

判断与消除河外射电源表之间 局部相对形变的方法评述

李金岭 金文敬

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

详细讨论了判断与消除河外射电源表之间局部相对形变的几种方法,结合实例分析了各自的特点和适用范围,指出弧长差方法是目前最有效的和实用的消除局部相对形变的方法。

关键词 参考系 — 星表 — 方法: 数据分析

1 引 言

由于各测站网地理分布情况、各河外射电源被观测的强度、各资料分析中心采用的归算方法、不同时期解算参数的侧重点和参考架指向的确定方法等方面不完全相同,即使由同一资料分析中心提供的两本河外射电源表之间,往往也会存在整体的相对旋转和局部的相对形变。由于不存在绝对标准,并缺少必要的理论依据和观测基础,在实际工作中很难建立统一的模型来描述局部相对形变的所在天区、幅度和判断其真正的来源。但是,在评比不同的源表、利用观测表选择综合表的基本(或定义)源、对参考架进行指向维持等项工作中,如何有效地判断与消除局部相对形变的问题却是无法回避的。如果这一问题解决得不够彻底,局部相对形变必将影响参考架指向参数的确定,进而造成其指向的漂移和降低射电源的坐标精度,给相关的理论研究和实际应用带来不必要的麻烦。

目前已经存在一些判断与消除局部相对形变的方法,在本文中力求对它们进行综合的分析与比较,阐明各自的特点、适用范围与实际效果。

2 局部相对形变的判断方法

若 A_1 、 A_2 、 A_3 (均为小量)是第二(河外射电源)表到第一表绕 x 、 y 、 z 轴的旋转

角, 第 j 颗共同源在两个表中的赤道坐标分别为 $(\alpha_{2j}, \delta_{2j})$ 和 $(\alpha_{1j}, \delta_{1j})$, 则它们之间的关系如下^[1]:

$$\begin{aligned} & A_1 \cos \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} + A_2 \sin \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} - A_3 \cos \delta_{2j} \\ & = (\alpha_{1j} - \alpha_{2j}) \cos \delta_{2j} \\ & - A_1 \sin \alpha_{2j} + A_2 \cos \alpha_{2j} = \delta_{1j} - \delta_{2j} \end{aligned} \quad (1)$$

由 (1) 式第一个方程可得:

$$(\Delta\alpha_j + A_3) \operatorname{ctg} \delta_{2j} = B \sin(\alpha_{2j} + \psi) \quad (2)$$

$$(\Delta\alpha_j + A_3) \operatorname{csc}(\alpha_{2j} + \psi) \cos \delta_{2j} = B \sin \delta_{2j} \quad (3)$$

由 (1) 式第二个方程可得:

$$\Delta\delta_j = -B \sin(\alpha_{2j} + \phi) \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta\alpha_j & = \alpha_{1j} - \alpha_{2j} \\ \Delta\delta_j & = \delta_{1j} - \delta_{2j} \\ B & = (A_1^2 + A_2^2)^{1/2} \\ \psi & = \operatorname{arctg}(A_1/A_2) \\ \phi & = -\operatorname{arctg}(A_2/A_1) \end{cases} \quad (5)$$

可见, B 、 ψ 和 ϕ 是由两个表之间的相对旋转角所确定的常数。

由于河外射电源表中所列源的坐标带有偶然误差, 而两个河外射电源表之间则可能存在局部相对形变, 因而 (2)、(3)、(4) 各式应该表示为如下形式:

$$(\Delta\alpha_j + A_3) \operatorname{ctg} \delta_{2j} = B \sin(\alpha_{2j} + \psi) + f_{1j} + v_{1j} \quad (6)$$

$$(\Delta\alpha_j + A_3) \operatorname{csc}(\alpha_{2j} + \psi) \cos \delta_{2j} = B \sin \delta_{2j} + f_{2j} + v_{2j} \quad (7)$$

$$\Delta\delta_j = -B \sin(\alpha_{2j} + \phi) + f_{3j} + v_{3j} \quad (8)$$

其中, f_{1j} 、 f_{2j} 和 f_{3j} 对应于两个表在第 j 共同源处的局部相对形变; v_{1j} 、 v_{2j} 和 v_{3j} 是偶然误差。

