

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.04.08

VLBI 相位参考中的残余对流层延迟修正

徐双敬^{1,2}, 张 波¹, 王广利^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: VLBI (very long baseline interferometry) 相位参考在高频波段 (约大于 10 GHz) 的主要误差源是对流层延迟模型误差, 减小该项误差的有效途径是采用实测资料对其精确拟合。常用的修正方法有两种: 一种是在相位参考观测中穿插测地观测, 用以拟合剩余大气延迟; 另一种是使用 GPS 并置站的对流层产品改正。两种改正方法的精度约为 2 cm。从残余相位中提取出了残余大气信息, 提出了传统方法与残余相位拟合大气参数相结合的改正方法, 并通过实测数据对该方法进行了验证。

关键词: VLBI; 相位参考; 对流层延迟; 误差修正

中图分类号: P164 **文献标识码:** A

1 引 言

甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 相位参考是一种高精度的天文测量技术, 可以实现 $10 \mu\text{as}$ (微角秒) 的相对测量精度^[1]。它同时或快速交替观测角距很近的一对射电源。由于两者距离很近, 且使用同一观测设备, 通过观测量差分可以有效消除传播介质和仪器延迟的影响, 实现目标源成图以及源的相对位置测定。相位参考技术在弱源成图、射电源的周年视差和自行的测定, 以及深空探测器定位等方面应用广泛^[1]。

相位参考的实施是基于目标源与校准源的角距离很近并假设各种因素的影响基本相同。实际上, 由于角距离并非为零, 观测时间也难以保证完全相同, 因此几何、传播介质以及仪器等延迟的影响在较差相位中并不能完全消除。对于几何延迟, 目前所用模型已考虑台站的潮汐和非潮汐运动, 并采用高精度的台站、源坐标和地球定向参数^[2], 然后将目标源和校准源的相对位置作为待估参数进行求解, 因而其模型精度已经有保障。仪器延迟主要是钟差和电缆延迟等不随天线指向变化的量所导致, 较差后在相位中的影响主要对应于观测时刻上的差异。其变化的长期项可通过观测校准源予以确定并改正, 而短期项相对于大气扰动的影响

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-04-08

资助项目: 国家自然科学基金 (11473057, 11673051); 中国科学院百人计划项目

通讯作者: 王广利, wgl@shao.ac.cn

为小量^[3]。对于传播介质的影响, 电离层影响通常采用全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的全球电离层模型 (global ionosphere model, GIM) 改正^[4, 5]。GIM 的精度为 2 ~ 8 总电子含量的单位 (total electron content unit, TECU), 在 22 GHz 波段, 1 TECU 对应 0.8 mm 的误差, 因此高频波段电离层的影响并不显著。虽然相关处理机已采用了先验的对流层延迟模型, 然而由于其在时间和空间上的高频变化难以建模, 模型误差一般为几厘米 (甚至几十厘米), 因而成为相位参考技术的主要误差源。

为了获得高灵敏度的成图和高精度的相对位置测量, 必须消弱大气模型误差的影响。目标源和校准源的观测时刻不一致产生时间项的误差, 须将参考源的观测相位内插到目标源的观测时刻, 大气在时间上的快速变化限制了内插的精度。常用的摆动观测模式采用快速切换时间和很小的摆动角, 但其限制了观测目标的选取, 也限制了相位参考观测的适用范围。日本 VLBI 天体测量网 (VLBI exploration of radio astrometry, VERA), 使用双波束射电望远镜, 即同一天线具备两个独立的接收机, 从而可同时观测两颗射电源^[6]。该技术可消除时间项的影响, 但不能完全消除空间项的影响。目标源和校准源之间存在一定角距, 从而产生空间项的误差。而由于大气传播的路径不一致, 大气模型难以精确模型化这种差异。目前减小该项误差的有效途径是采用实测资料拟合。常用的方法有两种^[1]: 一种是在相位参考观测中穿插测地观测, 用以拟合剩余大气延迟; 另一种是使用全球定位系统 (global positioning system, GPS) 并置站的对流层产品改正。但这仍然不够精确, 其存在 1 ~ 2 cm 的残余项未能改正^[7]。我们通过对残余相位信息进行建模, 成功实现了残余大气的提取和改正, 并且有效提高成图质量和位置精度。

