.cn

反演出的模型也只是小行星的大概形状; 而且对小行星进行地面测光, 考虑到近地小行星尺度一般较小, 亮度也较低, 测光的精度有限。与此同时, 地基雷达观测能得到有一定空间分辨率的解析图像, 反演出更精确的模型。因而地基雷达观测是研究近地小行星的重要方法。地基雷达主要由两个工作部分组成: 大口径天线和发射/接收系统^[1]。研究者通过对小行星发射雷达波, 并测量回波的时延和多普勒频移, 可以得到小行星表面各部分的距离和视向速度, 进而实现对小行星成像。

地基雷达探测小行星已有几十年的历史。1968 年, 美国航空航天局的 Goldstone 和 Haystack 对小行星 (1566) Icarus 进行了观测^[2, 3], 这是地基雷达探测小行星的开端。在这次观测中他们得到 Icarus 的半径为 490 m, 表面赤道区域粗糙度低于高纬度区域。但直到 20 世纪 70 年代末, 总共只探测到 6 颗小行星的雷达数据^[4]。雷达观测的大规模应用始于 20 世纪 80 年代: Yeomans 等人证明了雷达观测可以很大程度上提高小行星的轨道计算精度, 尤其是对于新发现的小行星, 雷达数据往往决定了小行星再次飞越地球时能否被找到^[5]; Ostro 等人则利用雷达数据建立了一些粗糙的小行星模型, 如 (433) Eros^[6]。1993 年, Hudson 提出了一种由雷达观测数据反演小行星形状模型的方法^[7], 该方法经 Magri 等人改进后^[8], 形成了较为完善的 SHAPE 程序, 是雷达反演建立小行星形状模型的通用方法。此后雷达观测被广泛用于提高小行星的轨道精度以及探索其表面性质和建立形状模型等。截止到 2013 年 5 月 20 日, 地基雷达已经对 522 个太阳系小天体进行过观测, 包括 133 颗主带小行星, 373 颗近地小行星, 以及 16 颗彗星, 其中 20 多颗小行星已有雷达观测反演出的形状模型^[9]。

本文对地基雷达探测小行星的原理及建模的方法作了简要介绍。第 2 章简述雷达观测的主要设备, 并列出了两个主要雷达观测站; 第 3 章说明雷达观测的原理和 2 种不同的探测方式; 第 4 章介绍通用的建模方法; 第 5 章列表给出了雷达方法建立的小行星形状模型, 并描述雷达观测的部分成果; 第 6 章则对雷达与其他观测方法进行了比较。

2 观测设备

地基雷达站主要包括两种设备: 产生雷达信号的发射机, 和发射并接收雷达波的大口径天线。由于大口径天线常被用于射电观测, 不少雷达站同时也是射电天文台 (如 Arecibo)。

目前 Arecibo 与 Goldstone 地基雷达开展了对小行星的雷达探测, 其主要参数见表 1。

表 1 主要地基雷达探测系统参数

名称	天线口径/m	工作波段	工作频率/MHz	发射功率/kW
Arecibo	305	S	2380	1000
Goldstone (DSS 14)	70	X	8560	500

由于天线口径的影响, 对同样大小的小行星, Goldstone 的可探测距离不及 Arecibo 的一半。但 Arecibo 的天线是固定的, 而 Goldstone 作为美国深空探测网 (Deep Space Network, DSN) 的组成部分其天线可以旋转, 故而 Goldstone 可探测的天区 (赤纬 $-35^{\circ} \sim +90^{\circ}$) 比

Arecibo 的 (赤纬 $-2^\circ \sim +38^\circ$) 要广^[10]。

3 雷达观测的原理和方式

雷达观测小行星,就是通过天线向小行星发射一定频率的电磁波并接收其回波。小行星与地球的距离导致回波与发射波之间有一定时延;小行星相对地球的运动以及小行星的自转,能在回波上产生多普勒效应,表现为频率的变化。测量时延 τ 和频率变化量 ν ,可以得到小行星表面各部分相对雷达站的距离 D 及视向速度 V 。雷达工作过程可用“发射/接收周期”为单位划分。每个周期的前半部分是发射过程,持续时间约为雷达信号在地球和小行星之间来回所需的时间;后半部分为接收过程,持续时间与发射过程相同^[10]。

根据发射天线和接收天线是否为同一天线,雷达系统分为单站和双站等。单站雷达由同一天线承担发射和接收工作;双站雷达则由一个天线发射信号后,另一天线接收,且发射和接收天线之间要有一定距离。

对单站雷达,其接收到的能量与发射出去的能量之间的关系为^[1]:

$$P_{\text{rcv}} = P_{\text{tx}} G_{\text{ant}}^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 R^4, \quad (1)$$

其中, λ 为波长, P_{rcv} 为接收到回波的功率, P_{tx} 为发射波的功率, $G_{\text{ant}} = 4\pi/\lambda^2 A_{\text{eff}}$, A_{eff} 为天线的有效面积, R 为小行星到雷达的距离。 σ 被称作小行星的雷达截面,定义为 4π 乘以小行星接收到每单位流量发射波后产生的单位球面度的反射功率。如果在小行星的所在位置放置一个能完全反射雷达波的金属球,且用雷达探测此金属球时得到的回波功率与原小行星相等,则此金属球的投影面积为 σ 。

因为雷达接收到的信号强度与小行星距雷达站距离的 4 次方成反比,雷达探测小行星受距离的限制比较严重(见图 1)。

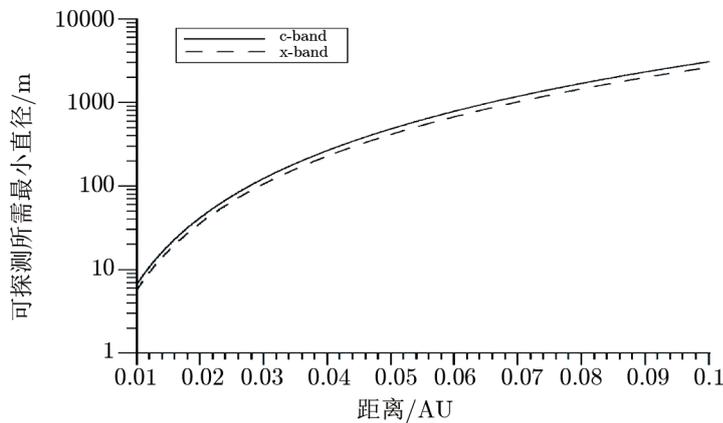


图 1 近地小行星与雷达站之间的距离和可探测所需最小直径的关系^[11]
雷达站为意大利 Sardinia 射电天文台,天线口径为 64 m。

根据发射出的电磁波形式的不同, 雷达对小行星的探测分为两种: 连续波探测和延迟多普勒探测。

3.1 连续波探测

在连续波探测中, 雷达对目标小天体发射未经调制的单频偏振电磁波, 并测量不同偏振情况下的回波信号强度等。小行星表面反射雷达波, 其反射率与表层物质的密度相关; 而反射波的偏振情况又与波长同尺度的表层结构相关。因此, 通过雷达探测可以得到小行星的表面性质^[12]。现在常用的是圆偏振的连续波, 其回波能量在偏振方向上存在一定分布(见图2)。