从 (8) 式可见, 当两个河外射电源表之间的共同源数足够多, 且局部相对形变较小时, 如果两个表所对应的参考架的指向一致, 则 (8) 式右边仅剩一项偶然误差。如果将共同源的赤纬坐标之差对赤经坐标或赤纬坐标点图, 那么图形应该不含有任何趋势项和周期项, 而应该是一个方差与源坐标的误差相符合均值为零的白噪声。换言之, 在共同源数足够多的情况下, 如果将两个河外射电源表中共同源的赤纬坐标之差对赤经坐标或对赤纬坐标点图, 若图形不是一个方差与源坐标的误差相符合均值为零的白噪声, 则可以断定, 要么两个表所对应的参考架的指向不一致, 要么含有局部相对形变, 或是两者兼而有之。

我们可以对 (6)、(7) 两式作类似的讨论, 但是此两式等号左边的物理意义不如 (8) 式那样清晰, 而且事前 A_3 是未知的, 其值需要从数据拟合中得到。对数据进行拟合时涉及到如何合理选取模型的问题, 这也正是在本文中所要讨论的关键问题。虽然 (6)、(7)、(8) 三式

都可以用于判断局部相对形变, 但 (8) 式却是最简单和最直观的方法, 因而也是最实用的方法。

3 局部相对形变的消除方法

如上所述, (1) 式仅仅表示了两个射电源表之间存在小角旋转的情况之下, 共同源坐标之间的相对关系。实际情况下, 源表之间通常均存在局部相对形变, 如果继续由 (1) 式确定两个源表之间的相对旋转, 结果将受到局部相对形变的影响。目前存在三种解决这一矛盾的方法, 一是对 (1) 式附加参数, 期望同时求解相对形变与旋转; 二是直接解算相对旋转, 并希望通过统计手段消除相对形变; 三是首先将局部相对形变扣除, 然后再解算参考架之间的指向差异。

第一种方法包括分别于 1993 年和 1994 年出版的 1992 年和 1993 年国际地球自转服务 (IERS) 年报中所采用的方法 (分别简称为 IERS93 方法和 IERS94 方法), 其观测方程分别为 [2,3] :

$$\begin{aligned} & A_1 \cos \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} + A_2 \sin \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} - A_3 \cos \delta_{2j} - B_1 \sin \alpha_{2j} + B_2 \cos \alpha_{2j} \\ & = (\alpha_{1j} - \alpha_{2j}) \cos \delta_{2j} \\ & - A_1 \sin \alpha_{2j} + A_2 \cos \alpha_{2j} - B_1 \cos \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} - B_2 \sin \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} + B_3 \cos \delta_{2j} \\ & = \delta_{1j} - \delta_{2j} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & A_1 \cos \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} + A_2 \sin \alpha_{2j} \sin \delta_{2j} - A_3 \cos \delta_{2j} + D_\alpha (\delta - \delta_0) \\ & = (\alpha_{1j} - \alpha_{2j}) \cos \delta_{2j} \\ & - A_1 \sin \alpha_{2j} + A_2 \cos \alpha_{2j} + D_\delta (\delta - \delta_0) + B_6 = \delta_{1j} - \delta_{2j} \end{aligned} \quad (10)$$

(9) 式中的 B_1 、 B_2 、 B_3 称为辅助参数, 是在 (1) 式基础上对赤经坐标之差的方程人为附加了类似于赤纬方向的改正, 而对赤纬坐标之差的方程人为附加了类似于赤经方向的改正。期望通过附加这三个参数之后, 可以部分地吸收主要表现在赤纬方向上的局部相对形变。(10) 式中 D_α 、 D_δ 和 B_6 分别为赤经、赤纬方向上的漂移和对赤道 ($\delta_0 = 0$) 的改正, 增加这三个参数的出发点是希望尽量能够利用同一方程将相对旋转和相对形变一道解算出来。

IERS 自 1988 年至 1992 年和 1995 年都采用第二种方法 [4-9], 其观测方程即为 (1) 式 (下文简称 IERS95 方法), 希望通过加权拟合与剔除野值的方法, 在一定程度上限制并消除局部相对形变, 进而确定河外射电源表之间的相对旋转和选择基本源。