本文介绍了 VLBI 相位参考对流层的常用改正方法及其不足, 提出了传统方式与残余相位拟合大气相结合的改正方法, 并用实测数据对该方法进行了验证。

2 对流层延迟修正

对流层延迟包括干 (流体静力学的) 延迟和湿延迟。干天顶延迟约占总天顶延迟的 90%, 最大可达 2.3 m, 其相对稳定, 可以通过精确建模进行改正。由于湿分量中可降水气量的高频变化, 湿延迟变化非常迅速, 难以对其建模。湿天顶延迟在干燥地区通常为几厘米, 在潮湿地区可达几十厘米^[8]。干延迟通常在相关处理时采用模型进行改正, 湿延迟改正常用的方法有两种^[1]: 一种是在相位参考观测中穿插测地观测, 用以拟合剩余大气延迟; 另一种是使用 GPS 并置站的对流层产品改正。

2.1 VLBI 测地观测用于改正大气延迟模型偏差

Reid 等人^[9]在利用 1995—1997 年 VLBA 观测资料测定 SGR A* 自行时, 发现间隔几天的两个历元测得的校准源与 SGR A* 的相对位置之差达到 1 mas (毫角秒), 这个差异远大于各历元的形式误差。由于观测条件和数据处理都基本相同, SGR A* 的几何误差不可能产生这种量级的位置偏移, 因此可能是星际介质对射电波的折射和散射作用以及大气中传播延迟模型的误差所导致的。他们分析发现, 星际介质散射作用对相对位置的影响仅有 0.04 mas,

因此校准源与 SGR A* 的位置偏移主要是由大气延迟模型误差所导致。为此, Reid 等人对校准源与 SGR A* 的较差相位进行建模, 待估参数包含两颗源的相对位置偏差和各台站的大气天顶剩余延迟。他们通过最小二乘法拟合求出待估参数, 并改进了相对位置的测量精度^[9]。但该方法对信噪比有较高的要求, 后续观测发现, 其中一颗校准源大幅度变弱, 因此该方法不再适用。随后, 他们又采用了测地观测估计相位参考中大气延迟模型偏差的方法: Geodetic blocks^[10]。

Geodetic blocks 借鉴测地 VLBI 的方法, 通过观测天空中均匀分布的射电源获得宽带群延迟。VLBI 的几何模型计算精度好于 1 cm, 观测位置精度好于 1 mas 的射电源, 群延迟残差主要为对流层 (和低频电离层) 的影响。在相位参考观测的前、中、后 3 个时段, 分别对十几颗位置精确已知的河外强源进行 30 min 的测地观测, 获得宽带群延迟和延迟率数据。对于小于 10 GHz 的低频观测, 还需要利用 GIM 模型消除电离层的影响。在删除了 VLBI 相关处理机中的几何模型计算结果和先验大气模型计算结果之后, 数据主要对应于剩余大气延迟和钟差的影响。通过参数估计, 人们可以改正相位参考观测的相位资料。根据经验, 人们选择高度角大于 8° 的射电源, 确保每颗源可被 3/5 以上的望远镜共视, 并通过蒙特卡罗模拟设计精度最高的方案。频率设置根据测地 VLBI 带宽综合的思想, 将子通道按照最小冗余准则分布在 500 MHz 的带宽范围内, Reid 和 Honma^[1] 算出天顶延迟精确到 30 ps (1 cm)。Geodetic blocks 具有良好的适用性, 对 VLBI 相位参考的精度提升具有重要意义。根据此方法, 天文图像处理系统 (astronomical image processing system, AIPS) 提供了从测地资料中获取延迟和延迟率数据的模块 MBDLY, 以及拟合大气延迟模型偏差的模块 DELZN^[11]。到现在为止, Geodetic blocks 是 VLBI 相位参考中大气修正的经典方法。

图 1 为国际天测与测地 VLBI 服务组织 (International VLBI Service for Geodesy & Astrometry, IVS) 提供的测地 VLBI 实验 17SEP05XA 中上海天文台佘山站的大气天顶延迟随时间的变化, 拟合方法为连续分段线性拟合, 时间分辨率为 1 h。IVS 包括很多分析中心, 各分析中心基于不同的软件和分析策略向 IVS 提供分析结果。IVS 结合德国法兰克福联邦测绘局 (Bundesamt Für Kartographie und Geodäsie, BKG)、意大利航天局空间大地测量中心 (Space Geodesy Center of the Italian Space Agency, CGS) 和俄罗斯科学院应用天文研究所 (Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences, IAA) 三家分析中心的对流层延迟产品, 给出综合结果^[12]。表 1 给出各分析中心与 IVS 综合结果的统计信息, 结果表明测地 VLBI 提供的 24 h 对流层产品的平均偏差小于 0.5 cm, 标准差小于 1 cm。

表 1 各分析中心与 IVS 综合结果的统计^[13]