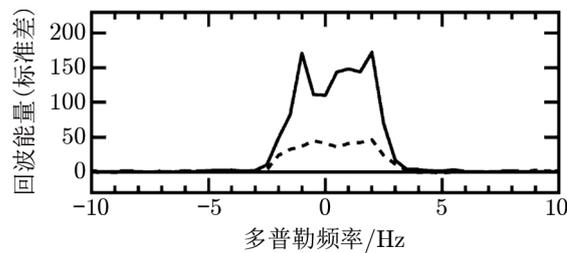


图2 Goldstone 对 2005 CR37 进行连续波观测得到的雷达回波能量随频率的分布^[14]
图中实线为 OC 部分, 虚线为 SC 部分, 其中 $\mu_C = 0.3$ 。

这种能量分布常用圆偏振比 μ_C 来衡量^[1]:

$$\mu_C = \sigma_{SC} / \sigma_{OC} \quad (2)$$

其中, “SC” 代表回波偏振方向与发射波相同, “OC” 代表回波偏振方向与发射波相反。圆偏振波在镜面正反射中偏振方向会反向, 所以雷达截面中 “OC” 部分主要代表单次反射, 小行星表面曲率远大于雷达波长; 而 “SC” 部分则代表多次反射, 以及小行星表面存在的与雷达波长尺度相同的结构(如岩石)。所以 μ_C 是衡量小行星表面粗糙程度的量, μ_C 越大则表面越粗糙。如果目标天体表面绝对光滑, 则 $\mu_C = 0$ 。对于近地小行星, μ_C 平均值为 0.28^[13](见图3)。

3.2 延迟多普勒探测

雷达还可以对小行星做延迟多普勒成图观测。对发射波进行调制(常见的做法是用二进制伪随机代码对发射波调相^[16]), 接收回波可以同时得到回波的时延和多普勒位移, 生成小行星的图像(即延迟多普勒图像, 见图4), 进而得到小行星的自转、形状等^[17]。

延迟多普勒图像是一种二维位图, 两个维度分别为回波时延和回波的多普勒位移。图像的每个像元代表一定时延和一定多普勒位移范围, 对应小行星表面的一小部分甚至多个部分区域; 像元的亮度代表这些区域的雷达截面之和。

对小行星表面某个面元, 其回波时延代表面元距雷达站距离; 多普勒位移代表面元相对雷达站的视向速度。因而面元的多普勒位移 ν 与小行星自转轴 \mathbf{W}_{app} 、面元相对小行星质心的位移 \mathbf{r} 和质心相对雷达站的位移 \mathbf{e} 有关^[19]:

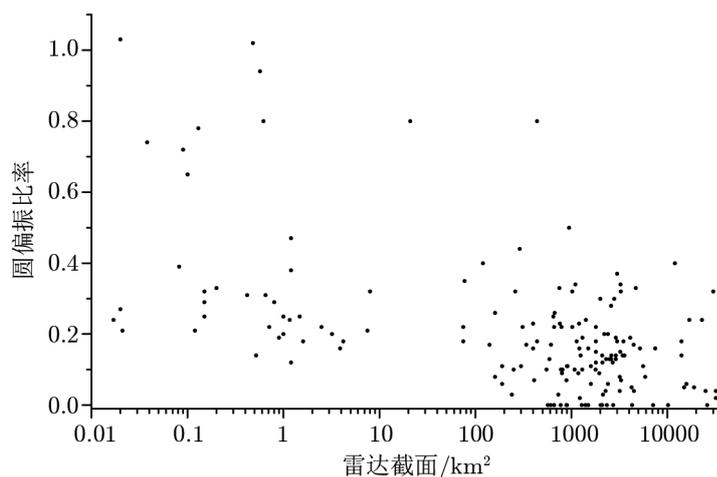


图 3 小行星圆偏振比率相对雷达截面的分布^[15]
数据来自 Asteroid Radar Research 网站。

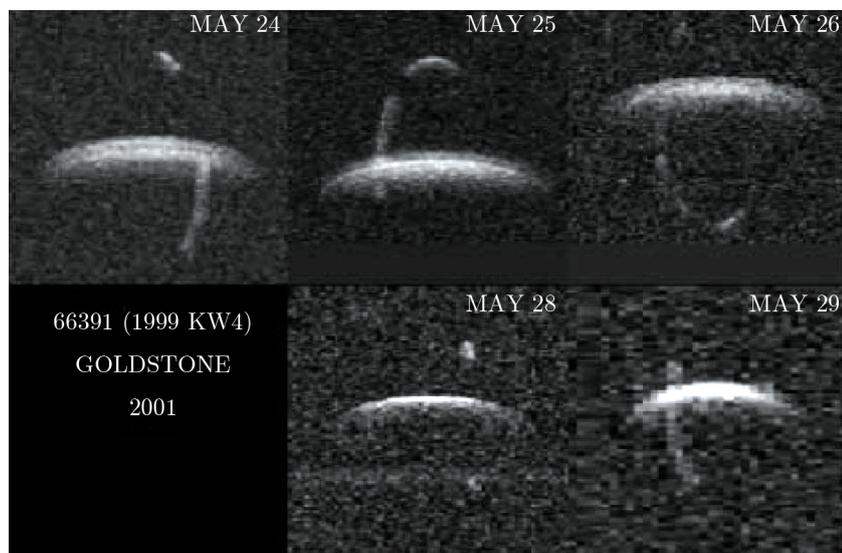


图 4 Goldstone 对 1999 KW4 的延迟多普勒观测图像^[18]
每张图像为一天中所得多个图像的叠加。图中时延从上往下增加，多普勒频率向右增大。

$$\nu = (\mathbf{W}_{\text{app}} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{e} / (\lambda/2) \quad (3)$$