弧长差 (ALD arc length difference) 方法属于第三种, 其主要依据为, 如果河外射电源表之间不存在局部相对形变, 那么即使在某两个源表所对应的参考架的指向不一致的情况下, 连接共同源的相应弧段的长度亦应相等。而当部分源所在天区存在相对形变时, 则它将一定程度地反映在共同弧段的长度之差上。因而, 通过比较两个源表的共同弧段的长度, 剔除那些较大的弧长差所对应的射电源, 以求消除局部相对形变。可见, 该方法能够从本质上将相对指向差异与局部相对形变分离开来, 避开了两者相互影响的矛盾。文献 [10] 详细论述了弧长差方法的具体实现过程。

以上介绍的是各种消除局部相对形变的方法的基本原理, 其实际效果只能通过实践加以检验。

4 实例分析

RSC(GSFC) 93 R 05^[11] 是哥达德空间飞行中心河外射电源系列表中较具代表性的一个, 而 RSC(JPL) 92 R 02^[12] 曾连续 2 年被采用为 IERS 天球参考架的定义表。RSC(IERS) 92 C 01^[8] 是在 5 个表的基础之上组建的, RSC(IERS) 93 C 01^[2] 则是在 9 个表的基础上组建的。下文中分别将这 4 个表简称为 G93、J92、I92 和 I93, 它们的一般情况列于表 1。

表 1 采用的四个河外射电源表的一般情况

表名	总源数	坐标精度 /mas	赤纬范围 /°	参考文献
RSC(GSFC) 93 R 05	449	2.09	-82,+86	[11]
RSC(JPL) 92 R 02	333	0.61	-82,+85	[12]
RSC(IERS) 92 C 01	422	4.85	-82,+85	[9]
RSC(IERS) 93 C 01	504	1.76	-82,+86	[2]

河外射电源表对 G93 和 J92 有共同源 280 颗, 利用 IERS93、IERS94、IERS95 和 ALD 四种方法分别进行处理, 部分结果列于表 2, 从中可见, G93 和 J92 之间存在指向差异, 这主要是各自参考架指向确定方法的不同而引起的。G93 的赤经零点是通过 0420-014 确定的, 而 J92 是将指向限定在 I92 的指向上。表 2 中数据同时说明, 不同方法所对应的旋转角之间是有区别的, 已超出误差水平, 这反映了合理选取模型的重要性。另外, IERS 方法中所附加的部分参数也非常显著, 但却并不能由此得出结论: G93 和 J92 之间存在较大的局部相对形变, 或附加参数是有效的。这是因为: (1) 并非所有参数均具有明确的物理意义, 其数值仅是数学意义上的拟合结果; (2) 附加参数仅仅表达了一种推断或期望, 其实际效果是有待检验的。

表 2 用不同方法处理 G93 和 J92 所得结果的比较

方法	剔除源数	保留源数	拟合结果 /mas		
IERS93	11	269	$A_1 = -3.82 \pm 0.02$	$A_2 = -0.48 \pm 0.02$	$A_3 = 2.38 \pm 0.01$
			$B_1 = 0.04 \pm 0.02$	$B_2 = -0.02 \pm 0.01$	$B_3 = -0.49 \pm 0.01$
IERS94	10	270	$A_1 = -3.85 \pm 0.02$	$A_2 = -0.51 \pm 0.01$	$A_3 = 2.38 \pm 0.01$
			$D_\alpha = 0.01 \pm 0.03$	$D_\delta = 0.48 \pm 0.02$	$B_\delta = -0.55 \pm 0.02$
IERS95	21	259	$A_1 = -3.85 \pm 0.02$	$A_2 = -0.52 \pm 0.01$	$A_3 = 2.38 \pm 0.01$
ALD	143	137	$A_1 = -3.79 \pm 0.02$	$A_2 = -0.51 \pm 0.02$	$A_3 = 2.34 \pm 0.01$