分析中心	偏差/mm	标准差/mm
BKG - IVS	-3.9	10.4
CGS - IVS	0.4	2.1
IAA - IVS	1.7	4.0

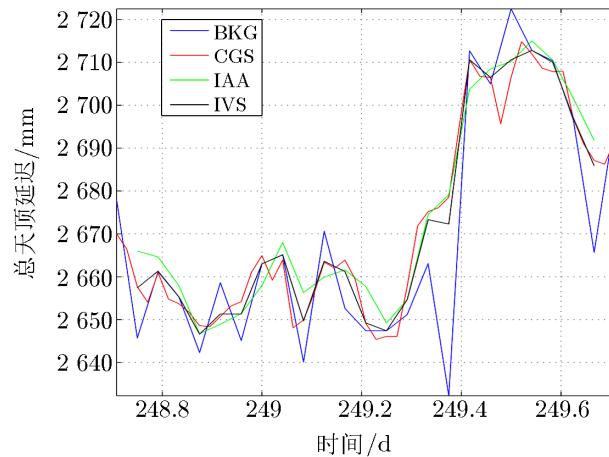


图 1 测地 VLBI 观测 (2017 年 9 月 5 日) 中各分析中心的对流层对比^[13]

2.2 GPS 用于改正大气延迟模型偏差

1998 年国际 GPS 服务组织 (International GPS Service, IGS) 成立了对流层延迟工作组^[14], 综合世界上多家 GPS 数据处理中心的对流层延迟资料, 经过平差处理后得到各台站的对流层天顶延迟, 以每站每天一个文件的形式发布结果。目前最终结果涵盖 400 多个台站, 标称精度为 4 mm, 时间分辨率为 5 min, 从资料到产品的时间小于 30 d。台站数量虽然逐年增加, 但是分布不均匀, 欧洲较为密集, 海洋上较少。

Geodetic blocks 存在一些缺陷, 它占用约 1/5 的观测时间, 而且时间分辨率约为 3 h, 不能得到大气的高频变化^[7]。为此, 张波等人^[7]及 Honma 等人^[8]提出了使用 GPS 数据改正 VLBI 相位参考大气延迟误差的方法。该方法已成为 VERA 修正大气延迟的常规方法^[8]。

针对 VLBI 和 GPS 对流层对比的研究工作有很多, 从两周到十年的时间尺度上, 两者的符合度为毫米级^[15-17]。但是, VLBI 相位参考观测的时间通常为几小时, 在小时级的短期尺度上, 两者的差异可达 2 cm^[7]。图 2 为 IVS 和 IGS 提供的测地 VLBI 实验 17SEP05XA 中上海天文台佘山站对流层天顶总延迟的比较, 其中 IGS 结果来自 NASA 的 CDDIS 数据库。在 24 h 尺度上两者的变化趋势符合良好, 偏差为 -2.6 mm, 均方根为 7.6 mm。细分到小时级, 可以看出两者存在 1 ~ 2 cm 的偏差。在连续两天的交接时刻, GPS 的结果不连续是因为每天的结果是独立解算的, 表明 GPS 的对流层产品存在系统误差, 需要对该系统误差进行修正。假设观测位于南纬 20° 的一对射电源, 其角距为 1°, 2 cm 的天顶延迟对位置偏差的贡献超过 100 μas ^[8, 18]。厘米级的天顶延迟误差仍是 VLBI 相位参考的主要误差源之一, 因此该项误差不可忽略。

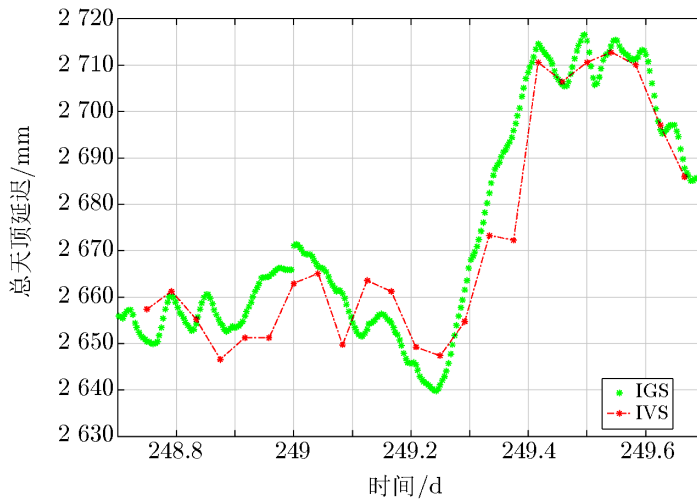


图 2 测地 VLBI 观测 (2017 年 9 月 5 日) 中 IVS 与 IGS 的对流层天顶延迟

3 残余大气改正

人们使用 Geodetic blocks 或 GPS 方法改正, 发现对流层延迟的主要误差和趋势项被消除, 剩下约 2 cm 的残差。残余大气中包含常数偏差 (ZTD) 和可能的变化趋势项, 这些效应都会反映在相位参考的残余相位中。我们在 Reid 早年使用的相位拟合 (phase-fitting)^[9, 19] 的基础上提出了利用残余相位拟合残余对流层延迟的方法。