由此可见，对于一个自转的小行星，若作垂直于 \mathbf{e} 的截面，则截面上各点的时延相同；若作平行于 \mathbf{e} 和 \mathbf{W}_{app} 的截面，则截面上各点的多普勒位移相同。所以延迟多普勒图像的像元对应着 4 个平面在小天体上截得的表面。如果这些表面不止一个，且有多于一个能接收并反射雷达波（即在小行星对雷达站的“正面”），那么像元就会对应小天体表面的多个不相连的区域，

出现延迟多普勒观测的“南北模糊”问题^[19](见图 5)。为了减轻南北模糊在形状反演中的影响, 需要有小行星各个角度的雷达观测数据^[20, 21]。

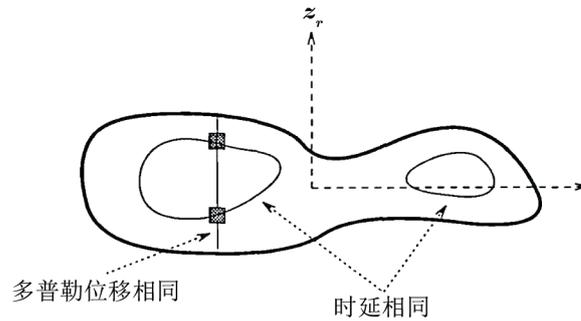


图 5 “南北模糊”问题示意图^[7]

图中展示从雷达站观测小行星的情况。 z_r 为小行星的自转轴方向, 雷达方向垂直于纸面向外。图中等值线上的各点距雷达站的距离相同(时延相同), 平行于 z_r 的直线上各点视向速度相同(多普勒位移相同)。因而图中两个黑色区域会对应延迟多普勒图像上的同一像元。

4 雷达观测建立小行星模型的方法

通过上述探测方法, 我们可以得到小行星的诸多性质, 如形状和自转状况等。

4.1 形状模型

早在 20 世纪 70 年代, Ostro 等人就已开始利用雷达探测数据反演小行星的形状模型^[6]。但当时得到的模型较为简单, 有时只能给出小行星的大小尺度。1993 年 Hudson 等人建立了从延迟多普勒图像推演小行星形状模型的方法^[7], 经 Magri 等人完善后^[8], 现在成为利用雷达探测建立小行星形状模型的主要方法。这种方法的基本思路如下: 先建立一个粗糙的初始模型, 由此模型生成仿真的延迟多普勒图像; 然后将仿真图像与观测得到的真实图像比较, 同时修改模型, 使仿真图像尽可能接近真实图像; 当两者差别小于一定范围时, 认为模型是可靠的。

将形状模型和延迟多普勒图像联系起来的是描述雷达波在小行星表面反射情况的散射公式。散射公式的常用形式为^[7]:

$$d\sigma = \sigma_0(i)dS \quad , \quad (4)$$

$$\sigma_0(i) = \rho \cos^n i \quad , \quad (5)$$

其中 $d\sigma$ 为面元 dS 对应的雷达截面, i 为雷达波的入射角。 ρ 的数值与表面物质的反射率有关; 而 n 则表现了反射介于镜面反射和漫反射之间的程度, n 越大, 反射越接近镜面反射(随着 i 变大, $\sigma_0(i)$ 迅速接近 0)。

仿真图像和观测图像的比较通过约束最小二乘法进行。为了避免形成数学上可行而物理

上不可能的模型 (例如形同刺猬的小行星), 需要加入补偿函数 $\gamma_i(\mathbf{x})$:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \chi^2(\mathbf{x}) + \sum \beta_i \gamma_i(\mathbf{x}) . \quad (6)$$

其中 \mathbf{x} 为自由变量 (如小行星自转轴的指向、自转周期, 描述小行星形状的球谐函数系数等), 也就是建立模型需要求得的量; $\Phi(\mathbf{x})$ 为需要最小化的目标函数, $\gamma_i(\mathbf{x})$ 为补偿函数, β_i 为补偿函数的权重; $\chi^2(\mathbf{x})$ 为仿真图像和观测图像的像元加权残差平方和^[19]。

建立初始模型时, 一般会选择三轴椭球体模型。此时的自由变量 \mathbf{x} 包括 3 个轴的长度、在任一时刻小行星旋转的相位、反射率、自转轴的指向和自转周期等。自由变量的初始值可以直接从延迟多普勒图像中估计, 也可以选取多个初始值拟合, 寻找最小的目标函数。为了生成延迟多普勒图像, 模型实际上用多面体描述。比如用数百甚至上千个点将椭球体表面分成小三角形, 再计算每个小三角形对延迟多普勒图像的贡献。

确定三轴椭球体后, 第二步是生成球谐函数模型。球谐函数模型使用 8 阶球谐函数表现小行星表面的起伏, 拟合 81 个系数 a_{lm} 、 b_{lm} :

$$r(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^N [a_{l0} P_l^0(\cos \theta) + \sum_{m=1}^l (a_{lm} \cos(m\phi) + b_{lm} \sin(m\phi)) P_l^m(\cos \theta)] , \quad (7)$$

$r(\theta, \phi)$ 为表面某点相对模型中心位移的球坐标函数。球谐函数模型也一样用多面体描述。最后生成多面体模型, 逐个调整多面体各点相对球谐函数模型表面的距离即可。

4.2 自转轴指向及自转周期

考虑到 Yarkovsky 和 YORP 效应, 小行星的自转情况对小行星的动力学演化有重要影响, 因而也是雷达探测的重要科学目标。

如前文所述, 自转轴指向及自转周期被视作自由参数, 和其他参数一起在形状模型中拟合。由于自转轴参数的误差会导致仿真图像和观测图像相差很远, 许多时候研究者会将其他方法 (最常见的是光变曲线法) 得到的自转轴参数作为初始值, 在此基础上进行小范围的微调。对于光学观测数据不足的小行星, 可以从延迟多普勒图像上估计自转轴参数的大概范围, 然后用栅格搜索法确定相对小的可能区域, 最后在此区域中拟合自转轴参数^[22]。

2010 年 Busch 等人提出了一种使用多个雷达确定小行星自转周期的方法^[23]。小行星反射雷达波, 在分钟的时间量级上, 回波强度变化缓慢, 与目标天体的大小、形状、自转轴指向、雷达散射参数等有关; 在秒的量级上, 回波强度存在随机变化, 即雷达斑点图样^[24, 25]。随着小行星自转, 回波图样在多个测站之间扫过, 据此可以得出小行星自转的状况。

