卫星 VLBI 观测时延和相位条纹旋转模型研究

夏海波

(中国科学院上海天文台 VLBI 研究室　上海 200030)

摘　要　空间卫星在绕地球或月球等星体运行时，为了跟踪和控制卫星就要时刻掌握其在空间的位置和运动状态. 但由于地球的自转和公转使得卫星和地球之间的相对运动描述关系变得复杂，目标卫星相对地球任意两个观测站的时间差 (时延) 和多普勒频移 (相关条纹旋转) 时刻都在改变. VLBI 相关处理机是卫星观测和空间探测极为重要的技术手段，其原理以 FX 和 XF 两种相关模型处理观测数据. 以 FX 相关模型为基础修正 VLBI 观测数据的时延补偿和相关条纹旋转的模型，提出对称 "$1/n$ Multiplier" 时延补偿模型和条纹旋转模型，并且对实际观测数据进行操作和详细分析，对相关相位谱的剩余时延变化趋势和方差分布进行分析，从中找出优选时延补偿和条纹旋转模型. 对于精确描述卫星轨道运动状态提供更准确的方法.

关键词　VLBI；相关；时延；条纹

中图法分类号　P 412

Model Study of Time Delay and Phase Fringe Stopping in Satellite Observation of VLBI

XIA Haibo

(*Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200030)

Abstract　When satellite moves around the earth or moon, its position and moving behavior should be held in order to track and control it. Due to the self rotation and revolution of the earth, the description of relative motion between earth and satellite become complicated. And the time delay and Doppler shift of an aimed satellite that relative to any two observation sites change at all times. VLBI correlation processor is a key technical instrument in space probing and satellite observation. The principle of correlation model of FX and XF is used to deal with observational data. Time delay and fringe stopping of VLBI correlation model is modified based on FX model, and a mirror "$1/n$ Multiplier" model of time delay and fringe stopping is brought foward. Through analysis of the actual observational data and the changing trend of residual time delay and variance distribution, a better model of time delay compensation and fringe stopping is shown.

Key words　VLBI, Correlation, Time delay, Fringe

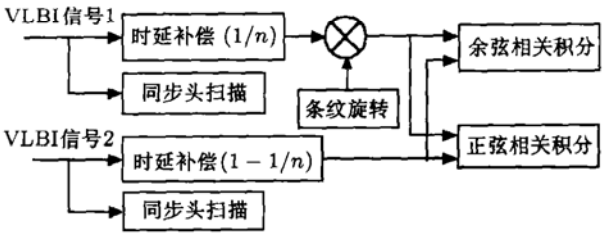
2004-05-10 收到原稿，　2004-09-09 收到修定稿

1 VLBI相关处理的 FX和 XF模型

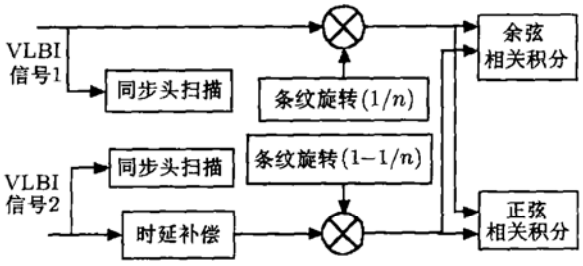
空间卫星在绕地球或月球等星体运行时，为了跟踪和控制卫星就要时刻掌握其在空间的位置和运动状态. 但由于地球的自转和公转使得卫星和地球之间的相对运动描述关系变得复杂，目标卫星相对地球任意两点的时间差 (时延) 和多普勒频移 (相关条纹旋转) 时刻都在改变. VLBI (Very Long Baseline Interferometer) 技术能够利用相隔数千公里的观测天线组成大孔径的射电望远镜，其角分辨率可以达到毫角秒量级 (即在地球上可以分辨月球上篮球大小的几何尺寸). 实时观测技术的核心就是相关处理机高速相关运算，能够快速估计两个观测台站的对目标卫星的时延和时延率. 相关处理过程中在有效带宽范围内每隔较短的时间间隔就要对相关积分函数进行时延补偿和多普勒频移条纹旋转，使得能够通过相关相位条纹的斜率的来估计时延量和剩余时延量，时延量能够反映目标卫星相对观测位置，多普勒条纹旋转能够反映目标卫星运动状态参数. VLBI 相关处理的使用两种模型，即 XF 相关模型和 FX 相关模型 [1]. XF 相关模型首先进入乘法器，然后利用傅里叶变换 (FFT) 将信号由时域变换到频域进行相关积分. 而 FX 相关模型首先利用 FFT 将信号由时域变换到频域，然后在频域进入乘法器 (Multiplier). 本文以 FX 相关模型为基础，对时延补偿和条纹旋转进行了详细的研究.

