

# VLBI 数字基带转换器数据确定 “嫦娥一号”落月时刻

罗近涛<sup>1,2</sup>, 陈 岚<sup>1,2</sup>, 吴亚军<sup>1</sup>, 张秀忠<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 中国第一颗月球探测卫星“嫦娥一号”于2007年10月24日发射, 完成工程目标和科研实验任务后于2009年3月1日受控落月。确定嫦娥一号卫星的具体落月时刻, 对于判定落月点和轨控精度以及后续的探月任务都有重要意义。嫦娥一号落月过程中, 上海、昆明和乌鲁木齐3个VLBI观测站安装的VLBI数字基带转换器对该过程进行了全程数据记录。利用其中落月段数据, 用基于短时傅立叶变换的时频分析方法, 计算确定嫦娥一号具体落月时刻为UTC 2009年3月1日8时13分6.6459秒, 精确度为 $10^{-3}$  s, 相应的落月点确定精度为2m左右。

**关 键 词:** “嫦娥一号”; 硬着陆; 落月时刻; 短时傅立叶变换; 数字基带转换器  
**中图分类号:** P228.6

## 1 引 言

中国第一颗月球探测卫星“嫦娥一号”(CE-1)于2007年10月24日从西昌卫星发射中心顺利升空, 2007年11月成功进入环月轨道。CE-1在轨运行1年多, 完成了预定任务和后期的附加任务。2009年3月1日, CE-1在地面测控网控制下实施硬着陆, 落于预定撞击点。此次撞击为受控撞击, 卫星沿设计轨道撞向月面, 以便为后续探月任务积累落月数据和经验。确定卫星落点, 对检验轨道设计精度和轨控精度具有重要意义。CE-1撞击月球时在月固系中的速度为1697.2m/s, 其中投影到纬度方向的速度是1694.1m/s, 经度方向为-53.5m/s, 径向方向速度为-87.4m/s, 因此落月时刻的误差对落点位置的精度影响主要是在纬度方向<sup>[1]</sup>。若对落月时刻确定的精度达到毫秒量级, 相应的纬度方向位置最大误差在米级, 对落月点的判定将达到米级精度。因此, 确定CE-1落月时刻, 对于确定落月点, 以及检验落月轨道设计精度和控制精度, 具有重要意义。

在CE-1落月过程中, 中国VLBI网(CVN, Chinese VLBI Network)上海、北京、昆明、乌鲁木齐4个观测站进行了全程跟踪观测。其中上海、昆明和乌鲁木齐3个站上安装的VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 数字基带转换器(DBBC, Digital Base Band Converter)作为开发中的新一代VLBI数据终端, 进行了全程观测记录。本文利用上海、乌鲁木齐2站上的DBBC记录数据, 利用基于短时傅立叶变换的时频分析方法, 计算确定CE-1的具体落月时刻。

收稿日期: 2010-07-13; 修回日期: 2010-08-19

资助项目: 上海市自然科学基金(09ZR1437300); 上海市空间导航与定位技术重点实验室(06DZ22101)

## 2 时频分析

通常的信号分析, 要么在时域进行, 要么在频域展开, 它们构成了信号的时域分析方法或频域分析方法, 使用的主要数学工具是傅立叶变换<sup>[2]</sup>。

对于一时域连续信号  $s(t)$ , 经由傅立叶变化得到其频谱  $S(f)$ :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (1)$$

傅立叶变换是信号的一种整体变换, 无法给出信号频谱随时间变化的规律<sup>[3]</sup>。傅立叶变换只能反映信号的整体频谱特性, 对于非平稳信号, 无法检测出某一频率在时间上的具体分布。为刻画信号的局部特性, 引入时频分析方法, 短时傅立叶变换 (STFT, Short Time Fourier Transform) 便是其中一种方法。其思想是对时域信号加上一很窄的窗函数, 然后进行变换。令  $g(t)$  为一很窄的窗函数, 沿时间轴滑动, 信号  $z(t)$  的短时傅立叶变换定义为<sup>[2]</sup>:

$$STFT_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [z(u)g^*(u-t)]e^{-j2\pi fu} du, \quad (2)$$

