

521.9

C56



**Современные проблемы и методы
астрометрии и геодинамики**

Труды конференции

**С.-Петербург
1996**

Роль автоматических меридианных инструментов в наземной астрометрии на Post-HIPPARCOS период

Пинигин Г.И.

Николаевская астрономическая обсерватория
при Министерстве Украины по делам науки и технологий

327030, Украина, г. Николаев, ул.Обсерваторная 1

E-mail: root@mao.nikolaev.ua

1. ВВЕДЕНИЕ.

Успех первого космического проекта *Hipparcos* в 1989-1993гг привел к созданию двух каталогов, которые должны быть завершены в 1997 г.: а) *Hipparcos каталог (НС)*, включающий около 120 тысяч звезд до 11-й величины и ожидаемой точностью положений около 1-1.5 миллисекунды (Perguman,1995); б) *Tycho каталог (ТС)* с плотностью 25 звезд на квадратный градус (1 млн. звезд) и ожидаемой точностью около 30 миллисекунд (Hög, 1995a). По сравнению с традиционными наземными определениями в существенно короткие сроки (три года) достигнуто примерно 100-кратное увеличение точности по пяти астрометрическим параметрам (положения, собственные движения и параллакс) значительного количества звезд. Новые же проекты 21-го века, как например, *Roemer+* обещают еще более впечатляющие результаты: точность должна быть повышена до 10 микросекунд для звезд, включая 10-ю величину, в количестве до 1 млн и времени наблюдений 2.5 года (Hög,1995b).

Реальное появление космической астрометрии ведет к коренным изменениям как в традиционной позиционной астрометрии, так и ее приложениях. В частности, роль наземной меридианной астрометрии в этот переходный, часто называемый "*Post-Hipparcos*" период должна быть скорректирована с учетом результатов космических экспериментов *Hipparcos*, *HST* и последних достижений техники, которые можно использовать для улучшения наземных астрометрических инструментов (МИ).

Космический эксперимент *Hipparcos* разделил задачи позиционной астрометрии на две временные группы. В период, предшествующий ему главными задачами в наземной астрометрии были уточнение фундаментальной системы координат (СК), реализуемой в виде каталогов серии FK, последним из которых был FK5 путем абсолютных наблюдений; последовательное расширение системы FK5 на более слабые звезды путем дифференциальных наблюдений (IRS, AGK и др); наблюдения тел Солнечной системы для уточнения их положений и нульпунктов СК; наконец, создание входного каталога для реализации проекта *Hipparcos*.

После проведения эксперимента *Hipparcos* изменились акценты некоторых задач, часть программ утратила актуальность (FK6, IRS). Основным становится создание и поддержание международной небесной системы координат (ICRS), опирающейся на положения внегалактических радиоисточников, полученных методом РСДБ (IAU IB,1995). Такая

система координат должна обладать высокой стабильностью и точностью, поскольку базируется на положениях точечных внегалактических радиоисточников с пренебрежимо малыми собственными движениями, порядка $(10)^{-5}$ сек. дуги в год и субмиллиметровой точностью. В настоящее время имеется глобальная внегалактическая система координат (ICRF), созданная по РСДБ наблюдениям в соответствии с IERS (*International Earth Rotation Service*) программой (*Implementation of the IERS CRF, 1996*). Система координат ICRF включает положения 610 радиоисточников, имеющих яркость своих оптических аналогов 17-19 величин и точность 0.2 - 0.3 mas. Однако при всех своих достоинствах ICRF имеет и недостатки: 1) она базируется на радиоисточниках, имеющих весьма слабые аналоги в оптическом диапазоне, 2) имеет неравномерное и малое количество объектов (один радиоисточник, примерно, на 65 квадратных градусов), 3) возможно несовпадение координат объектов в радио и видимом диапазонах длин волн.

Для практического использования ICRF необходимо иметь ее представление в оптическом диапазоне с такой же точностью, т.е. в виде звезд большей яркости, чем оптические аналоги радиоисточников. Для этого ее необходимо распространить на более яркие звезды, сохраняя при этом высокую точность их положений. Аналог фундаментальной системы координат на радиоисточниках в оптическом диапазоне с наиболее высокой точностью может быть построен методами космической астрометрии. Первый каталог *Hipparcos* создается в системе FK5 и великолепно представляет оптическую СК, подходящую для практического использования.

Необходимо также установление надежной связи между оптической и радио системами координат, между различными СК (динамической, звездной, радио). Существующие методы связи между СК различающихся по яркости в оптическом диапазоне, примерно, на 10 звездных величин позволяют решить эту задачу по-разному: путем многоступенчатой привязки через промежуточные СК $12^m - 14^m$, $16^m - 18^m$, используя широкоугольные астрографы и большие оптические телескопы; прямые методы связи предусматривают наблюдения радиозвезд, входящих в оптическую и радио СК посредством оптических телескопов и РСДБ. В оптическом диапазоне такие методы использовались в проектах *Hipparcos*, *HST*.

2. ВОЗМОЖНОСТИ МЕРИДИАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В POST-HIPPARCOS ПЕРИОД.

Наземные наблюдения традиционным меридианным способом в до-Hipparcos время использовались достаточно интенсивно. В докладе Комиссии 8 к 22-му съезду МАС в Гааге отмечено 20 действующих меридианных кругов из 13 стран (Morrison, 1994). Однако наиболее эффективно в последнее время работают автоматические меридианные круги лишь в четырех странах: в США, Японии, Франции и Испании (Канарские острова). В СНГ из равноценных инструментов можно отметить отчасти лишь пулковский ГМК, к сожалению, не действующий в настоящее время.