2 修正的时延补偿模型

修正的时延补偿模型如图 1(a) 所示，在射电源 VLBI 观测中，由于现阶段没有实时相关处理，在研究室可以根据天体物理建模与实际观测进行拟合，可以有时间不断修正模型. 但卫星的实时观测要求实时性强，能够在较短时间给出卫星的轨道参数和运动状态报告. 本文尝试对两个信号同时进行相向的对称时延补偿. 因为目标卫星相对两个观测台站的空间几何关系并不满足线性关系，也就是说不是均匀改变的，如果对一个台站进行补偿只是时延的整体平均，而对两个台站信号进行时延补偿是分段平均，补偿精度会有差别. 下面的分析验证了上面的假设.



(a) FX Time模型



(b) FX Freq模型

图 1 VLBI-FX 相关模型

Fig.1 VLBI-FX correlation model

以上海和乌鲁木齐两个天文观测站对某卫星的观测数据为例进行模型验证，数据特征为：带宽 2 MHz，采样率 4 MHz，对数据文件分成 14 个时延和条纹旋转模型，每个模型操作数据长度为 262 ms，在每个模型内又进行了 12 个分段模型修正. 时延的修正模型见表达式 (1).

$$
\begin{aligned}
&\text{Correlation}\,(s,u,\Delta f,\tau,\text{pow},f_s)\\
&\quad\text{for i}\in 0\cdots 2^{(\text{pow}-1)}\\
&\qquad\text{Corf i}\to 0+\text{i.0}\\
&\quad n\to 1\cdots 12\\
&\quad L\to\text{length}(s)\\
&\quad N\to\text{floor}\left(\frac{L}{2^{\text{pow}}}\right)\\
&\quad\text{for loop}\in 0\cdots N-1\\
&\qquad F_1\to\text{FT}\left(s,\Delta f,-\frac{1}{n}\cdot\tau,\text{pow},f_s,\text{loop}\right)\\
&\qquad F_2\to\text{FT}\left[u,0,\left(1-\frac{1}{n}\right)\cdot\tau,\text{pow},f_s,\text{loop}\right]\\
&\qquad\text{for } f_n\in 0\cdots 2^{(\text{row}-1)}-1\\
&\qquad\qquad \overrightarrow{F_{\text{fn}}}\to\overrightarrow{F_{1_{\text{fn}}}}\cdot\overrightarrow{F_{2_{\text{fn}}}}\\
&\qquad\qquad \overrightarrow{\text{Corf}_{\text{fn}}}\to\overrightarrow{\text{Corf}_{\text{fn}}}+\overrightarrow{F_{\text{fn}}}\\
&\quad\overrightarrow{\text{Corf}}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

其中，函数 Correlation $(s,u,\Delta f,\tau,\text{pow},f_s)$[1] 中，$s$ 和 u 分别为上海和乌鲁木齐台站的 VLBI 观测数据，Δf 为每个分段模型数据的多普勒频移，τ 为时延补偿值，pow 为修正数据段长度指数，f_s 为

采样频率. 算法表达式 (1) 中的 n 为代表延时修正系数.

按照修正算法 (1) 对 14 段数据分别操作, 得到相关相位条纹斜率 (剩余时延) 分布如图 2(c) 及剩余时延变化趋势如图 2(a), 为了评估相位条纹质量也得到了条纹方差分布如图 2(d) 和方差变化趋势如图 2(b).

