

超高精度的甚长基线干涉相位时延推导法 及其在我国的应用前景*

刘庆会^{1,†} 史弦¹ 王伟华¹ 赵融冰¹ 郝万宏² 王震³ 余赞¹
叶楠⁴ 平劲松¹ 钱志瀚¹ 熊蔚明⁵ 王广利¹ 郑为民¹ 洪晓瑜¹

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 北京跟踪和通信技术研究所 北京 100094)

(3 中国科学院国家天文台乌鲁木齐天文站 乌鲁木齐 830011)

(4 西安卫星测控中心 西安 710043)

(5 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘要 文章简要介绍了同波束甚长基线干涉(VLBI)观测法和相位时延推导法,报道了上海—乌鲁木齐基线的误差为0.0005m的差分相位时延的观测结果,介绍了“萤火1号”和“福布斯”探测器的同波束VLBI观测技术及正在研究的相位时延推定新方法,展望了超高精度的VLBI相位时延在中国深空探测中的应用前景。

关键词 “萤火1号”火星探测器(YH-1),同波束,甚长基线干涉(VLBI),相位时延,精密定轨

High-Accuracy determination of very long baseline interferometry phase delays and its applications in China's future missions

LIU Qing-Hui^{1,†} SHI Xian¹ WANG Wei-Hua¹ ZHAO Rong-Bing¹ HAO Wan-Hong²
WANG Zhen³ YU Yun¹ YE Nan⁴ PING Jin-Song¹ QIAN Zhi-Han¹
XIONG Wei-Ming⁵ WANG Guang-Li¹ ZHENG Wei-Min¹ Hong Xiao-Yu¹

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(2 Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

(3 Urumqi Astronomical Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(4 Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

(5 Center for Space and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract This paper reviews the methods of same-beam very long baseline interferometry (VLBI) observations and the estimation of high-accuracy phase delay. We report the observation results of the phase delay on the Shanghai-Urumqi baseline, with a measurement error as small as 0.0005m. We also describe the same-beam VLBI observation techniques for the Chinese Yinghuo-1 and Russian Phobos-Grunt spacecrafts, and a new method to estimate phase delay. Prospective applications in China's future missions are surveyed.

Keywords YH-1 Satellite, same-beam, VLBI, phase delay, orbit determination

1 引言

甚长基线干涉(very long baseline interferometry, VLBI)技术是深空探测器精密测定轨的重要手段之一,它对于视线垂直方向上的轨道变化有较高灵敏度.而传统的多普勒技术在视线方向上灵敏度

较高. VLBI 和多普勒技术的同时利用,可以极大地

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA12A209, 2008AA12A210)、国家自然科学基金(批准号:10973031)资助项目,中国科学院重要方向项目(批准号:KJJCX-YW-T13-2) 2009-06-29 收到初稿,2009-08-19 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: liuqh@shao. ac. cn

提高深空探测器的测定轨精度. 美国宇航局(NASA)、欧洲宇航局(ESA)等已把 VLBI 技术广泛应用于深空探测器的精密定轨^[1]. 我国则在月球探测工程中首次应用实时 VLBI 技术, 实现了嫦娥一号卫星(CE-1)的实时精密测定轨.

迄今为止, VLBI 的观测量一般是群时延而不是相位时延. 群时延是通过相关相位除以电磁波的带宽得出的. 而在深空探测器中, 由于电力等条件的限制, 其发射电磁波的带宽一般小于 10 MHz, 所以群时延的测量精度一般限制到纳秒量级. 即使是在带宽不受限制的射电源 VLBI 观测中, 群时延的测量精度也只能达到几十 ps. 在中国科学院上海天文台和中国科学院国家天文台乌鲁木齐天文站 25 m 射电望远镜参加的日本月球卫星 SELENE 的 VLBI 观测中, 利用 SELENE 的两个自旋稳定小卫星 Rstar 和 Vstar 的 3 个 S 频段信号, 通过对这 3 对载波信号的相关相位差分, 从差分相关相位中求出了 Rstar 和 Vstar 间的差分相位时延. 由于差分相位时延是由差分相位的绝对值除以载波信号的频率得出的, 其测量误差可以降到极小的 ps 量级, 但前提是必须解决 2π 模糊度问题. 为此, 我们利用了同波束差分 VLBI 观测法^[2-6], 即用射电望远镜的主瓣同时观测 Rstar 和 Vstar, 得到两个卫星的连续相关相位, 通过差分, 可去掉电离层、大气及观测装置的绝大部分的影响, 从而得到了超高精度的差分相位时延.