5 小行星的雷达探测成果

小行星的形状模型对其轨道预报和形成演化分析有重要作用。对于雷达探测到的直径小于 2 km 的小行星, 其轨道预报的最大干扰因素来自 Yarkovsky 效应^[26] (小行星热辐射不均匀产生力的作用, 使小行星偏离原轨道); 尤其当小行星轨道接近大行星时, Yarkovsky 效

应在 10^2 a 的时标范围内能让小行星严重偏离轨道预报位置, 量级达到 10^6 km^[27-29]。另外, 小行星的形状能反映其轨道演化的过程。会改变小行星自转状况的 YORP 效应 (一种二阶 Yarkovsky 效应, 小行星热辐射不均匀产生力矩, 影响小行星自转), 与小行星的形状、轨道、自转状况都有关^[30]。对于一些形状不规则、体积较小、轨道靠近太阳的小行星, YORP 效应能使其高速自转, 导致小行星形状变化。当时标超过 10^5 a 时, YORP 效应甚至能撕裂小行星^[31, 32]。

目前有 20 多个小行星通过雷达观测建立了形状模型, 见表 2。另外雷达探测发现了不少双小行星。在已发现的 32 颗近地双小行星中, 有 19 颗是通过雷达方法发现的 (另外 13 颗则是用光变曲线方法发现的)。雷达观测建立的形状模型, 可以给出小行星形成演化的线索。下面给出 3 个例子: (4179) Toutatis、1999 KW4 和 (4486) Mithra。

表 2 雷达观测建立的小行星模型

名称	轨道	光谱型	雷达反照率	SC/OC	模型大小/km	参考文献
(7) Iris	Main-belt	S	0.18	0.19	253 × 228 × 193	[33]
(129) Antigone	Main-belt	M	0.33	0.14	152 × 109 × 95	[38]
(216) Kleopatra ³	Main-belt	M	0.7	0.00	217 × 94 × 81	[35]
(1580) Betulia	Amor	C	0.13	0.20	6.59 × 5.85 × 4.19	[8]
(1620) Geographos	Apollo	S	0.13	0.22	5.0 × 2.0 × 2.1	[36]
(2063) Bacchus ³	Apollo	Q	0.33	0.21	1.11 × 0.53 × 0.50	[37]
(2100) Ra-Shalom	Aten	C	0.36	0.25	2.8 × 2.4 × 1.8	[38]
(4179) Toutatis ³	Apollo	S	0.24	0.29	4.5 × 2.4 × 1.9	[39]
(4486) Mithra ³	Apollo	S	0.17	0.31	2.35 × 1.65 × 1.44	[21]
(4660) Nereus	Apollo	X	0.44	0.74	0.51 × 0.33 × 0.24	[22]
(4769) Castalia ³	Apollo	S	0.12	0.32	1.6 × 1.0 × 0.7	[40]
(6489) Golevka	Apollo	Q	0.18	0.23	0.68 × 0.57 × 0.49	[41]
1996 HW1 ³	Amor	S	0.15	0.37	3.78 × 1.64 × 1.49	[42]
1992 SK	Apollo	S	0.11	0.34	1.39 × 0.90 × 0.91	[43]
(25143) Itokawa	Apollo	S	0.16	0.26	0.548 × 0.312 × 0.276	[17]
1950 DA	Apollo	E/M	0.35	0.45	1.19 × 1.28 × 1.24	[20]
1998 WT24	Aten	E	0.42	0.97	0.470 × 0.425 × 0.400	[44]
1998 ML14	Apollo	S	0.12	0.35	1.1 × 0.99 × 0.94	[45]
(54509) YORP	Apollo	—	—	—	0.150 × 0.128 × 0.193	[46]
1999 KW4 ¹	Aten	S	—	0.45	1.532 × 1.495 × 1.347	[18]
1999 RQ36	Apollo	—	0.13	0.18	0.493	[47]
1994 CC ²	Apollo	S	0.14	0.40	0.69 × 0.67 × 0.64	[48]
1998 KY26	Apollo	C/D/P	0.01	0.50	0.026	[53]
2002 CE26 ¹	Apollo	C	0.24	0.21	3.65 × 3.65 × 3.26	[50]
2008 EV5	Aten	C/X	0.29	0.37	0.42 × 0.41 × 0.39	[51]

注: 名称的上标代表小行星模型的特殊结构: 1 为双小行星, 2 为三合小行星, 3 为分叉结构。雷达反照率定义为小行星雷达截面与其几何截面之比。本列表不包括 20 世纪七八十年代做出的粗糙模型。

5.1 (4179) Toutatis

(4179) Toutatis 曾多次成为雷达探测的目标。它每 4 年飞越地球 1 次, 而从 1992 年到 2012 年, 每次飞越都有观测数据^[52-54]。1995 年 Hudson 和 Ostro 给出了 Toutatis 的形状模型 (1600 个顶点, 分辨率 84 m)^[39]; 到 2003 年, Hudson 等人给出了另一个精度更高的模型 (20 000 个顶点, 分辨率 34 m)^[55] (见图 6)。

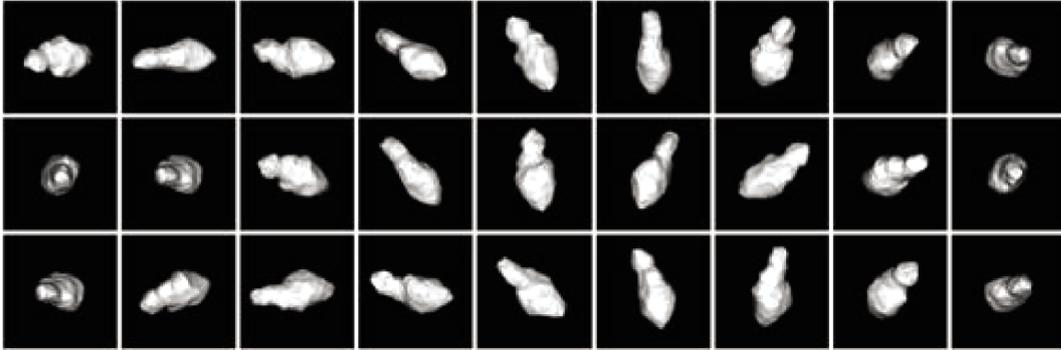


图 6 Toutatis 的形状模型和自转情况^[55]
垂直纸面向里为小行星方向, 图像大小为 6×6 km。

Toutatis 的模型存在分支结构, 即两个“瓣”, 大小分别为 4.6 km 和 2.4 km。形成分支结构的原因可能是双小行星的合并, 也有可能是外来的一次或多次撞击等^[52]。Busch 等人计算了 Toutatis 的转动惯量, 认为 Toutatis 的内部不是均匀的, 其密度沿长轴分布存在较大变化。他们提出了两种模型: Toutatis 的两个瓣密度不同, 或者两个瓣各有一个密度较大的核^[54]; 两种模型都符合双小行星合并的假说。但由于密度的不均匀还可能由其他原因导致——如浮土层^[57]等, Toutatis 的分支结构形成原因仍不能确定。