其中 \* 代表复数共轭。如果窗函数为无穷长的矩形窗, 那么 STFT 将退化为式 (1) 所表示的传统傅立叶变换。

为获得离散信号的短时傅立叶变换, 需将式 (2) 离散化。STFT<sub>z</sub>(t, f) 为时频联合表示, 对其在等间隔时频网格点 ( $mT, nF$ ) 处进行采样<sup>[2]</sup>, 其中  $T > 0$  和  $F > 0$  分别为时域和频域上的采样周期,  $m$  和  $n$  为整数。为方便起见, 将 STFT( $mT, nF$ ) 写作 STFT( $m, n$ ), 式 (2) 的离散化形式如下:

$$STFT(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} z(k)g^*(kT - mT)e^{-j2\pi(nF)k}. \quad (3)$$

## 3 DBBC

基带转换器是 VLBI 台站的关键设备, 目前世界上大部分 VLBI 台站所使用的是传统的模拟基带转换器。模拟基带转换器目前已停产, 继续使用下去, 维护将变得十分困难。新型的基于数字电路的 VLBI 基带转换器慢慢地开始出现。

中国科学院上海天文台 VLBI 技术实验室从 2002 年开始研究数字滤波和数字基带转换器, 与意大利 CNR 共同研制了简化型 DBBC<sup>[3]</sup>, 为后续工作打下了坚实的基础。2007 年正式启动 VLBI 数字基带转换器项目<sup>[4]</sup>。VLBI 数字基带转换器原理框图如图 1 所示, 主要由模拟和数字两部分组成。来自天线接收机的中频信号经由模拟部分自动增益进行幅度调整, 送往数字部分。数字部分首先对信号进行数字化, 采样时钟 1024 MHz, 量化所得数字信号送往数字下变频器, 进行数字下变频, 得到数字基带信号。数字基带信号由通道选择器送往记录设备。

目前上海天文台 VLBI 数字基带转换器项目已完成出所验收, 中国 VLBI 网 4 个观测站——上海佘山站、乌鲁木齐南山站、北京密云站和云南昆明站均安装有完整的数字基带转换器系统。

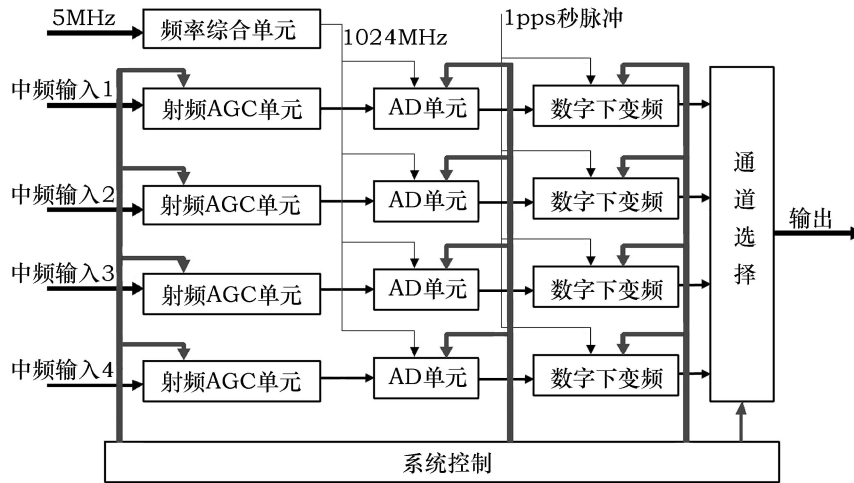


图 1 VLBI 数字基带转换器原理框图

### 4 数据处理

数据接收和处理流程如图 2 所示。观测站天线接收 CE-1 遥测信号，经由接收机转换为中频信号，中频信号由 DBBC 转换成基带信号，送往 Mark5B 记录。Mark5B 记录的磁盘数据送回数据处理中心，进行后续的数据预处理和分析。CE-1 落月过程中，Mark5B 数据记录带宽为 2 MHz，采样时钟 4 MHz，采样点对应时间间隔为 0.25  $\mu$ s。



图 2 数据接收和处理流程

CE-1 载有 2 个 S 波段下行遥测信号发生器，分别为 S1 信标和 S2 信标。正常情况下 DBBC 接收到的 S1 信标幅度谱如图 3 (左) 所示，其中 0.8 MHz 左右的频点为 S1 信标主载波。CE-1 卫星落月过程中，S1 信标和 S2 信标保持开启。本文选取 DBBC 记录到的星上下行遥测信号消失时刻为所在台站观测到的 CE-1 落月时刻，前提是在 CE-1 撞击月球瞬间星载遥测信号消失，如果该信号在撞击前或撞击后消失，会带来不可知的误差。遥测信号消失后，DBBC 记录数据中 S1 信标所在通道的频谱如图 3 (右) 所示，图中 1.1 MHz 左右的点频率信号为 VLBI 终端系统的相位校正信号。