在将于 2011 年发射的我国首个火星探测器“萤火 1 号”(YH-1) 和俄罗斯的“福布斯”探测器(Phobos-grunt)的精密定轨中, 我们也将利用同波束 VLBI 观测技术. 但由于“福布斯”探测器只发射 1 个 X 频段的信号, 而“萤火 1 号”发射 3 个 X 频段的信号, 使我们不能如同处理 SELENE 的数据那样对两个卫星的相关相位直接进行差分. 为此, 我们针对此问题正在开发新的解析方法, 并争取求出“萤火 1 号”的超高精度相位时延. 本文将简要介绍同波束 VLBI 观测法和相位时延推导法, 对上海—乌鲁木齐基线的 SELENE 的差分相位时延的结果进行报道后, 简单介绍“萤火 1 号”和“福布斯”探测器的同波束 VLBI 观测技术及相位时延推定法, 并展望超高精度的 VLBI 相位时延在我国深空探测中的应用前景.

2 多频点 VLBI 观测的基本原理

VLBI 的基本原理就是两个射电望远镜同时接

收同一电磁波源发出的电磁波, 对记录的数据通过相关处理得到此电磁波到达两个望远镜的相位差, 从相位差中求出到达两个观测站的时间差, 简称时延. 在相关处理时, 需要根据卫星的轨道预测值和地球自转及公转等模型, 首先计算出时延的预测值 τ_p (图 1). 基于时延预测值进行观测站间时延补偿 (把两个接收站记录的数据的时刻对齐) 和条纹旋转 (把由多普勒效应引起的两个站接收信号的频率对齐) 后才可进行相关处理. 从相关相位 ϕ 求残余时延 $\Delta\tau_{\text{res}}$ 有两种方式, 即群时延和相位时延. 群时延可表示为 $\tau_{\text{res}} = (\phi_2 - \phi_1) / 2\pi(f_2 - f_1)$, 其中, f_1, f_2 为接收信号的频率. 由此可知, f_1 和 f_2 的差 (带宽) 越大, 求出的群时延的精度越高. 但由于从相关处理中只能得到在正负 180 度以内变化的 ϕ_1 和 ϕ_2 , 所以在求群时延时, 也需要解决 2π 模糊度问题, 而由不同的频率组成的多频点 VLBI 系统能很好地解决这个问题.

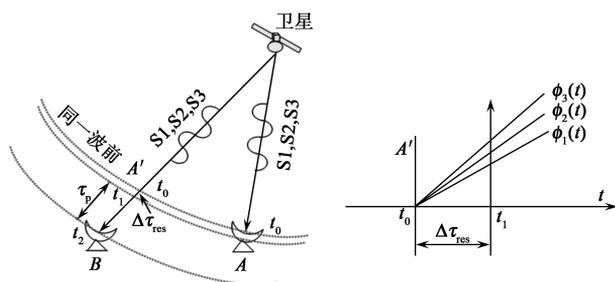


图 1 适用于深空探测的多频点 VLBI 观测 (t_0 点为同一波前, 在此点, 两站间电磁波的相位差为零, 以此为基准从相关相位中可解出残余时延 $\Delta\tau_{\text{res}}$)

3 相位时延推导法和同波束 VLBI 观测法

我们以迄今为止唯一直接求出相位时延的 Rstar 和 Vstar 为例, 简述相位时延推导法, 并简要介绍与此密切关联的同波束 VLBI 观测技术.

Rstar 和 Vstar 分别送出 S 频段的 3 个载波信号, 即 2212 MHz (S1), 2218 MHz (S2) 和 2287 MHz (S3), 通过相关处理得到两个卫星的 3 对相关相位, 进行差分后, 可求出 Rstar 和 Vstar 间的 3 个差分相关相位 $\Delta\phi_i (i=S1, S2, S3)$, 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_i &= 2\pi f_i (\Delta\tau_p + \Delta\tau_{\text{atm}} - \Delta\tau_{\text{ion}} + \Delta\tau_{\text{rst}}) \\ -2\pi N_i + \sigma_i &= 2\pi f_i \Delta\tau_{\text{res}} - 2\pi N_i + \sigma_i, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Delta\tau_p$ 是两个观测站间及两个卫星间的几何

时延预测值的误差. $\Delta\tau_{\text{atm}}$, $\Delta\tau_{\text{ion}}$, $\Delta\tau_{\text{inst}}$ 分别为两个观测站间及两个卫星间的 4 条传播路径上的大气、电离层及观测装置引起的延迟的差分量. N_i 为 2π 模糊度的个数. σ_i 为相关相位的测量误差, 主要由大气、电离层、观测装置及热噪声引起. $\Delta\tau_{\text{res}}$ 就是要解的残余差分时延.