Toutatis 的另一个重要特点是其自转轴与惯性主轴并不重合^[39], 自转也由两种周期运动组成: 绕长轴的周期为 5.38 d 的自转和长轴自身周期为 7.38 d 的进动。这种自转可能是撞击的结果, 也可能是其他原因, 比如 YORP 效应改变自转状态导致的^[58]。2012 年 12 月, 我国的嫦娥二号卫星近距离飞越 Toutatis^[56], 拍摄了多张照片 (见图 7)。比较近距离光学照片与雷达模型, 可看出雷达模型对凹陷部分和小行星长轴两端结构的描绘有明显差异: 雷达模型中部的凹陷过于平缓, 而两端又过于尖锐。Howell 等人认为这些差异来自初始模型的选取: 由光学照片可知, Toutatis 是一颗中部有明显凹陷而两端体积较大的小行星; 雷达反演过程中采用的初始模型为三轴椭球体, 与 Toutatis 的实际形状相比, 具有表面平缓的中部和较为尖锐的两端, 这一趋势对雷达模型最终结果产生了影响^[59]。利用光学图像, 或可对雷达模型作进一步的修正。

5.2 1999 KW4

1999 KW4 的特殊之处在于它是个双小行星。Ostro 等人建立了其主星和次星的模型^[18] (见图 8)。主星的等效直径为 1.32 km, 密度为 $1.97 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 自转周期为 2.76 h; 次星等效直径为 0.45 km, 密度为 $2.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 自转周期约为 17 h。由模型可以看出, 主星的赤道区

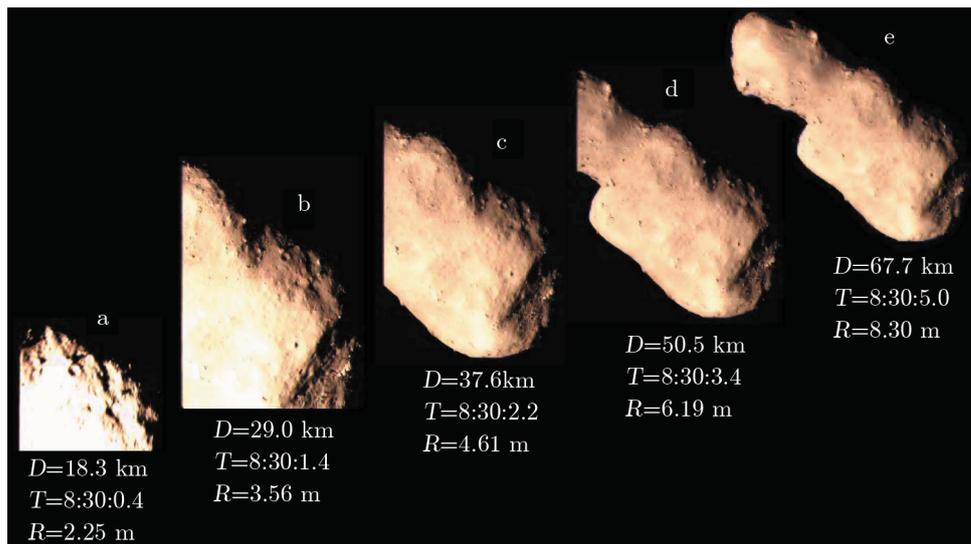


图 7 Toutatis 的照片^[56]

嫦娥二号探测器于 2012 年 12 月 13 日拍摄。

域存在明显的凸起。根据主星的密度、自转周期等可计算出赤道区域应该是主星表面“有效势”(考虑“离心力”的影响)较低的地方,物质会向赤道方向聚集,这可能是凸起形成的原因。而凸起的存在,又导致赤道区域的“有效势”分布发生变化。在赤道区域的某些位置上,主星的引力与“离心力”达到平衡,表面物质处在一种临界状态——如果主星的自转加快,这些物质就会被抛出^[18]。与主星相比,次星的密度较大而自转较慢,物质结构更加紧密。

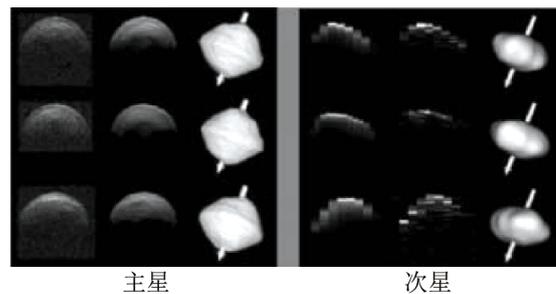


图 8 1999 KW4 的模型^[18], 包括主星和次星

图像每行由 6 个方形组成,其中主星区域的方形边长为 2 km,次星区域的方形边长为 0.8 km。

目前有两种假说来解释 1999 KW4 双小行星的形成:一种理论认为主星由于 YORP 效应自转加速,抛出的物质吸积形成了次星^[60];还有人认为 1999 KW4 可能是过去在飞越某颗大行星时,被潮汐作用撕裂的^[18]。1999 KW4 的轨道有较大的偏心率,穿越多个大行星轨道(近日点在水星轨道之内,远日点在地球近日点之外);另外根据轨道计算,在 10^4 a 的时标范围,1999 KW4 受到大行星的摄动,轨道偏心率和轨道倾角都有较大变化^[61]。

5.3 (4486) Mithra

Brozovic 等人在 2000 年利用 Arecibo 和 Goldstone 对 (4486) Mithra 进行观测, 进而建立了它的形状模型^[21] (见图 9)。但是当时缺乏 Mithra 的光变曲线资料, 未能确定其自转轴指向。故而 Brozovic 等人建立了 2 个可能的模型: 顺行模型 (自转轴指向 $\lambda = 337^\circ$, $\beta = 19^\circ$) 和逆行模型 ($\lambda = 154^\circ$, $\beta = -19^\circ$)。两个模型形状、大小相似, 自转周期均为 67.5 h。