中国 VLBI 网上海、乌鲁木齐 2 站观测到的 CE-1 遥测信号消失时刻，均在 UTC 2009 年 3 月 1 日 8 时 13 分左右，具体时刻在从 13 分开始的 1 分钟之内。2 站上 DBBC 在 13 分和 13 分 59.991 8 秒所记录 S1 信标的幅度谱依次如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可以看出，CE-1 信号在此分钟内消失。经粗略分析，上海、乌鲁木齐 2 站上 CE-1 信号消失时刻都在 13 分 7.8 秒左右。对于昆明站 DBBC 记录的数据，进行时频分析后发现，与上海、乌鲁木齐两站数据相比，质量较差，故不使用该站数据进行落月时刻确定。数据质量差的具体原因有待分析。

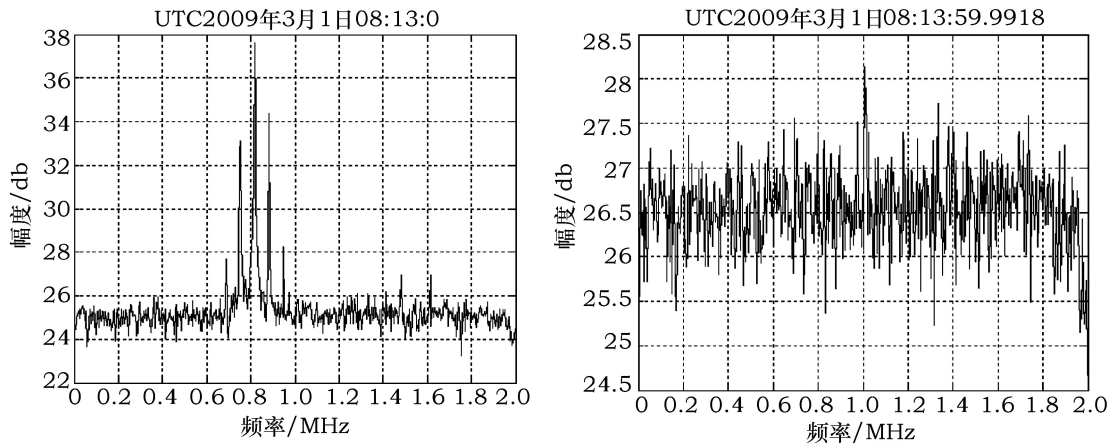


图3 上海站 DBBC 记录的 S1 通道数据幅度谱: 左为 UTC 2009 年 3 月 1 日 08 时 13 分 00 秒数据; 右为 UTC 2009 年 3 月 1 日 08 时 13 分 59.9918 秒数据

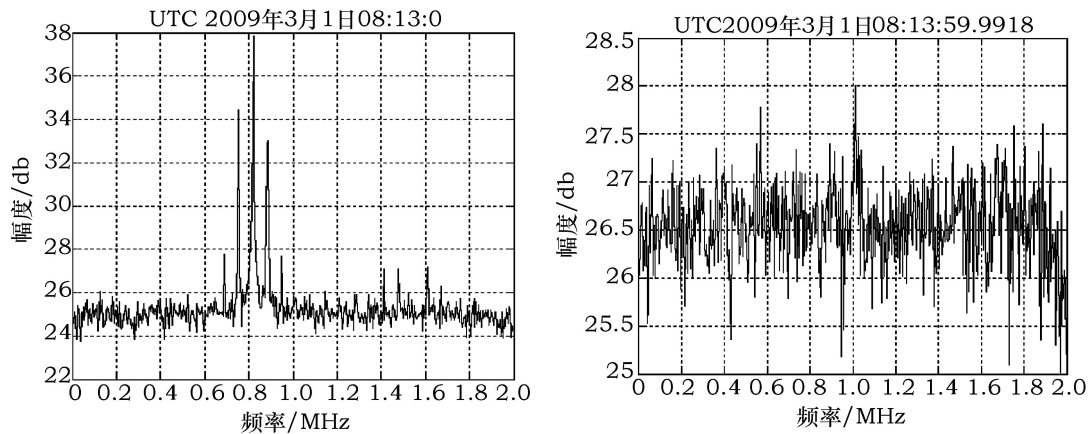


图4 乌鲁木齐站 DBBC 记录的 S1 通道数据幅度谱: 左为 UTC 2009 年 3 月 1 日 08 时 13 分 00 秒数据; 右为 UTC 2009 年 3 月 1 日 08 时 13 分 59.9918 秒数据