3.1 原理

VLBI 的时延观测量包含几何延迟、对流层延迟、电离层延迟、仪器误差、射电源结构效应和热噪声^[20]。我们通常认为在传统相位参考中, 由于使用相同观测设备, 因此经过差分处理后, 仪器误差完全消除。电离层延迟可以通过 GIM 模型或双频技术改正, 对流层延迟可以使用 Geodetic blocks 或 GPS 改正。校准源的结构可以通过自校准改正。传统相位参考的表达式为^[20]:

$$\Delta\phi_{\text{obs}} = -(u \cdot \cos\delta_S \cdot \Delta\alpha_S + v \cdot \Delta\delta_S) + \phi_{\text{struc,T}} + \varepsilon_{\Delta\phi} + n, \quad (1)$$

式中, $\Delta\phi_{\text{obs}}$ 为相位参考观测相位差, $\Delta\alpha_S$ 和 $\Delta\delta_S$ 分别表示目标源的赤经差和赤纬差, u 和 v 为目标源在 UV 平面的位置, $\phi_{\text{struc,T}}$ 为目标源的结构相位, $\varepsilon_{\Delta\phi}$ 为热噪声, n 为模糊度。

简单来说, 对流层延迟可近似模型化为天顶延迟与观测天顶距余弦倒数的乘积。由于两颗观测源间存在一定角距, 因此天线到两颗源方向上的较差相位可表示为^[9]:

$$\Delta\phi_{\text{tr}} = \Delta\phi_z \cdot (\sec z_t - \sec z_c), \quad (2)$$

式中, $\Delta\phi_{\text{tr}}$ 为两颗源的较差大气相位, $\Delta\phi_z$ 为残余的天顶延迟相位, z_t 和 z_c 分别为目标源和校准源的天顶距。这样对于一条存在残余大气的基线 (天线 1, 2), 其相位参考表达式为:

$$\Delta\phi_{\text{obs}} = -(u \cdot \cos \delta_S \cdot \Delta\alpha_S + v \cdot \Delta\delta_S) + \phi_{\text{struc},T} + \varepsilon_{\Delta\phi} + n + \Delta\phi_{z,1}(\sec z_{t,1} - \sec z_{c,1}) - \Delta\phi_{z,2}(\sec z_{t,2} - \sec z_{c,2}) . \quad (3)$$

若目标源存在结构, 可以先进行自校准得到其结构相位。这样, 式 (3) 中未知量包括 2 个源位置参数、2 个大气天顶延迟参数和 1 个模糊度参数。通过综合 VLBI 观测阵列的多条基线, 可以同时求解两个源位置参数和各个台站的大气天顶延迟参数及模糊度参数。解算之前需要对各基线进行相位解缠 (相位连接) 以及各台站间相位闭合。

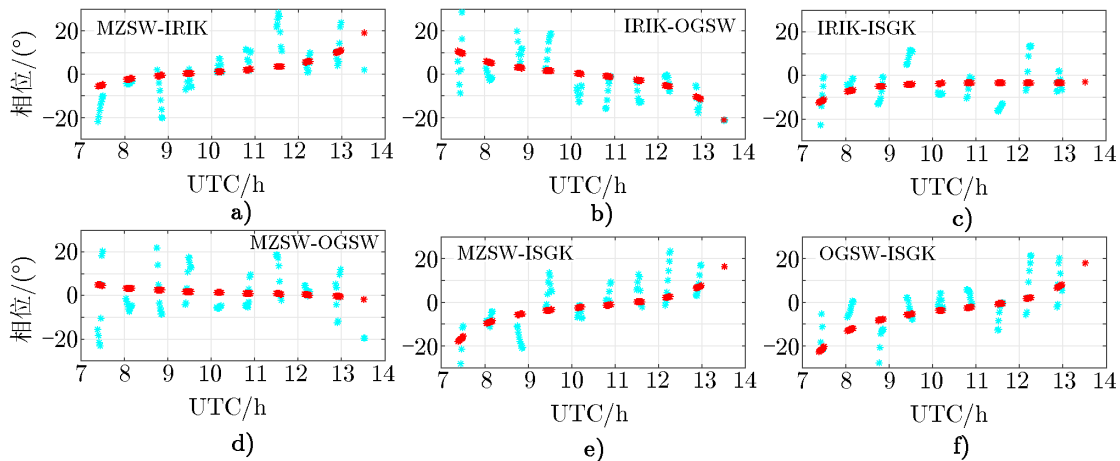
3.2 处理方法

下面以 4.1 节的 VERA 数据为例, 介绍实际操作中的处理方法。首先对目标源进行自校准, 得到其结构相位。然后同时输出结构相位和相位参考的较差相位。将两者进行做差, 得到扣除源结构效应的残余相位。如果残余相位存在野点, 需要将野点剔除。应用式 (3) 求解两个源位置参数、每个测站的残余大气参数和模糊度参数。