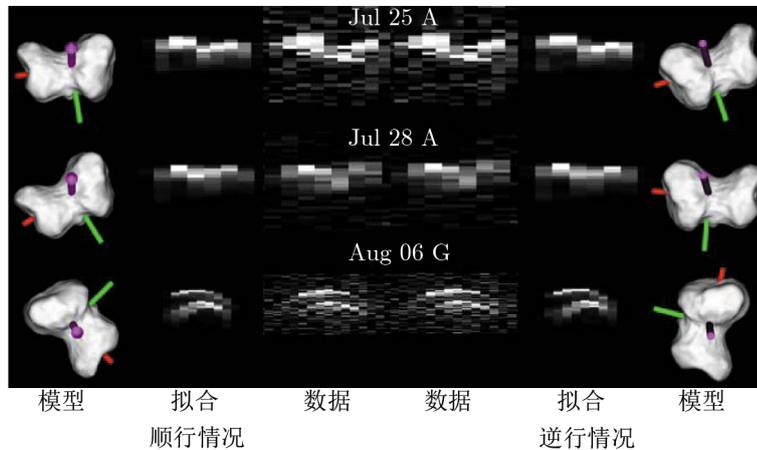


图 9 (4486) Mithra 的形状模型及观测图像^[21]

观测时间旁边的字母代表观测台站, “A” 为 Arecibo, “G” 为 Goldstone。图中左半部分为顺行情况, 右半部分为逆行情况。对于形状模型, 测站方向垂直纸面向外。

Mithra 的形状也存在分支结构, 这可能是双小行星低速相撞形成的^[62, 63], 也有可能源于飞越大行星时产生的潮汐效应^[64, 65]。Mithra 现在的自转速度较低, 受 YORP 效应影响, 其自转正在加快, 最终 Mithra 可能撕裂成双小行星^[21]。

6 雷达反演建立小行星模型与其他方法的比较

对小行星进行形状建模, 除了利用雷达成像之外, 另一个常用方法是使用光变曲线做形状反演。光变曲线记录了小天体总光度随时间的变化。小行星的总光度变化, 一部分来自自转, 另一部分来自小行星相对太阳和测站的位置变化。通过长期观测积累多条光变曲线后, 可以拟合小行星的三维形状^[66, 67]。

但光变曲线反演方法和雷达反演有很大的差异:

(1) 雷达反演出的模型, 表面常常存在凹陷结构; 而光变曲线反演的模型一般是小行星的凸包结构。这是因为: 1) 小行星表面的凹陷结构在太阳相角不大时, 对光度的影响较小; 2) 小行星表面对阳光的散射模型往往不精确^[68]。两者共同导致小行星光度中由表面凹陷结构贡献的部分常常湮没在噪声里。不过光变曲线还是能反演出非凸的模型, 但一般为球谐函数模型, 准确度不高^[67]。

(2) 小行星的自转状况 (周期、自转轴指向) 大都由光变曲线方法得到。有如下原因: 1) 观测时间跨度。对小行星做雷达观测, 一般是在几天内获得几十张图像; 而光变曲线既可以在小行星的数次出现中得到的数据点密集的曲线, 也可以是连续几年观测的结果, 每条光变曲线上仅有比较稀疏的数据点。因此光变曲线的观测在时间上的跨度往往比雷达观测要大, 而较大的时间跨度有利于确定小行星的自转周期。2) 雷达观测存在自转轴指向模糊问题。对小行星进行雷达反演, 有时会得到多个对称的形状模型, 对应几个不同的自转轴指向, 因而仅用雷达观测数据寻找正确的自转轴指向是比较困难的。事实上, 雷达反演模型一般采用光学方法得出的小行星自转数据作为初始值, 在此基础上进行微调。

(3) 雷达反演模型的计算量远大于光变曲线法。首先雷达反演模型的结果对初始值有较大的依赖, 需要反复尝试多个初始值组合; 而光变曲线的初始值选取相对随意一些。另外, 雷达反演过程中仍有很多自由变量待定, 一些变量, 例如补偿函数的权重, 还要靠经验确定。

在这两种方法之外, 还有一些方法能够得到小行星的粗略结构模型 (比如球体、三轴椭球体)。这些方法包括掩星法^[69] (小行星掩恒星, 通过掩星时间得到小行星大小)、热辐射测量^[70]、自适应光学成像^[71]、干涉测量^[72] 等。近年来研究者常把不同的方法联合在一起反演小行星模型。例如 KOALA (Knitted Occultation, Adaptive-optics, and Lightcurve Analysis)^[73, 74] 算法, 主要是光变曲线和自适应光学观测的结合; SHAPE 程序^[7, 8], 是光变曲线和雷达数据联合反演程序。

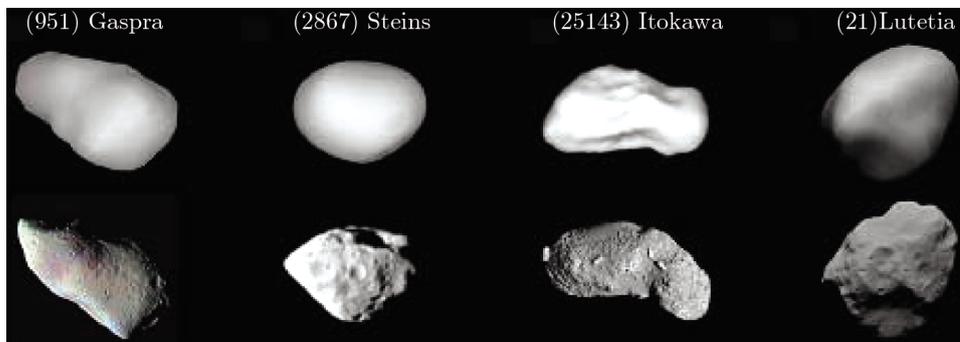


图 10 几种不同方法生成的形状模型与深空探测结果的比较^[75]

(951) Gaspra 的模型由光变曲线生成^[68], 图像来自 NASA 的 Galileo 探测器; (2867) Steins 的模型也由光变曲线生成^[76], 图像来自 ESA 的 Rosetta 探测器; (25143) Itokawa 的模型由雷达数据生成^[77], 图像来自 JAXA 的 Hayabusa 探测器; (21) Lutetia 的模型由 KOALA 方法生成^[78], 图像来自 ESA 的 Rosetta 探测器。