从 3 个相关相位中求出相位时延和推导 N_i , 共有 3 个步骤. 详细的计算公式已在文献[2—7]中给出. 这里, 我们简单给出推导 N_i 的各个步骤及所需要的条件. 首先在 6 MHz 的窄带内, 推导出 $N_{s_2} - N_{s_1}$. 在时延预测值误差小于 83 ns 的条件下, $N_{s_2} - N_{s_1}$ 将为 0. 由于 83 ns 的时延误差在月球附近对应着近 1000m 的轨道误差, 这一条件通过多普勒观测可以满足. 参照 S1 和 S2 间的群时延, 可以调整 S3 频点的相位的 2π 模糊度, 从而在 S1 和 S3 的 75 MHz 的较宽的带宽内推导出群时延, 并解出 $N_{s_3} - N_{s_1}$ (图 2). 把连接 S1 和 S3 的直线延长, 使其延长线在频率为零时的相位落于正负 180 度之内, 即可解出 S1, S2, S3 各个频点的 2π 模糊度 N_{s_1} , N_{s_2} , N_{s_3} , 从而求出相位时延 $\Delta\tau_i$:

$$\Delta\tau_i = \Delta\tau_p + \Delta\tau_{\text{res}} = \Delta\tau_p + (\Delta\phi_i + 2\pi N_i) / 2\pi f_i. \quad (2)$$

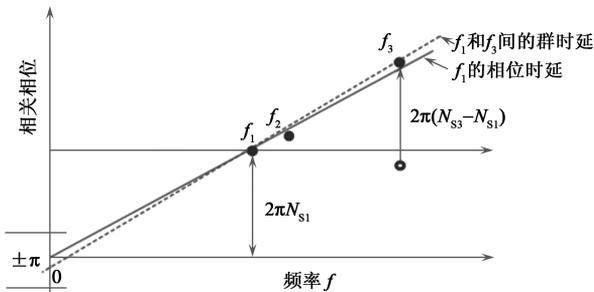


图 2 利用多频点 VLBI 观测推导相位时延的概念图. (首先解出窄带 f_1 和 f_2 间的群时延, 由此推出宽带 f_1 和 f_3 间的群时延, 最后求出 f_1, f_2 和 f_3 频点的相位时延)

由图 2 不难想像, 由于相位时延是通过 S1 和 S3 间的群时延推导出的, 这就要求群时延的精度必须足够高, 亦即相关相位的测量误差 σ_i 必须足够小. 在 Rstar 和 Vstar 的 3 个频点的情况下, σ_i 应小于 4.3 度. 由于大气、电离层及观测装置的影响, 4.3 度通常较难满足. 为此, 我们采用了同波束 VLBI 观测法. 即当 Rstar 和 Vstar 的角距小于 0.56 度时, 射电望远镜指向两颗卫星的中间位置. 由于口径 20m 左右的望远镜的 S 波段的主波束约为 0.6 度, 使得我们可以同时接收到 Rstar 和 Vstar 的信号. 在同波束 VLBI 观测中, 大气、电离层和观测装置在 Rstar 和 Vstar 之间的各个

频段的影响几乎相同, 通过求两个卫星间的相位差, 可使 $\Delta\tau_{\text{atm}}$, $\Delta\tau_{\text{ion}}$, $\Delta\tau_{\text{inst}}$ 和 σ_i 变得很小, 从而使 2π 模糊度 N_i 的推导条件得以满足. 事实上, 在 Rstar 和 Vstar 长达 15.5 个月同波束差分 VLBI 观测中, 90% 左右的观测都成功推导出了差分相位时延.

4 上海和乌鲁木齐站的观测结果

上海和乌鲁木齐的 VLBI 接收系统都可简单地分为前端和后端. Rstar 和 Vstar 的 3 个 S 频段的电磁波在前端经制冷接收机放大后, 下变频到几百 MHz 的中频信号并传到后端. 在后端再一次下变频到几十 kHz 的低频信号, 经截止频率为 80 kHz 的线性相位低通滤波器滤波后, 输入到专用数据记录装置 SRTP. SRTP 以 200 kHz 的采样频率, 6bit 的振幅分辨率进行采样, 将数据记录在硬盘中. 我们用软件相关机进行相关处理和进行差分相位时延推导^[6,7].