表 2 列出两次 VERA 观测拟合的相关参数, 结果显示残余大气的值约为 2 cm, 这与之前的结果相符^[7]。其中 ISGK 和 OGSW 站的残余大气偏差超过了 2 cm, 可能的原因是两个台站处于孤岛上, 其 GPS 的结果不够精确。图 3 显示为观测 R11036A 的扣除位置偏差后的残余相位与残余大气效应的模型相位, 模型相位较好地拟合了残余相位的趋势项。

表 2 相位拟合参数

观测代码	观测时段	赤经偏差/mas	赤纬偏差/mas	MZSW/cm	IRIK/cm	OGSW/cm	ISGK/cm
R10272B	15:00—22:00	-0.115 ± 0.034	0.434 ± 0.047	0.97 ± 0.16	1.37 ± 0.28	2.05 ± 0.27	2.47 ± 0.43
R11036A	07:00—14:00	-0.032 ± 0.027	0.444 ± 0.039	1.43 ± 0.15	1.97 ± 0.24	2.42 ± 0.26	4.02 ± 0.35



注: 浅蓝色点为残余相位, 红色点为残余大气模型相位。

图 3 实验 R11036A 的残余相位与残余大气模型相位

在参数求解时使用最小二乘法进行计算。该方法对数据的信噪比有一定要求，因为信噪比会直接影响残余相位的拟合残差。各台站间大气参数的相关性也会影响大气参数的拟合精度。以观测 R11036A 为例，其残余相位的拟合残差约为 10° ，因此其大气参数的计算精度约为 2.5 mm。由此推断，若使大气参数的计算精度好于 1 cm，则 VERA 数据残余相位的精度应该不高于 40° 。

4 实测数据应用

为了排除交替观测引入的时间项误差以及电离层的影响，我们选用了日本国立天文台 VERA 网的双波束高频数据。的 VERA 网包含 4 个测站，即水泽 (Mizusawa, MZSW)、入来 (Iriki, IRIK)、小笠原 (Ogasawara, OGSW) 和石垣岛 (Ishigaki, ISGK)，最长基线为 $2270 \text{ km}^{[21]}$ 。它是目前唯一专注于天体测量的 VLBI 网，包含 S/X, K, Q 共 4 个频段。S/X 波段用于参加 IVS 的测地观测，以便获得精确的台站坐标。VERA 常规工作在 K 和 Q 波段，通过测量水脉泽和氧化硅脉泽的周年视差来精确测量银河系结构。为了减弱大气效应的影响，有效提高积分时间，VERA 设计了独有的双波束技术，通过机械臂控制两个接收机间的位置来观测不同角距的目标，目标角距限制为 $2.2^\circ^{[22]}$ 。

4.1 数据

我们从 VERA 的 K 波段档案数据中，选择了一对间距为 2° 的强源观测，其参数列于表 3。强源可以有效降低热噪声，提高相位的精度，从而提高残余大气的拟合精度。表 4 为所使用的两次观测数据的信息，每次观测有效时长为 7 h。

表 3 射电源参数

源名	赤经	赤纬	位置误差/mas	流量密度/Jy (23 GHz)
J0423-0120	04h23min15.8007s	$-01^\circ 20' 33.066''$	0.10	1.20
J0424+0036	04h24min46.8421s	$+00^\circ 36' 06.329''$	0.10	0.24

注：表中位置信息源于 RFC (Radio Fundamental Catalog)^[23]，流量信息来自此观测。

表 4 观测信息

观测代码	观测日期	频率/GHz	中频数/MHz	带宽	通道数	分辨率/mas
R10272B	2010-09-29	23.5	1	128	256	1.0×1.0
R11036A	2011-02-05	23.5	1	128	256	1.0×1.0

4.2 数据处理

VLBI 相位参考的传统处理采用 AIPS 软件，包括以下几个步骤：数据导入、星位角改正、地球定向参数 (earth orientation parameter, EOP) 改正、电离层改正、对流层改正、幅度校准、条纹拟合、带通校准、相位参考成图以及位置拟合等^[24]。