与其他观测方法相比, 雷达探测方法的优点在于: (1) 较高的分辨率, 观测图像能给出小行星的凹陷结构。如 2012 年 Goldstone 对小行星 (4179) Toutatis 的延迟多普勒成像, 空间分辨率为 3.75 m ^[48], 而光学方法 (自适应光学成像) 所能达到的最高观测精度为 $0.01''$ ^[75]。另外自适应光学成像反演小行星形状模型的方法还在起步阶段, 大多数光学方法建立的模型仍是光变曲线模型, 不能反映小行星表面形状细节 (光变曲线模型也没有确定的“分辨率”)。(2) 可以同时获得探测目标的距离、速度等信息。(3) 雷达波具有一定的穿透性, 可以探测表层以下结构。(4) 与光学观测相比, 雷达观测基本不受气象条件影响, 同样无须考虑太阳位置因素

(白天黑夜均可观测,小天体不必被太阳照亮)。

但雷达探测也有其不足之处: (1) 雷达波从地面发射,回波衰减程度与距离的 4 次方相关,因而雷达观测受距离的限制比较严重,雷达建模也主要用于近地小行星; (2) 雷达成像存在南北模糊问题,可能生成错误的结果^[36]; (3) 雷达反演模型过程中,引入了大量的自由参数(例如补偿函数的权重),这些参数的准确性也会影响反演结果。

7 总结和展望

地基雷达探测为小行星研究作出了重要贡献。首先在小行星轨道预报方面,雷达探测提高了轨道预报的精度,例如 1986 JK,有雷达观测参与的轨道预报,其预报位置与真实位置的残差为仅有光学观测结果的千分之一左右^[19]。其次,地基雷达探测是建立小行星形状模型的重要方法。光变曲线法得到的模型大都没有凹陷结构,而 KOALA 算法尚在起步阶段,故而较精确的小行星形状模型大多数是雷达反演生成的(还有一些来自深空探测器的实地观测)。小行星形状模型是讨论小行星形成演化和轨道预报的重要依据,如 1999 KW4 主星赤道区域的凸起,为 Walsh 等人讨论双小行星的自转撕裂提供了实例^[32]。

虽然近年来雷达观测的精度日益提高,取得了大量的研究成果,但许多方面仍有进一步发展的空间。而双站观测和综合孔径观测会成为日后的热点。

双站观测,就是由一个雷达天文台向小行星发射雷达波,而另一个天文台(不一定是雷达天文台,可以是射电天文台)使用大口径天线接收回波的观测方法。理论上,双站观测能够提高空间分辨率并扩大观测的天区范围。在 1995 年对 (6489) Golevka 的观测中,就尝试了双站观测——由 Goldstone 发射信号,而由乌克兰的 Evpatoria 和日本的 Kashima 接收回波^[41]。然而由于设备的原因,此次观测效果并不理想。随着设备精度的提高以及不同测站之间合作的加强,双站观测的可行性应会逐渐增加。

综合孔径观测与双站观测有类似之处。它是由一个雷达天文台向小行星发射雷达波,由天线阵接收回波的观测方法。这种方法除了能提高分辨率之外,还有助于小行星自转情况的确定^[23]。例如 VLBA (Very Long Baseline Array) 参与过 2008 EV5 的观测^[23],利用雷达斑点图样帮助确定了 2008 EV5 的自转轴指向。

无论是双站观测,还是综合孔径观测,都需要多个天文台参与;因此国际合作是未来雷达观测的发展趋势。雷达天文方面我国起步较晚,但设备上不落人后,例如上海天文台已建成 65 m 口径射电望远镜;正在建设的 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST),建成后将是世界上最大的单天线射电望远镜。FAST 处在较低纬度地区,且远离其他射电天文台。这些设备在未来的小行星地基联合观测中有望起到重要作用。

参考文献:

- [1] Ostro S J. *Reviews of Modern Physics*, 1993, 65: 1235
- [2] Goldstein R M. *Sci.*, 1969, 162: 903
- [3] Pettengill G H, Shapiro I I, Ash M E, et al. *Icarus*, 1969, 10: 432
- [4] Pettengill G H, Ostro S J, Shapiro I I, et al. *Icarus*, 1979, 40: 350
- [5] Yeomans D K, Chodas P W, Keesey M S, et al. *AJ*, 1992, 103: 303
- [6] Ostro S J, Rosema K D, Jurgens R F. *Icarus*, 1990, 84: 334
- [7] Hudson R S. *Remote Sensing Reviews*, 1993, 8: 195
- [8] Magri C, Ostro S J, Scheeres D J, et al. *Icarus*, 2007, 186: 152
- [9] Benner L A M, Ostro S J, et al. Asteroid Radar Research, California Institute of Technology. <http://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/index.html>, 2013
- [10] Ostro S J, Campbell D B, Chandler J F, et al. *AJ*, 1991, 102: 1490
- [11] Pupillo G, Salerno E, Pluchino S, et al. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement*, 2011, 16: 59
- [12] Binzel R P, A'Hearn M, Asphaug E, et al. *Planetary and Space Science*, 2003, 51: 443
- [13] Benner L A M, Ostro S J, Nolan M C, et al. *Meteoritics and Planetary Science*, 2002, 37: 779
- [14] Benner L A M, Nolan M C, Ostro S J, et al. *Icarus*, 2006, 182: 474
- [15] Asteroid Radar Research, JPL. <http://echo.jpl.nasa.gov/>, 2013
- [16] Harmon J K. *Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40: 1904
- [17] Ostro S J, Benner L A M, Nolan M C, et al. *Meteoritics and Planetary Science*, 2004, 39: 407
- [18] Ostro S J, Margot J L, Benner L A M, et al. *Sci.*, 2006, 314: 1276
- [19] Ostro S J, Hudson R S, Benner L A M, et al. *Asteroids III*. Tucson: The University of Arizona Press, 2002: 151
- [20] Busch M W, et al. *Icarus*, 2007, 190: 608
- [21] Brozovic M, Benner L A M, Magri C, et al. *Icarus*, 2010, 208: 207
- [22] Brozovic M, Ostro S J, Benner L A M, et al. *Icarus*, 2009, 201: 153
- [23] Busch M W, Kulkarni S R, Briske W, et al. *Icarus*, 2010, 209: 535
- [24] Elachi C, Van Zyl J. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Ames: John Wiley, 2006: 242
- [25] Margot J L, Peale S J, Jurgens R F, et al. *Sci.*, 2007, 316: 710
- [26] Ostro S J, Giorgini J D. *Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 38
- [27] Giorgini J D, et al. *Sci.*, 2002, 296: 132
- [28] Giorgini J D, Benner L A M, Ostro S J, et al. *Icarus*, 2008, 193: 1
- [29] Chesley S R, Ostro S J, Vokrouhlicky D, et al. *Sci.*, 2003, 302: 1739
- [30] Bottke W F, Vokrouhlicky D, Rubincam D P, et al. *Annu Rev Earth Planet Science*, 2006, 34: 157
- [31] Scheeres D J. *Icarus*, 2007, 189: 370
- [32] Walsh K J, Richardson D C, Michel P. *Nature*, 2008, 454: 188
- [33] Ostro S J, Magri C, Benner L A M, et al. *Icarus*, 2010, 207: 285
- [34] Shepard M K, Clark B E, Nolan M C, et al. *Icarus*, 2008, 195: 184
- [35] Ostro S J, Hudson R S, Nolan M C, et al. *Sci.*, 2000, 288: 836
- [36] Hudson R S, Ostro S J. *Icarus*, 1999, 140: 369
- [37] Benner L A M, Hudson R S, Ostro S J. *Icarus*, 1999, 139: 309
- [38] Shepard M K, Clark B E, Nolan M C, et al. *Icarus*, 2008, 193: 20
- [39] Hudson R S, Ostro S J. *Sci.*, 1995, 270: 84
- [40] Hudson R S, Ostro S J. *Sci.*, 1994, 263: 940
- [41] Hudson R S, Ostro S J, Jurgens R F, et al. *Icarus*, 2000, 148: 37
- [42] Magri C, Howell E S, Nolan M C, et al. *Icarus*, 2011, 214: 210