图 3 给出了用 9 次多项式拟合后的 S1, S2, S3 频点的 Rstar 和 Vstar 的相关相位以及它们的差分相关相位的残差. 前者主要起源于电离层和大气层的扰乱以及观测装置的不稳定, 它们在约 ± 8 度之间变化. 图 3(d) 所示的差分相关相位的残差均小于 4.3 度, 所以 2π 模糊度 N_i 可唯一地被推导出来. 如图 3 所示, Rstar 和 Vstar 的 S1, S2, S3 的相关相位残差, 以及它们的差分相关相位残差的变化情况也几乎一致. 这很有利于相位时延的推导. 因为如图 2 所示, 如果 S1, S2, S3 的相关相位同时变大或变小, 将不影响群时延的推导结果, 也就不影响 N_i 的推导.

图 4(a) 给出了上海—乌鲁木齐基线的 Rstar 和 Vstar 之间的差分相位时延 $\Delta\tau_i$, 其变化范围约为 2000m. 图 4(b) 给出了用 9 次多项式拟合后的 S1 频点的差分相位时延的残差, 其均方差为 0.0005 m, 此误差和现有 VLBI 的最小误差相比也降低了 2 个量级. 图 4(d) 给出了 S1 和 S3 间的群时延残差, 其均方差为 0.0128 m. 由此可见, 差分相位时延的残差远远小于群时延残差, 这就是我们努力设法求出相位时延的原因.

5 “萤火1号”和“福布斯”探测器的 VLBI 观测

图 5 给出了“萤火1号”和“福布斯”探测器的同波束 VLBI 观测的概念图. 由于“萤火1号”和“福布斯”的最大距离约为 90000km, 而地球和火星间距离以 2.7 亿 km 来计算, 两卫星间的角距一般小于 0.02 度. 中国的 VLBI 网由口径为: 上海舍山 25m, 乌鲁木齐南

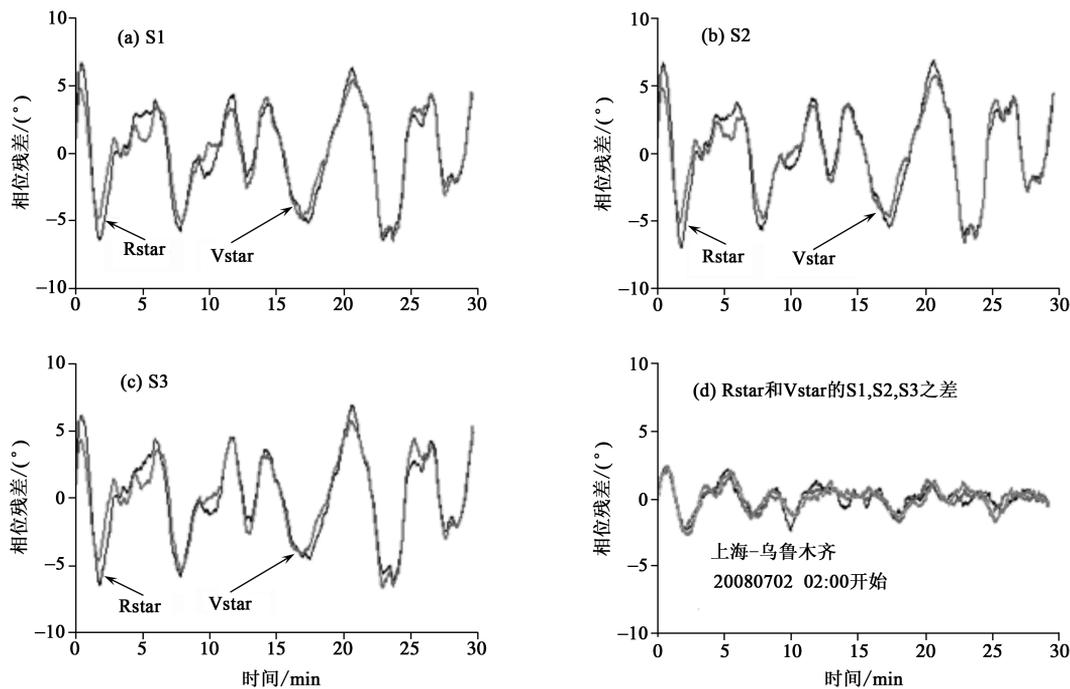


图3 (a),(b),(c)分别为9次多项式拟合后的S1, S2, S3的Rstar和Vstar的相关相位的残差;(d)为Rstar和Vstar的S1, S2, S3的差分相关相位的残差. 积分时间为60s