短时傅立叶变换能获得信号所有频率的局部细节, 确定 CE-1 遥测信号的消失时刻, 只需对遥测信号载波频率进行考察。令离散形式下载波频率为  $C_f$ , 相应的噪声频率为  $N_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )。为精确确定  $C_f$  消失时刻, 即其幅度变为与噪声基底相当的时刻, 定义短时傅立叶变换下的信噪比  $SNR_{STFT}(m)$  如下:

$$SNR_{STFT}(m) = 10 \lg |STFT(m, C_f)| - \frac{1}{K_n} \sum_{i=1}^{K_n} 10 \lg |STFT(m, N_i)|, \quad (4)$$

其中,  $K_n$  为用于计算噪声基底的频点数。

由式 (4) 可以得出, CE-1 遥测信号消失的时刻, 即为相应的  $SNR_{STFT}(m)$  变为 0 的时刻。根据海森堡测不准原理, 时间窗函数越短, 时间分辨率越高, 能反映更小局部的频率特性, 但是在时间采样率一定的条件下, 越短的时间窗意味着傅立叶变换点数越少, 相应的频率分辨率越差<sup>[5]</sup>。为解决时间分辨率与频率分辨率之间的这一矛盾, 本文采用多窗口计算后, 对不同长度窗口的结果取平均, 所使用的窗口长度分别为 256, 512, 1024。

### 5 结果分析

上海、乌鲁木齐 2 站 DBBC 数据处理结果如图 5 和图 6 所示。具体的信号消失时刻如表 1 和表 2 所示, 其中表 1 为扣除光行时之后结果, 表 2 为未扣除光行时的结果。

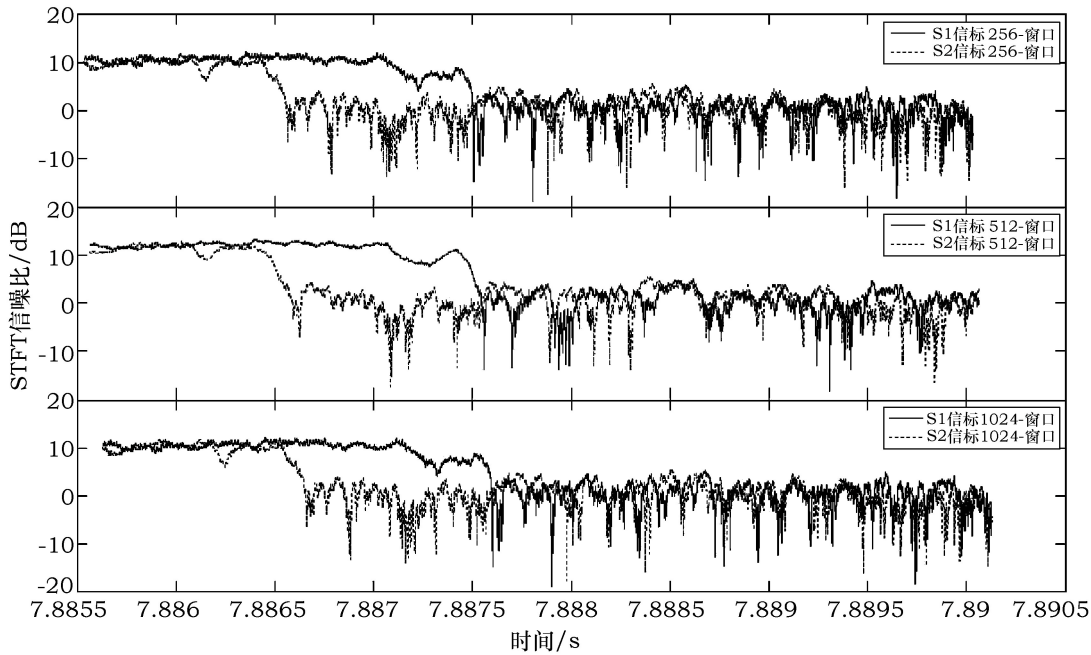


图 5 上海站数据 S1、S2 信标时频分析结果, 由上至下所使用窗口长度分别为 256, 512, 1024, 零时为 UTC 2009 年 3 月 1 日 08 时 13 分 00 秒。