-
- [43] Busch M W, Ostro S J, Benner L A M, et al. *Icarus*, 2006, 181: 145
- [44] Busch M W, Benner L A M, Ostro S J, et al. *Icarus*, 2008, 195: 614
- [45] Ostro S J, Hudson R S, Benner L A M, et al. *Meteoritics and Planetary Science*, 2001, 36: 1225
- [46] Taylor P A, Margot J L, et al. *Sci.*, 2007, 316: 274
- [47] Nolan M C, Magri C, Benner L A M, et al. *LPI Contributions*, 2012, 1667: 6345
- [48] Brozovic M, Benner L A M, Taylor P A, et al. *Icarus*, 2011, 216: 241
- [49] Ostro S J, Pravec P, Benner L A M, et al. *Sci.*, 1999, 285: 557
- [50] Shepard M K, Margot J L, Magri C, et al. *Icarus*, 2006, 184: 198
- [51] Busch M W. *Icarus*, 2011, 212: 649
- [52] Ostro S J, Hudson R S, Jurgens R F, et al. *Sci.*, 1995, 270: 80
- [53] Ostro S J, Hudson R S, Rosema K D, et al. *Icarus*, 1999, 137: 122
- [54] Busch M W, et al. 2013, in prep
- [55] Hudson R S, Ostro S J, Scheeres D J. *Icarus*, 2003, 161: 346
- [56] Huang J C, Ji J H, Ye P J, et al. *Sci. Rep.*, 2013, 3: 3411
- [57] Reddy V, Sanchez J A, Gaffey M J, et al. *Icarus*, 2012, 221: 1177
- [58] Bottke W. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2007, 39: 416
- [59] Howell E S, Busch M W, Reddy V, et al. *American Astronomical Society, DPS meeting 45*, 2013, 301: 01
- [60] Walsh K J, Richardson D C, Michel P. *Nature*, 2008, 454: 188
- [61] Gronchi G F, Milani A. *Icarus*, 2001, 152: 58
- [62] Bottke W, Melosh H. *Nature*, 1996, 381: 53
- [63] Taylor P A. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 2009, 41: 905
- [64] Richardson D C, Bottke W, Love S G. *Icarus*, 1998, 134: 47
- [65] Richardson D C, Walsh K J. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2006, 34: 47
- [66] Kaasalainen M, Torppa J. *Icarus*, 2001, 153: 24
- [67] Kaasalainen M, Torppa J, Muinonen K. *Icarus*, 2001, 153: 37
- [68] Kaasalainen M, Mottola S, Fulchignoni M. *Asteroids III*. Tucson: The University of Arizona Press, 2002: 139
- [69] Millis R L, Dunham D W. *Asteroids II*. Tucson: The University of Arizona Press, 1989: 148
- [70] Lagerros J S V. *A&A*, 1996, 310: 1011
- [71] Drummond J D, Christou J C, Nelson J. *Icarus*, 2009, 202: 147
- [72] Li J, Kuchner M J, Allen R J, et al. *Icarus*, 2011, 211: 1077
- [73] Carry B, Dumas C, Kaasalainen M, et al. *Icarus*, 2010, 205: 460
- [74] Kaasalainen M. *Inverse Problems and Imaging*, 2011, 5: 37
- [75] Carry B, Kaasalainen M, Merline W J, et al. *Planetary and Space Science*, 2012, 66: 200
- [76] Lamy P L, Jorda L, Fornasier S, et al. *A&A*, 2008, 487: 1187
- [77] Ostro S J, Benner L A M, Magri C, et al. *Meteoritics and Planetary Science*, 2005, 40: 1563
- [78] Carry B, Kaasalainen M, Merline W J, et al. *A&A*, 2010, 523: A94

Ground-based Radar Detection of Near-Earth Asteroids

ZHANG Xiang^{1,2}, JI Jiang-hui^{1,3}

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Ground-based radar detection may act as a powerful means to determine the shape and physical properties of the asteroids in our Solar system. By measuring time delay and doppler frequency of the received echoes, radar systems provide information in ranging and radial velocity of the asteroids. Over the past few decades, more than 500 asteroids (mostly near-Earth objects) were detected using radar observations.

There are two categories of radar detection: (1) The continuous wave detection, which is adopted to determine the roughness of an asteroid's surface. (2) The delay-Doppler detection, which is likely to produce its three-dimensional model, and to define the rotational state. In the delay-Doppler detection, target asteroids are resolved in line-of-sight distance and line-of-sight velocity, providing two-dimensional images with spatial resolution as fine as meter-scale.

Besides radar detection, several other techniques would also provide the shape model of the asteroids, among which the lightcurve inverse method is the most popular one to do that. In comparison with other methods, radar observation may have an advantage on spacial resolution. The lightcurves cannot reveal elaborate information on small features, and the intermediate-scale features of the inversed model are only suggestive. By contrast, radar detection produces resolved images.

In this review, we present the radar observation technique and the method for reconstructing three-dimensional models of asteroids from radar measurements. In addition, we also provide several examples of asteroid models by radar detection, and then compare them with other observations for the shape reconstruction for the asteroids.

Key words: asteroids; ground-based radar detection; delay-Doppler image; shape model