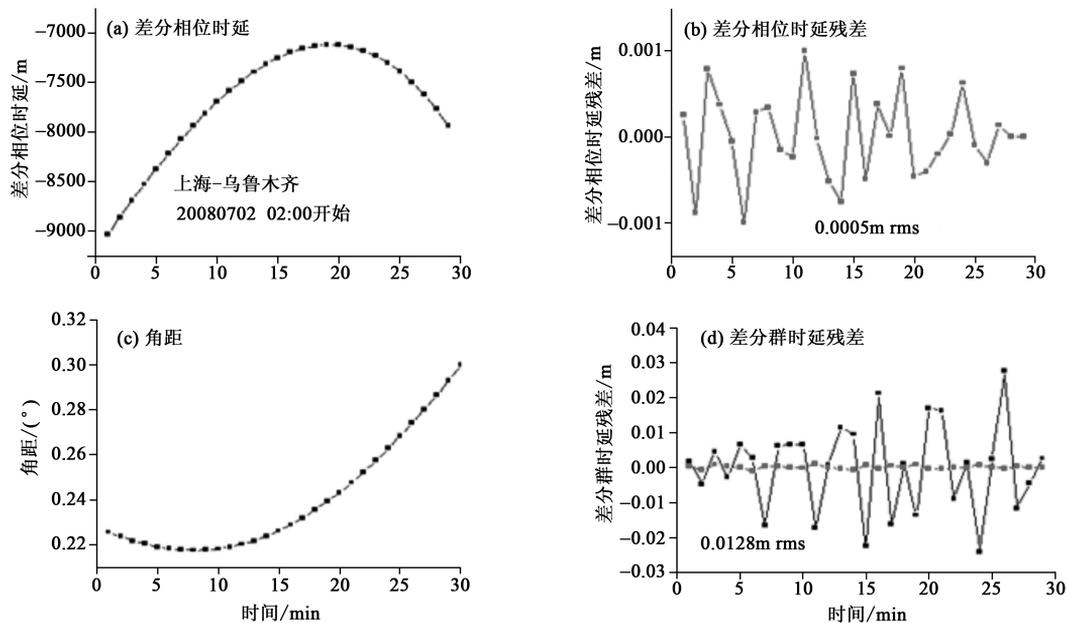


图4 (a)上海-乌鲁木齐基线的差分相位时延;(b)9次多项式拟合后的S频段的差分相位时延残差;(c)Rstar和Vstar间的角距;(d)差分相位时延残差和群时延残差. 积分时间为60s

山25m,北京50m,昆明40m的4个射电望远镜构成.即使是口径最大的50m射电望远镜,其X波段的主波束宽度也约为0.08度.所以,我们将有很多的机会来进行“萤火1号”和“福布斯”的同波束VLBI观测.另外,由于两卫星间的角距较小,由地球大气及电离层所引起的两卫星电磁波的相位波动也几乎相同.通过同波束差分观测,可很好地去除大气、电离层及观测装置的

影响^[8].但由于“福布斯”探测器只发射1个X频段的信号,而“萤火1号”发射3个X频段的信号,使我们不能如同处理SELENE的数据那样对两个卫星的相关相位直接进行差分.为此,我们研究小组针对此问题正在开发新的解析方法.新方法的主要原理为用“福布斯”的一个频点的相位变化来校正“萤火1号”3个频点的相位变化,并争取用改正后的相关相位求出“萤火1