在图 2(a) 中文件的 1, 4, 8, 9, 14 段文件随着延时系数的修正, 条纹斜率 (剩余时延) 变化趋势明显, 即剩余时延较大, 通过图 2(b) 的方差 [2] 也能够反映出来文件 1, 4, 8, 9, 14 的方差变换趋势明显偏大. 在图 2(c) 对应每个文件序号沿着延时系数的方向看: 1, 4, 8, 9, 14 也是明显有较大的峰值出现, 图 2(d) 对应表现为较大的尖峰方差分布值. 如果将文件 1, 4, 8, 9, 14 去掉就相当于将其他文件的特征进行了放大, 图 3(c) 的曲面波动情况已经表明了这一点, 这样就更加详细了解每个文件的各个时延系数的修正情况. 总的看来, 尽管每个时延模型分段

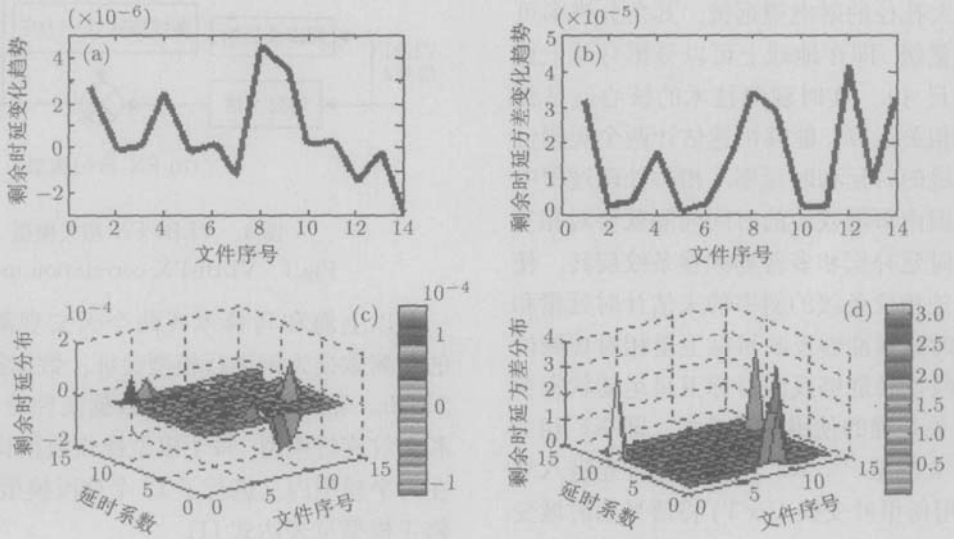


图 2 时延补偿模型

Fig.2 Model of time delay compensation

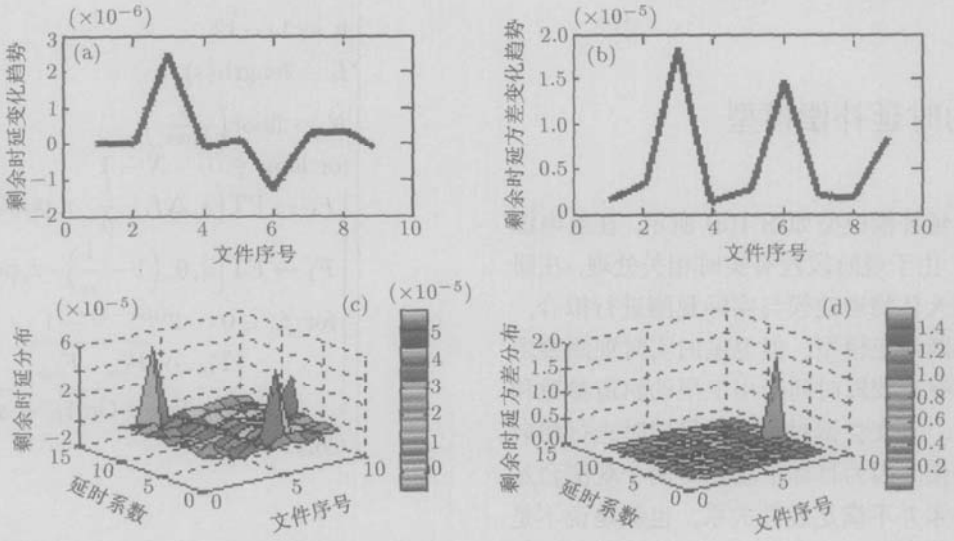


图 3 时延补偿模型

Fig.3 Model of time delay compensation

文件很短，但将其再分成 12 个时延修正模型时每个模型之间的差别还是明显的. 对于精确估计时延就要将修正模型继续分割下去，相当于用显微镜逐渐观察相关相位条纹的细节，使得该方法成为新的一种精确估计 VLBI 观测时延方法. 图 3 是对应图 2 的细节放大结构显示. 剩余时延变化明显的模型如图 3(a), 其方差也就大，见图 3(b).