VERA 在进行数据处理时, 由于使用双波束接收机, 信号到达两个接收机的时间不一致, 因此 VERA 提供了双波束改正文件^[22]。因为其接收机可以自动调节星位角, 所以不需要再进行星位角改正。VERA 的站坐标不稳定, 因此我们在进行相关处理时, 使用的站坐标不精确。VERA 的台站少且基线短, 使用 Geodetic blocks 得到的大气参数精度不高, 所以 VERA 对大气的改正采用 GPS 方法^[8], 但用户使用 GPS 数据进行改正的过程较繁琐。为了解决这些问题, 简化处理过程, VERA 由专人负责向用户提供时延改正文件。该文件中使用了精确的站坐标、源坐标和 EOP 参数, VERA 利用 GIM 改正电离层, 以及使用 GPS 数据对对流层进行改正。我们对数据处理过程中的相位校准进行了简化, 即使用双波束改正文件校准双波束延迟, 使用时延改正文件改正时延模型误差。

下面从成图质量和位置精度两个方面, 对比传统处理方式与进行残余大气改正后的结果。残余大气改正后的处理, 是将表 2 中拟合得到的大气参数, 在 AIPS 使用任务“CLCOR”中的参数“ATMOS”进行改正, 并重新进行相位参考操作^[24]。

4.3 结果

以 J0423-0120 为校准源, 我们得到目标源 J0424+0036 的图像 (见图 4) 和位置参数 (见表 5)。经残余大气改正后, R10272B 的峰值流量密度由 168.9 mJy 增加到 170.9 mJy, R11036A 的峰值流量密度由 174.5 mJy 增加到 180.0 mJy。两次观测的位置不符, 赤经方向 (dX) 由 65 μas 提升到 31 μas , 赤纬方向 (dY) 由 65 μas 提升到 43 μas 。成图质量和位置精度均得到有效提升。结果证实了残余大气效应的存在, 以及改正方法的有效性。