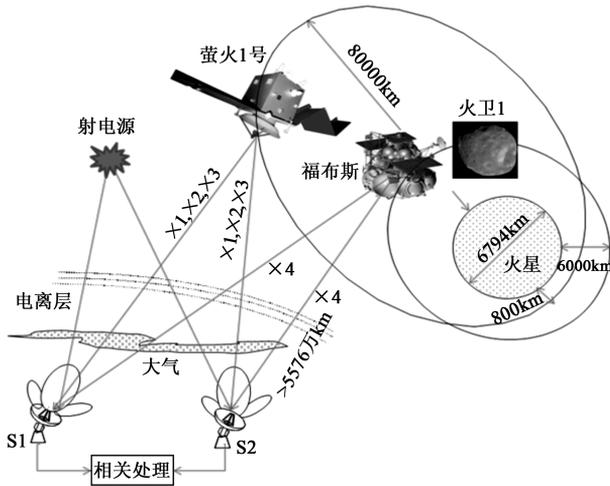


图5 “萤火1号”和“福布斯”卫星的同波束 VLBI 观测

号”的相位时延。

6 超高精度的 VLBI 相位时延在我国深空探测中的应用前景

利用上海天文台和乌鲁木齐天文站的口径 25 m 的射电望远镜,已成功得到了测量误差为0.0005m的

超高精度 VLBI 差分相位时延。在我国首个火星探测器“萤火1号”(YH-1)和俄罗斯“福布斯”探测器(Phobos-grunt)的精密定轨中,我们将利用同波束差分 VLBI 观测技术,消除大气、电离层及观测装置的影响,并挑战超高精度的 VLBI 相位时延。另外,在不久的将来,在我国将要发射的 CE-3 的两个着陆器之间的精密测轨中,以及将来的有人探月返回时的空间对接过程中,由同波束差分 VLBI 观测得到的超高精度 VLBI 相位时延必将发挥更大的作用。

参 考 文 献

- [1] Thornton C L, Border J S. Radiometric tracking techniques for deep-space navigation. John Wiley & Sons, Inc. , 2003
- [2] Liu Q, Matsumoto K, Kikuchi F *et al.* Same-Beam Differential VLBI Technology Using Two Satellites of the SELENE Spacecraft. IEICE-JB, J89B-B. 2006,602—617
- [3] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K *et al.* Advances in Space Research, 2007,40:51
- [4] Liu Q, Kikuchi F, Tsuruta S *et al.* IEEE Trans. Antenna and Propa. , 2007, 55 :1466
- [5] Liu Q, Kikuchi F, Goossens S *et al.* S-band same-beam VLBI observations in SELENE (Kaguya) and correction of atmospheric and ionospheric delay. J. Geod. Soc. of Japan. 2009
- [6] Kikuchi F, Liu Q, Matsumoto K *et al.* Earth Planets Space, 2008,60:391
- [7] Kono Y, Hanada H, Ping J *et al.* Earth Planets Space, 2003, 55:581
- [8] Liu Q, Nishio M, Yamamura K *et al.* IEEE Trans. , Antenna and Propa. , 2005, 53(4):1519

· 物理新闻和动态 ·

用激光观察人体骨骼

英国的科学家开始致力于对一项新的激光技术进行医院检验,这种技术最终可能对骨质疏松等骨骼疾病进行快速而可靠的诊断。该方法包括物理学家和化学家常用的一种新的拉曼谱仪,能够为医生提供人体内部骨骼的最详细的描绘。

骨骼的强度来自两个主要成分:矿物质(如钙和结晶天然盐),以及叫做胶原蛋白的蛋白基物质。有很多疾病是与这些物质相关的,包括“骨质疏松症”。这种疾病是由于缺乏第一种胶原蛋白造成的。

为了探测这些疾病以及监视病人对治疗的反应,医生需要用非侵害性的方法观察病人骨骼的内部。目前采用的两种方法是 X 射线谱学和超声波,但是这两种方法都很难观察到胶原蛋白。许多骨骼疾病都探测不出来。

近年来,提出了一种新的能够探测矿物质含量和胶原蛋白的方法。拉曼谱学依据的原理是当光与物质相互作用时,发生非弹性散射。在典型的实验中,一束激光照在样品上,样品将光子散射到略低的频率。测量光子颜色的变化可以分析所研究的对象的化学性质。

医学物理学家已成功地将拉曼谱学应用于研究从人体取出的组织。但是当需要观察活体内的骨骼时,遇到了问题。来自病人表层的拉曼信号比来自皮肤下面的信号强得多。这些信号由于向四周散射而大大减弱。这些骨骼信号还因在皮肤的黑色素中产生荧光而进一步减弱。

为了解决这一问题,在英国中心激光装置上工作的 Pavel Matousek 及其同事采用一种新的几何来改进拉曼谱仪。他们通过在使用拉曼谱仪过程中,在照射与收集点之间增加一定距离,以减弱来自皮肤的信号。他们还使用环形的探测器,以确保所有的信号都被有效地探测。

这种称作空间偏置拉曼谱学(SORS)的技术已被美国的一个独立的小组用来测定鸡的胫骨中磷酸盐与碳酸盐的比例,这有可能成为骨质疏松症的一个指示计。Matousek 等计划下一步将在英国皇家国立整形外科医院用人体对 SORS 技术进行检验。有关论文发表在 Analyst(2009, 134:1058 —1066)上。

(树华 编译自 Physicsword News , 6 July 2009)