从表 2 可见, 各方法均不同程度地剔除了源, 并得到了保留源之间的旋转参数。如果所用模型合理时, 那么当将对应的相对旋转从保留源的坐标中扣除, 并依据对 (8) 式的讨论, 将此时的赤纬坐标差分别对赤经和赤纬点图, 则图形应该为方差与源坐标的误差相符和均值为零的白噪声。图 1 即是如此处理后的结果, 并增加了原始数据以便于比较。图 1 中, 左侧 5 幅图是赤纬坐标差对赤经的分布, 右侧 5 幅图是赤纬坐标差对赤纬的分布, 自上至下依次对应于未经任何处理的原始数据、经过 1992 年 IERS 年报、1993 年 IERS 年报、1994 年 IERS 年报中采用的方法和 ALD 方法处理之后的结果。

根据对 (8) 式的讨论和甚长基线干涉测量中大多数常规观测的射电源的坐标精度已经高于 1mas 的事实, (a)、(b) 两分图均显示了 G93 和 J92 之间存在相对旋转和局部形变。

图 1 中 (c)、(e)、(g) 之间既有一些细微的差别, 也有明显的共性。比如在赤经为 20° 至 80° 的天区, (e) 分图显示大部分源的赤纬坐标相近, (c) 分图显示 G93 中源的赤纬坐