3 修正相关相位条纹旋转模型

修正的相关相位条纹旋转模型如图 1(b) 所示，由于目标卫星相对两个 VLBI 观测台站的运动状态不同，因此所产生的多普勒频移不同，因此就要将两个信号相位的频率轴旋转到一个方向. 经典的 FX 相关模型中只是旋转一个观测信号的频率轴向另一个信号靠近，本文为了研究多普勒现象对两个台站的 VLBI 观测的影响，采用两个台站的频率相向旋转的方法，使得两个信号频率轴方向一致，分析在各个旋转模型 (旋转系数取值不同) 时对相关相位条纹的影响. 该模型的算法是把表达式 (1) Correlation $(s, u, \Delta f, \tau, \mathrm{pow}, f_s)$ 中的 n 修正项放到多普勒频移项上，表示为旋转系数.

旋转系数的取值范围设定在 1—12, 同样也是对 14 段文件 (文件序号 1—14) 分段研究. 其结果如图 4 所示，其中 4 和 6 号文件随着旋转系数的改变显示出剩余时延的变化比较明显 (图 4(a) 所示), 对应的方差分布趋势也是在较大峰值上 (图 4(b) 所示)，但基本在 10^{-6}—10^{-7} 数量级上, 同时延模型的变化相比，条纹旋转模型的影响程度小 10^3 的数量级. 从图 4(c) 可以看出，同一个文件在不同旋转模型点基本具有相同的颜色 (即相同的坐标), 但各个文件之间的差别还是较大的，图像的曲面的波动比较明显，图 4(d) 就反映了图 4(c) 各个文件在每个旋转模型下的方差分布. 从旁边的彩带数标范围可知方差分布在 0.06—0.14 之间.

前面的时延和条纹旋转修正都是独立进行分析的，为了能够了解在同一个文件时间段内时延和条纹旋转之间的关系，本文采用表达式 (1) 所示的算法将时延和旋转修正结合在一起，即在时延和多普勒频移都加上修正系数, 对前面的第 10 号文件进行时延和旋转的综合分析. 得到如图 5 所示的结果. 结合图 5(a) 和图 5(c) 可以看出在同一时延模型相向旋转两个信号的条纹对剩余时延的影响不大，其变化趋势在 -10^{-7}—10^{-7} 之间 (图 5(a) 所示), 不同时刻的剩余时延也基本在这个范围内. 图 5(d) 显示