由表 1 可看出:

(1) 上海、乌鲁木齐 2 站数据计算结果吻合的较好, S1 信号在 UTC 08 时 13 分 6.646 82 秒左右消失, S2 信号在 UTC 08 时 13 分 6.645 9 秒左右消失。

(2) 2 站数据对 S1 信号的计算结果, 在  $10^{-4}$  秒级吻合; 对 S2 信号的计算结果, 在  $10^{-3}$  秒级吻合。

表 1 上海站、乌鲁木齐站计算所得 S1、S2 信标消失具体时刻 (扣除光行时)

台站	信标	信标消失时刻/秒
上海	S1	6.646 819 483 868 17
上海	S2	6.645 941 234 434 16
乌鲁木齐	S1	6.646 824 282 616 75
乌鲁木齐	S2	6.645 843 452 558 15

由图 5、图 6 和表 1 可以看出, CE-1 的 S1 信号和 S2 信号并非同时消失, S2 信号先于 S1 信号约 1 ms 消失。具体原因, 可能与 CE-1 撞月时姿态有关, 当时的卫星姿态使得 S2 信号发射天线先撞击月面, S2 信号消失, S1 信号天线随后受损, S1 信号消失。在确定 CE-1 具体落月时刻时, 应取先消失的 S2 信号数据为准, 相应的时刻, 取上海、乌鲁木齐 2 站计算结果的平均值, 为 UTC 08 时 13 分 6.645 892 343 496 155 秒, 由于两站计算所得 S2 结果  $10^{-3}$  秒级吻合, 因此平均值的计算结果保留小数点后 4 位, 为 UTC 08 时 13 分 6.645 9 秒。

根据中国探月网资料, CE-1 落月时刻为北京时间 2009 年 3 月 1 日 16 时 13 分 10 秒, 即 UTC 8 时 13 分 10 秒<sup>[6]</sup>。利用 VLBI 数字基带转换器数据确定的落月时刻为 UTC 8 时 13 分 6.645 9 秒。计算结果与中国探月网所给出时间相比, 精度提高 3 个数量级左右。