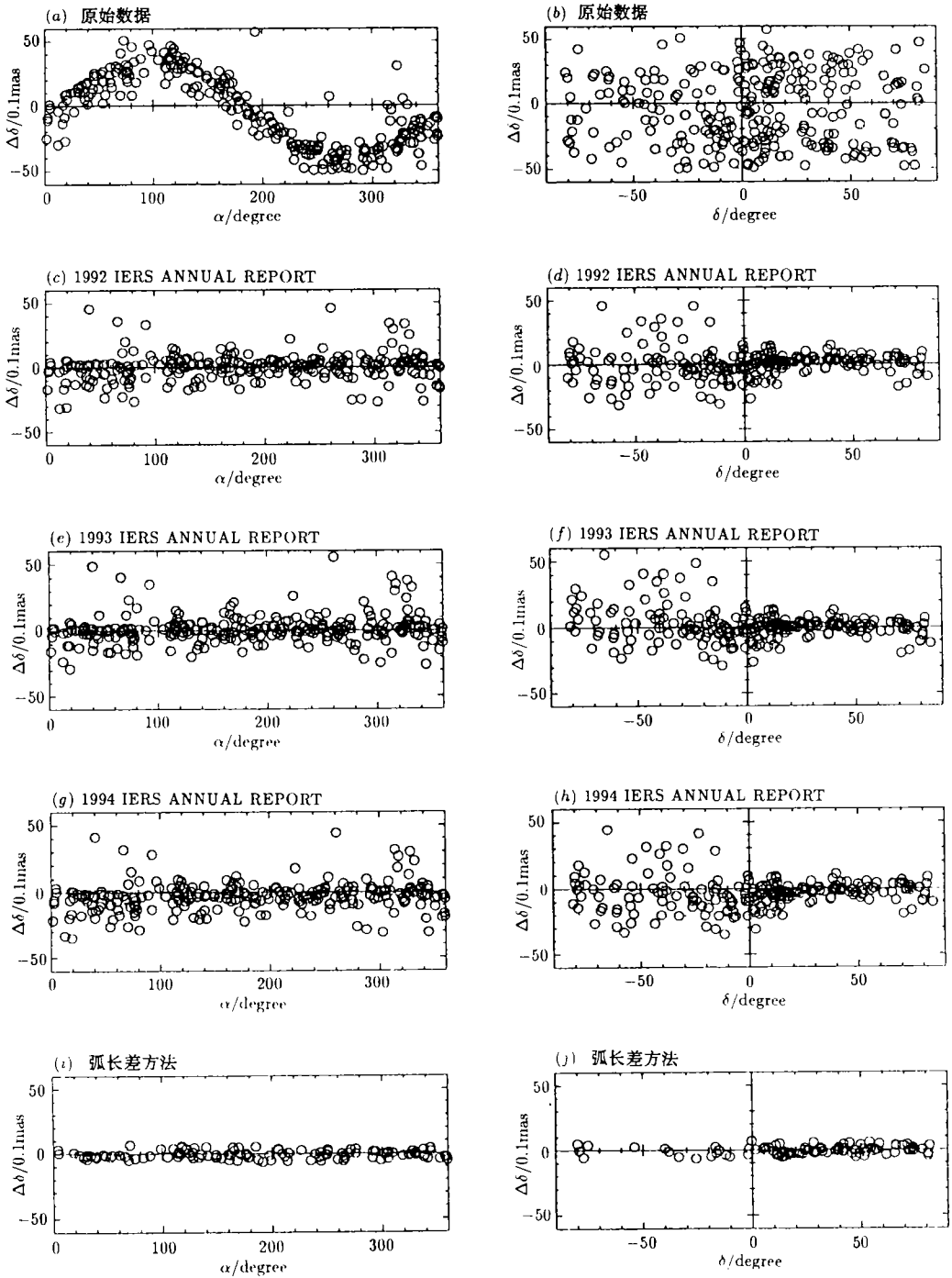


图 1 不同处理方法所对应的 G93 与 J92 中共同源赤纬差分别对赤经和赤纬坐标的分布

标偏大, (f) 分图则显示其偏小。这种大范围的整体行为对应于旋转参数上的差异。共同性表现为: (1) 绝大部分旋转量已被扣除和 (2) 部分赤纬坐标差较大的源仍被保留, 说明 IERS 的三种方法对局部相对形变的剔除情况不够理想。(d)、(f)、(h) 三个分图之间存在类似情况, 比如在北纬 30 度附近, (h) 分图显示大多数共同源赤纬坐标基本相等, (d) 和 (f) 则显示 G93 的偏大。共同点为: (1) 源的弥散情况较之于 (b) 分图改进了许多; (2) 一些赤纬坐标差较大的源仍被保留, 并且大都分布在南天。

在弥散度方面, (i) 和 (j) 分图较之于 (c) 至 (h) 分图存在质的飞跃, 这说明 ALD 方法在消除相对局部形变方面是最成功的。

表 3 列出了经过相同的过程处理 I93 和 I92 之后所得结果。图 2 是与图 1 对应的关于 I93 和 I92 的情况。由于 IERS 系列综合河外射电源表已经进行过指向维持工作, 所以表 3 和图 2 显示的 I93 和 I92 之间的旋转比 G93 和 J92 之间的为小, 但是指向差异仍然属于可以检测的水平, 约为 0.1mas, 远远低于 0.001mas。对图 2 进行类似于图 1 的分析比较可知, ALD 方法是非常有效的消除局部相对形变的方法。

表 3 用不同方法处理 I93 和 I92 所得结果的比较

方法	剔除源数	保留源数	拟 合 结 果 /mas		
IERS93	12	406	$A_1 = -0.02 \pm 0.02$	$A_2 = -0.03 \pm 0.02$	$A_3 = 0.02 \pm 0.02$
			$B_1 = 0.12 \pm 0.02$	$B_2 = -0.12 \pm 0.02$	$B_3 = -0.21 \pm 0.02$
IERS94	15	403	$A_1 = -0.09 \pm 0.02$	$A_2 = -0.09 \pm 0.02$	$A_3 = 0.02 \pm 0.02$
			$D_\alpha = -0.04 \pm 0.04$	$D_\delta = 0.11 \pm 0.03$	$B_\delta = -0.19 \pm 0.02$
IERS95	11	407	$A_1 = -0.08 \pm 0.02$	$A_2 = -0.09 \pm 0.02$	$A_3 = 0.03 \pm 0.02$
ALD	190	228	$A_1 = -0.10 \pm 0.02$	$A_2 = -0.13 \pm 0.02$	$A_3 = 0.09 \pm 0.02$

5 几点讨论

(1) (6)、(7)、(8) 三式是判断河外射电源表之间相对旋转与形变的直观方法, 适用范围广, 其中 (8) 式最为实用。但是, 它们只能给出相对旋转和相对形变的定性描述。

(2) 结合图 1 和图 2 可见, 就剔除局部相对形变的实际效果而言, ALD 方法是成功的。局部相对形变必然是与局部天区有关的, 因而 (9) 式中的 B_1 、 B_2 、 B_3 和 (10) 式中的 D_α 、 D_δ 、 B_δ 能否描述局部相对形变是值得怀疑的。