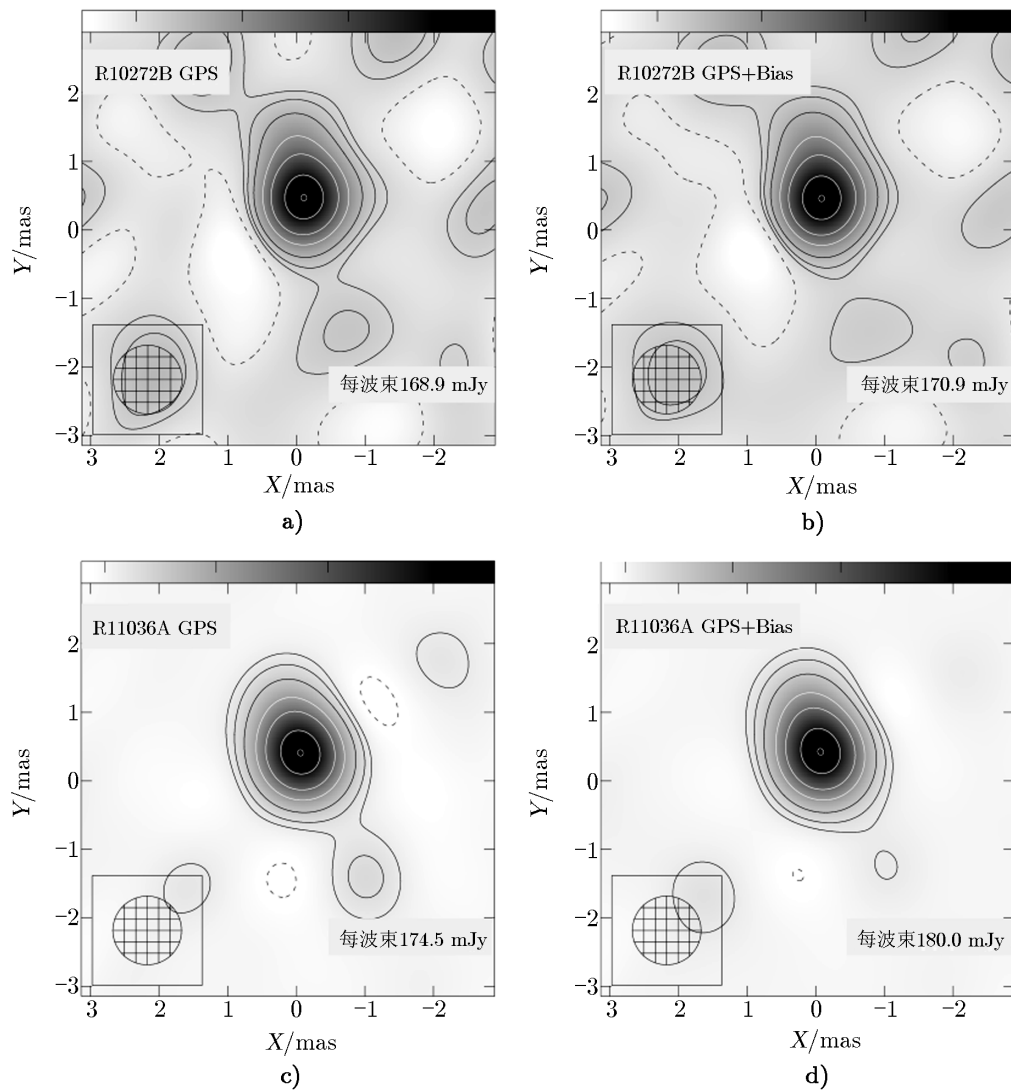
表 5 基于不同方法的 J0424+0036 相位参考拟合参数

观测代码	改正方法	峰值流量/mJy	赤经偏差/ μas	赤纬偏差/ μas
R10272B	传统方法	168.9 ± 4.7	-123 ± 12	481 ± 14
	传统方法 + 残余大气改正	170.9 ± 4.5	-97 ± 12	478 ± 13
R11036A	传统方法	174.5 ± 1.8	-58 ± 4	416 ± 5
	传统方法 + 残余大气改正	180.0 ± 1.4	-66 ± 3	435 ± 4

5 讨论与总结

我们的工作表明, 目前 VLBI 相位参考中存在约 2 cm 的残余大气效应, 这一重要误差需要进一步修正。我们提出了传统处理方法与残余相位拟合大气参数相结合的改正方法, 并通过实测数据分析证实了该方法的有效性。

但如 3.2 节所述, 相位拟合的方法对数据的信噪比有一定要求, 因此, 对于信噪比较差的数据, 我们还使用 Geodetic block (或 GPS) 与图像最优法相结合的方式实现了残余对流层延迟的改正^[25]。图像最优法的原理与相位拟合法相同, 不同的是相位拟合法通过对残余相位进行拟合, 求解残余的对流层延迟; 而图像最优法则是为每个台站给出一组一定步长的大气偏差, 每个台站依次改正不同的大气偏差值并成图, 最终从中选取图像最优的结果。Honma



注: a) R10272B(传统方法); b) R10272B (传统方法 + 残余大气改正); c) R11036A (传统方法); d) R11036A 传统方法 + 残余大气改正。每束等值线图为 $1.7 \times (-4, 4, 8, 16, 32, 50, 80, 99)$ mJy。

图 4 基于不同方法的 J0424+0036 相位参考图像

等人^[8]之前提出图像最优法,但未发表过科学结果。之后 GPS 方法取代了图像最优法。我们将该方法成功应用于残余对流层延迟的改正,获得了红超巨星 VX Sgr 的精确距离^[25]。相位拟合法的求解过程简单可靠;图像最优法的操作过程繁琐,但适用于弱源数据,用户可根据数据的特点选择使用。

除上述方法外,还有以下几种方法也可应用于相位参考的大气修正。

多校准源相位参考是选择两颗以上的校准源,利用多颗源的残余相位拟合并消除二维平

面上的大气梯度。该技术已成功应用于相位参考的大气修正^[26, 27]。其优点是可用于低频电离层的改正, 受限因素是对校准源的分布和强度有一定要求。

频率相位转移是一种多频率相位参考技术, 它在两个整数倍关系的频率间同时或快速切换观测, 利用低频上高信噪比相位乘以频率倍数来校准高频相位^[28, 29]。该技术可有效消除大气的影响, 延长高频数据的积分时间, 实现高频成图, 并测量频率间的核移。频率相位参考的优势是可应用于毫米波的高频数据和高精度的核移测量; 但其不能得到相对于参考源(如河外源)的位置, 不适用于视差和自行等绝对位置变化的测量。

利用实测数据修正大气的方法, 多是基于天顶延迟和映射函数的关系。但映射函数只是对观测高度角进行建模, 不能反映水平方向上的误差。为了获得更高精度的结果, 需要在观测视线方向上直接进行大气改正。利用数值气象模型对大气传播路径进行积分的射线追踪技术, 以及水汽辐射仪(water vapour radiometer, WVR)技术, 有望在视线方向上改正大气误差^[30]。但射线追踪技术还需要进一步提升精度, WVR 需要解决降雨天气、亮温校准、价格过高等问题。目前通过 VLBI 视差测量的距离已经突破 20 kpc^[31], 需要更深入地研究大气改正问题。