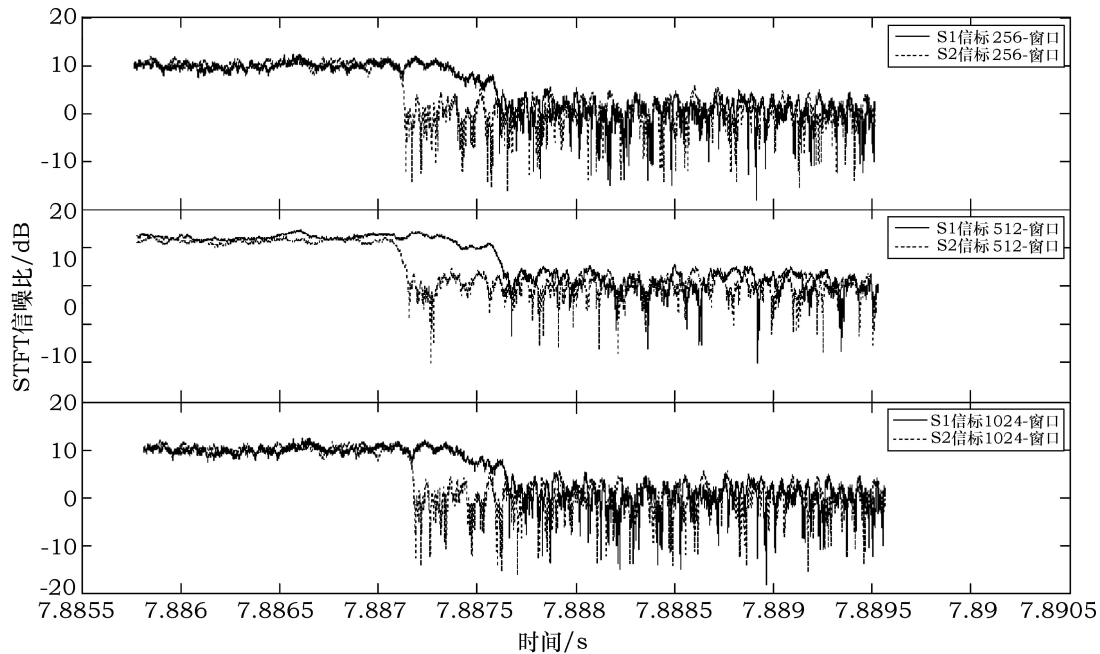


图6 乌鲁木齐站数据 S1、S2 信标时频分析结果, 由上至下所使用窗口长度分别为 256, 512, 1024, 零时为 UTC 2009 年 3 月 1 日 08 时 13 分 00 秒。

表 2 上海站、乌鲁木齐站计算所得 S1、S2 信标消失具体时刻 (未扣除光行时)

台站	信标	窗口长度	信标消失时刻/秒	平均值/秒
上海	S1	256	7.887 501 75	7.887 548 75
		512	7.887 545 5	
		1024	7.887 599	
	S2	256	7.886 56	7.886 670 5
		512	7.886 586 5	
		1024	7.886 865	
乌鲁木齐	S1	256	7.889 229 5	7.889 295 83
		512	7.889 335 5	
		1024	7.889 322 5	
	S2	256	7.888 268	7.888 315
		512	7.888 301 75	
		1024	7.888 375 25	

## 6 结 论

“嫦娥一号”卫星于 2009 年 3 月 1 日受控撞月, 确定其具体落月时刻对于确定落月点有重要意义。本文利用中国 VLBI 网上海、乌鲁木齐观测站上安装的 VLBI 数字基带转换器在落月时段记录的数据, 利用时频分析方法, 确定了“嫦娥一号”卫星的落月时刻为 UTC 2009 年 3 月 1 日 8 时 13 分 6.6459 秒, 精确度为  $10^{-3}$  s, 相应的落月点确定精度为 2 m 左右。此计算结果与中国探月网所给出的落月时刻相比, 精度提高 3 个量级。

致谢 感谢中国 VLBI 网上海观测站和乌鲁木齐观测站对 VLBI 数字基带转换器参加 CE-1

落月段观测的帮助。感谢中国科学院上海天文台黄勇、曹建峰计算光行时。感谢数字 VLBI 基带转换器项目组成员的努力。

### 参考文献:

- [1] 曹建峰, 黄勇, 胡小工等. 宇航学报, 2010, 31(7): 1724
- [2] 张贤达. 现代信号处理. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 349
- [3] 项英. 博士论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2005
- [4] ZHANG Xiu-zhong et al. In: Andrey Finkelstein, Dirk Behrend eds. The 5th IVS General meeting Proceedings, Sait Petersburg, 2008: 381
- [5] 高健健, 金乘进, 高龙. 天文研究与技术 (国家天文台台刊), 2007, 4(1): 21
- [6] [http://www.clep.org.cn/index.asp?modelname=2009/zt.luoyue/zt.cely\\_ttxw\\_content&recno=1](http://www.clep.org.cn/index.asp?modelname=2009/zt.luoyue/zt.cely_ttxw_content&recno=1)

## Determination of Lunar Impact Epoch of CE-1 using VLBI Digital Base Band Converter Data

LUO Jin-tao<sup>1,2</sup>, CHEN Lan<sup>1,2</sup>, WU Ya-jun<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-zhong<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;*  
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**Abstract:** Chang'e(CE)-1, the first lunar satellite of China, was launched on Oct. 24, 2007. After accomplishing the planed mission, it was controlled to impact on the Moon's surface on March 1, 2009. It is important to determine the epoch of the impact. The epoch is the base of the determination of the location of the impact and the precision of the track control. And it is important for the following lunar exploration program. The VLBI digital base band converter installed in Shanghai station, Kunming station and Urumqi station worked as the data acquisition backend while CE-1 fell to the moon. The epoch of the impact is determined using the relative data via a time-frequency analysis based on the short time Fourier transform. And the determined epoch is UTC08:13:6.6459, March 1, 2009. The precision of the epoch is  $10^{-3}$  second. And the determination of the impact location is 2 m, relatively.

**Key words:** CE-1; Hard landing; Time of the lunar impact; Short time Fourier transform; DBBC