(3) ALD 方法能够将参考架指向差异与局部相对形变分开处理, 回避了两者相互影响的矛盾。该方法是通过剔除射电源而实现对局部相对形变的消除, 并非致力于改进射电源的坐标, 因而在一定意义上损失了一些有效的观测信息。但是, 由于不存在绝对的评比标准和缺少必要的理论依据与观测基础, 目前尚不具备利用统一模型描述局部相对形变的条件, 因而 ALD 这种消除局部相对形变的方法是可取的。

(4) 将表 3 中 ALD 方法下保留的 228 颗源按赤经坐标分成两组, (A) 组从 0° 至 180° , 共 115 颗源, (B) 组从 180° 至 360° , 共 113 颗源。用此两组源分别确定 I93 和 I92 之间的旋转, 结果为:

$$(A) \text{ 组: } A_1 = -0.09 \pm 0.03 \quad A_2 = -0.14 \pm 0.04 \quad A_3 = 0.09 \pm 0.03$$

$$(B) \text{ 组: } A_1 = -0.11 \pm 0.03 \quad A_2 = -0.12 \pm 0.03 \quad A_3 = 0.08 \pm 0.03$$

与表 3 中对应结果比较可见，由于经过 ALD 方法处理之后已经有效地剔除了局部相对形变，虽然所保留的源的数目少了，但拟合结果是稳定的，说明 ALD 方法下的结果是可信的。