致谢

感谢 VERA 团队的 Mareki Honma 和 Tomoaki Oyama 提供研究数据; 感谢 Noriyuki Kawaguchi, Nobuyuki Sakai, Takumi Nagayama 等人在数据处理方面提供的帮助。

参考文献:

- [1] Reid M J, Honma M. *ARA&A*, 2014, 52: 339
- [2] Sovers O J, Fanselow J L, Jacobs C S. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70: 1393
- [3] Wrobel J M, Walker R C, Benson J M. *VLBA Scientific Memorandum* 24, 2000
- [4] Walker C, Chatterjee S. *VLBA Scientific Memorandum* 23, 1999
- [5] Ros E, Marcaide J M, Guirado J C, et al. *A&A*, 2000, 356: 357
- [6] Kawaguchi N, Sasao T, Manabe S. *Proc SPIE*, 2000, 4015: 544
- [7] Zhang B, Zheng X W, Li J L, et al. *ChJAA*, 2008, 8: 127
- [8] Honma M, Tamura Y, Reid M J. *PASJ*, 2008, 60: 951
- [9] Reid M J, Readhead A C S, Vermeulen R C, et al. *ApJ*, 1999, 524: 816
- [10] Reid M J, Brunthaler A. *ApJ*, 2004, 616: 872
- [11] Mioduszewski A J, Kogan L. *VLBA Scientific Memorandum* 110, 2004
- [12] Heinkelmann R, Böhm J, Bolotin S, et al. *Journal of Geodesy*, 2011, 85: 377
- [13] Heinkelmann R. *Tropospheric Combination Center*, <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/space-geodetic-techniques/projects/ivs-tropospheric-combination-center/>, 2018
- [14] IGS Working Groups. <http://www.igs.org/wg>, 2018
- [15] Steigenberger P, Tesmer V, Krügel M, et al. *Journal of Geodesy*, 2017, 81: 503
- [16] Ning T, Haas R, Elgered G, et al. *Journal of Geodesy*, 2012, 86: 565
- [17] Teke K, Nilsson T, Böhm J, et al. *Journal of Geodesy*, 2013, 87: 981
- [18] Pradel N, Charlot P, Lestrade J F. *A&A*, 2006, 452: 1099
- [19] Brunthaler A, Reid M J, Falcke H. *Future Directions in High Resolution Astronomy*, 2005, 340: 455

- [20] Beasley A J, Conway J E. Very Long Baseline Interferometry and the VLBA, 1995, 82: 327
- [21] VERA Status Report. <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/CFP2018A/status18A.pdf>, 2017
- [22] Honma M, Kijima M, Suda H, et al. PASJ, 2008, 60: 935
- [23] Astrogeo Center. <http://astrogeo.org>, 2018
- [24] Astronomical Image Processing System. <http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>, 2018
- [25] Xu S, Zhang B, Reid M J, et al. <https://arxiv.org/pdf/1804.00894.pdf>, arXiv:1804.00894, 2018
- [26] Fomalont E B. Future Directions in High Resolution Astronomy, 2005, 340: 460
- [27] Rioja M J, Dodson R, Orosz G, et al. AJ, 2017, 153: 105
- [28] Middelberg E, Roy A L, Walker R C, et al. A&A, 2005, 433: 897
- [29] Rioja M, Dodson R. AJ, 2011, 141: 114
- [30] Nilsson T, Böhm J, Wijaya D D, et al. Path Delays in the Neutral Atmosphere, 2013, 73: 136
- [31] Sanna A, Reid M J, Dame T M, et al. Science, 2017, 358: 227

Residual Tropospheric Delay Calibration in VLBI Phase-referencing

XU Shuang-jing^{1,2}, ZHANG Bo¹, WANG Guang-li^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Among the various error sources in VLBI phase referencing, uncompensated tropospheric delays typically dominate systemic errors at observing frequencies ($\gtrsim 10$ GHz). Generally, the tropospheric delays can be calibrated by geodetic-like VLBI observing blocks or by using co-located GPS observations. However, the derived tropospheric delay offsets from these two methods are sometimes greater than 2 cm, this implies that there are still residual tropospheric delays, which limit the quality of phase-referenced image and the astrometry accuracy. In this paper, we propose a two-step method of tropospheric delay calibration, which combines the VLBI geodetic-block (or GPS) calibration with an image-optimization calibration. We analyze archived VLBI data using this method, both image quality and astrometry accuracy are improved.

Key words: VLBI; phase-referencing; atmospheric delay; error correction