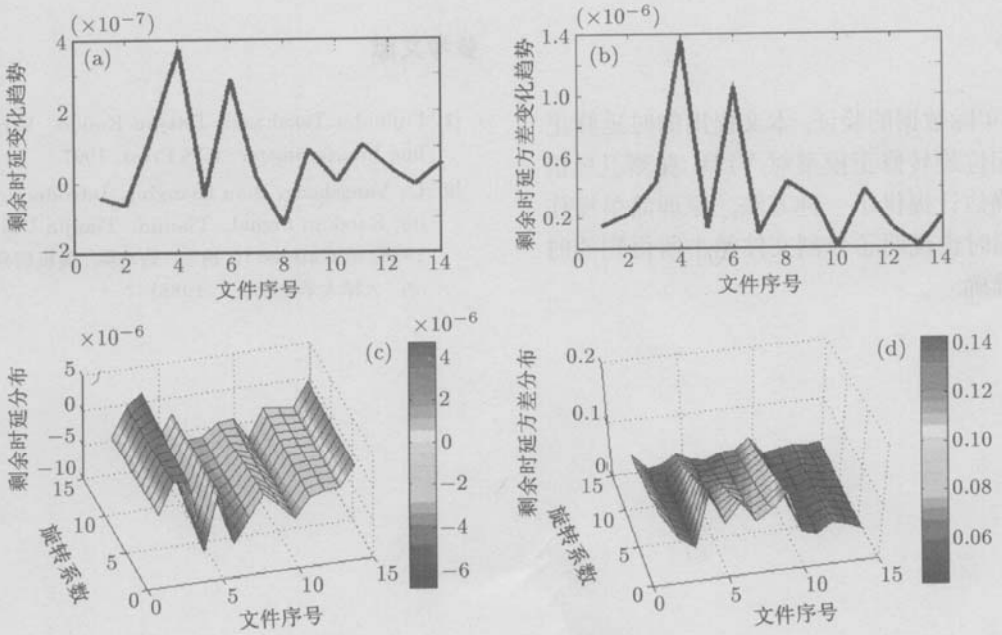


图 4 条纹旋转模型

Fig.4 Model of phase fringe stopping

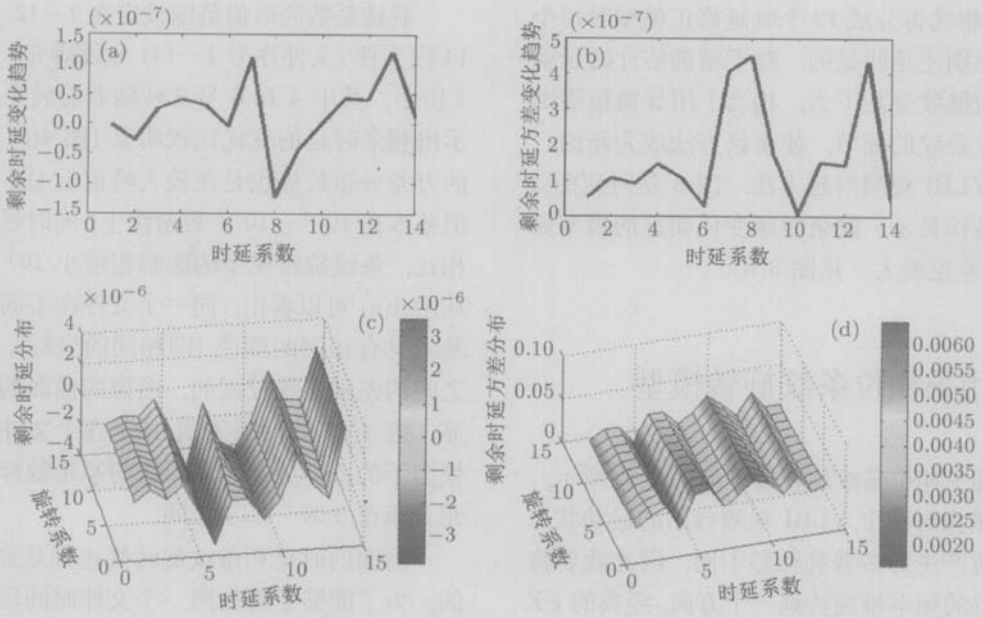


图 5 时延补偿和干涉条纹模型

Fig.5 Model of time delay compensation and model of Phase Fringe Stopping

条纹的方差分布在 0.02—0.06 之间，也明显小于图 4 所示的方差分布范围. 各个时延模型的方差变化趋势也在 10^{-7} 的数量级. 基本可以肯定对同一个文件的同一时延模型条纹旋转基本不影响相关条纹质量和精度.

4 结论

(1) 通过实际数据的验证, 本文提出的时延修正模型和相关相位旋转修正模型对 VLBI 观测卫星信号的时延精确估计提供了一种方法, 原理简单操作方便有效. 同时也说明了分割文件越小所得到的时延模型就越准确.

(2) 本文只对 FX 相关模型进行了时延和条纹旋转修正的研究, 但也能够说明不同的时延模型之间干涉相位条纹旋转量的变化趋势还是非常明显的, 不能简单使用线性模型对两个台站的 VLBI 观测卫星信号进行时延补偿和条纹旋转修正.

参考文献

[1] Fujinobu Takahashi, Tetsuro Kondo. Very Long Baseline Interferometer. IOS Press, 1997

[2] Lu Yangsheng, Bian Dianying. Introduction of Processing Random Signal. Tianjin: Tianjin University Press, 1988. in Chinese (吕扬生, 边莫英. 随机信号处理导论. 天津: 天津大学出版社, 1988)