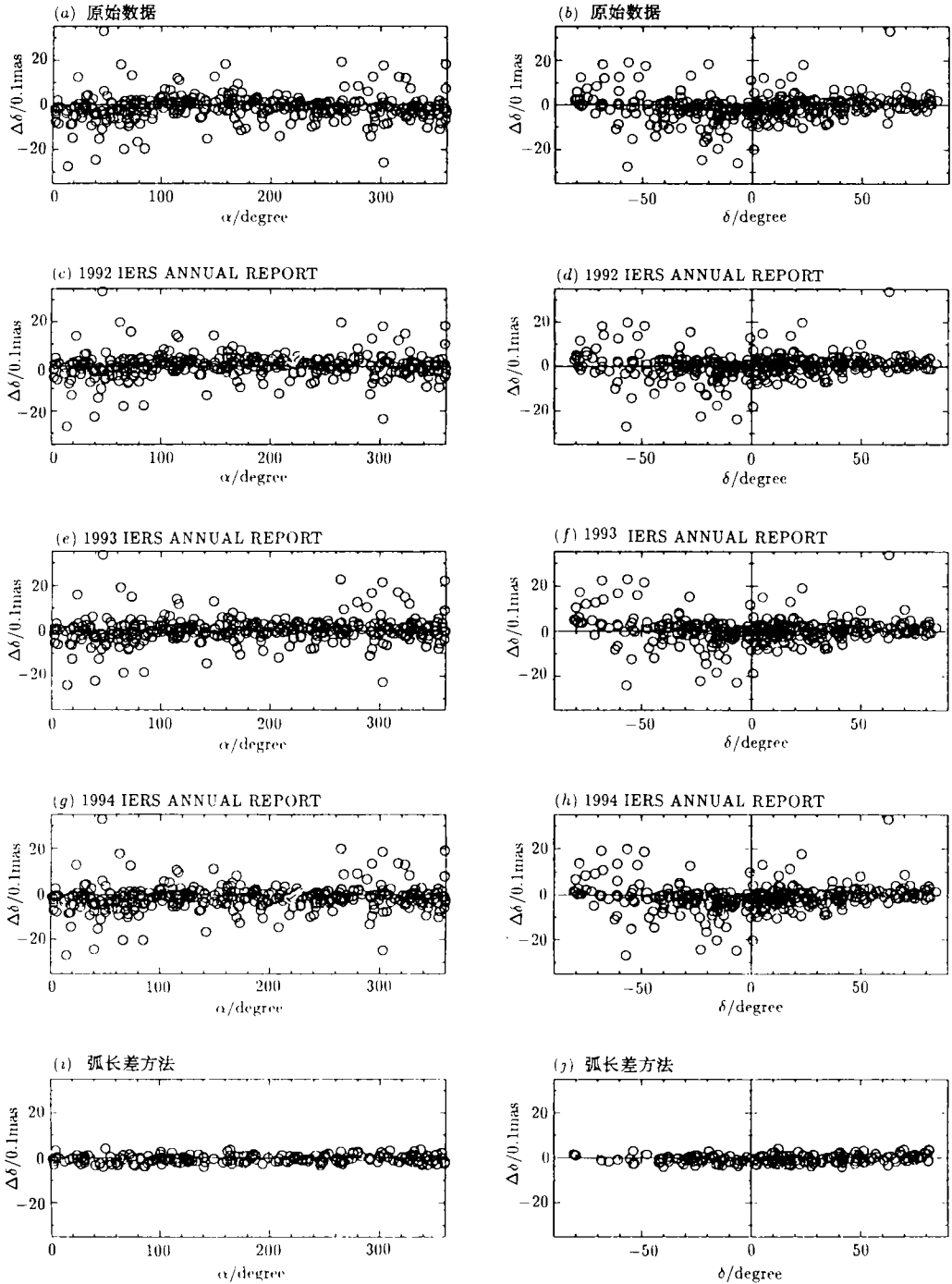


图 2 不同处理方法所对应的 193 与 192 中共同源赤纬差分别对赤经和赤纬坐标的分布

(5) 在利用观测表组建综合河外射电源表时, 可以应用 ALD 方法尽可能对所有观测表两组组合进行消除局部相对形变的处理, 每一个组合均对应一系列预选的基本源, 进而将各预选中的共同源作为综合表的基本源。所有未被选为基本源的射电源则可以作为非基本源进入综合表, 等待以后条件具备时再吸收为基本源。总之, ALD 方法是消除局部相对形变的有效方法, 同时也可以用来选取综合河外射电源表的基本源。

(6) 图 2 的 (i) 和 (j) 两个分图表明了 ALD 方法下所保留的源在 I92 与 I93 中的符合情况相当好, 这些源共有 228 颗, 其中 I92 的基本源、二级源和补充源的数目分别为 56、81 和 91 颗, 相应的平均表列坐标精度为 0.175、0.268 和 0.713mas; 关于 I93 的对应数据为 95、73、60 颗和 0.148、0.324、0.787 mas。可见, 基本源所占的比例不如通常所期望的那么高。这是一个有趣的现象, 对应于 IERS 选源方法上的某些缺陷, 值得进一步分析。

参 考 文 献

- [1] 李金岭, 金文敬. 云南天文台台刊, 1993, 3: 1
- [2] IERS ed. 1992 IERS Annual Report. Paris: Observatoire de Paris, 1993. II-19
- [3] IERS ed. 1993 IERS Annual Report. Paris: Observatoire de Paris, 1994. II-23
- [4] Arias E F, Feissel M, Lestrade J -F. In: BIH ed. BIH Annual Report for 1987. Paris: Observatoire de Paris, 1988. D-113
- [5] IERS ed. Annual Report for 1988. Paris: Observatoire de Paris, 1989. II-9
- [6] IERS ed. Annual Report for 1989. Paris: Observatoire de Paris, 1990. II-7
- [7] IERS ed. Annual Report for 1990. Paris: Observatoire de Paris, 1991. II-15
- [8] IERS ed. 1991 IERS Annual Report. Paris: Observatoire de Paris, 1992. II-15
- [9] IERS ed. 1994 IERS Annual Report. Paris: Observatoire de Paris, 1995. II-23
- [10] Jinling Li, Wenjing Jin. *Astron. Astrophys.*, 1995, 303:276
- [11] Ma C *et al.* In: IERS ed. IERS Technical Note 14. Paris: Observatoire de Paris, 1993. R-23
- [12] Sovers O J *et al.* In: IERS ed. IERS Technical Note 14. Paris: Observatoire de Paris, 1993. R-31

(责任编辑 刘金铭)

A Review of Methods on Identifying and Deleting Local Relative Deformations between Extragalactic Radio Source Catalogues

Li Jinling Jin Wenjing

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

Abstract

In this paper, several methods on identifying and deleting local relative deformations between extragalactic radio source catalogues are discussed. In combination with examples, the characteristics and the appropriate application scopes of methods are analyzed. It is concluded that the Arc Length Difference method is presently the most effective and feasible method for deleting local relative deformations.

Key words reference system—catalogue—method: data analysis