Рассмотрим современный уровень точности МИ. Уменьшению влияния ошибок МИ всегда уделялось большое внимание. К настоящему времени технические возможности обеспечивают точность реальных измерений инструментальных параметров на уровне 0.01 микрона, что составляет в угловой мере, около $0.''001$ при фокусных расстояниях МИ, порядка 2-3 метров. Однако, систематические разности вида (Cat-FK5) по склоне-

Таблица 1. Сравнение ошибок меридианных инструментов разных конструкций.

Конструкция меридианного инструмента	Горизонтальное значение	Ошибки гнутя изменение/1С	Изменение коллимации/1С
Классическая: РМС,САМС,ВМС	1" - 1."5	0."05-0."69	0."1 - 0."25
Горизонтальная в меридиане: пулковский ГМК	0.01-0.02	-	0.004- 0.005
МАГИС	0.01*	-	0.02
Горизонтальная в 1-м вертикале: никалаевский АМК	0.037	-	0.026
ДСМТ	0.02	-	0.07

* ожидаемое значение

нию, полученные на лучших автоматических МИ классической конструкции показывают большие расхождения, до 0."1 (см. рис.1,2), (Yoshizawa and Suzuki, 1989; Yoshizawa et al., 1992; Morrison et al.,1990). При этом реальная точность разностей для единичного МИ составляла 0."02-0."03 при точности FK5 около 0."04. Также отмечены заметные годовые изменения разностей (Cat-FK5). Например, для РМС внутри трехлетнего цикла наблюдений они составляют 0."05-0."1. В итоге, несмотря на хорошее согласие систематических ходов разностей по склонению, обусловленных систематическими ошибками FK5 можно отметить их нестабильность и несовпадение для отдельных МК.

Для объяснения этих разногласий рассмотрим такие инструментальные параметры, как гнутие и коллимацию. Известно, что эти параметры влияют, главным образом, на определение склонений (гнутие) и прямых восхождений (коллимация). В табл. 1 показаны значения и изменения горизонтального гнутя и коллимации (с температурой), (Yoshizawa,1986; Morrison et al.,1990; Gumerov et al.,1986; Kirian et al.,1993; Pinigin et al., 1995; Пинигин и др.,1994; Li Zhigang,1993; Li Zhigang et al.,1996).

Можно видеть, что значения этих параметров для МИ классической конструкции намного больше, чем для МИ горизонтальной конструкции. В частности, можно отметить что изменения гнутя и коллимации с температурой очень малы для пулковского ГМК. Это имеет большое значение для стабильности инструментальной системы. Как результат, систематические разности (Cat-FK5) пулковского ГМК показали высокую стабильность и точность, около 0."02 -0."03 (Рис.1,2). К тому же следует учесть, что материал на ГМК получен по меньшему числу наблюдений, чем на других МИ (Kirian and Pinigin,1993). Ясно, что систематические разности (Cat-FK5) МИ классической конструкции включают остаточные ошибки гнутя и коллимации.

Более обещающих результатов можно ожидать от горизонтальных МИ в первом вертикале, которые имеют преимущества перед горизонтальными МК в меридиане (Пини-

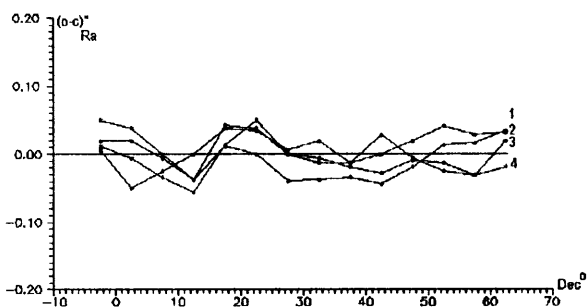


Рис 1. Сравнение средних систематических разностей $(o-c)$ по прямому восхождению в смысле (Cat - FK5), полученных на автоматических МИ: 1 - САМС, 2 - RMS, 3 - Бордо, 4 - ГМК.

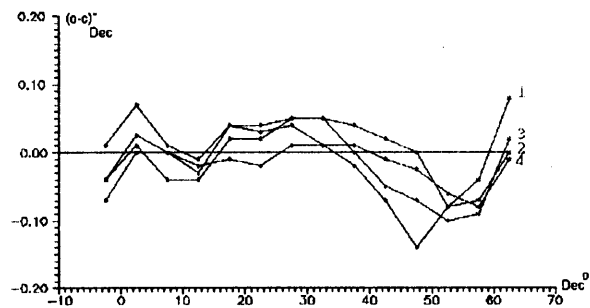


Рис 2. Сравнение средних систематических разностей $(o-c)$ по склонению в смысле (Cat - FK5), полученных на автоматических МИ: 1 - САМС, 2 - RMS, 3 - Бордо, 4 - ГМК.

гин,1989). Здесь предусматривается постоянное определение положений звезд относительно опорного направления коллиматора, что позволяет исключить смещения трубы и получить более стабильную ориентировку инструмента. Вследствие этого, уровень систематических ошибок для этого типа МК должен быть уменьшен до уровня $0.''01-0.''02$. Первые результаты наблюдений на николаевском Аксиальном меридианном круге (АМК) подтверждают это (Ковальчук и др., наст. сб.).

Очень важный этап в астрометрии, включая меридианную, начался после появления ПЗС регистрирующих устройств, когда появилась возможность с более высокой точностью и эффективностью определять положения, параллаксы и собственные движения звезд, тел Солнечной системы, внегалактических объектов. Благодаря высокой квантовой эффективности, широкому динамическому диапазону и малому уровню шумов точность ПЗС измерений положений звезд на матрице возможна до нескольких процентов пикселя а точность фотометрирования достигает $0.05m$. Отсюда следует значительное повышение точности определений положений наблюдаемых объектов и возможность наблюдения более слабых объектов. Действительно, с ПЗС микрометром на МИ во Флагстаффе была достигнута предельная звездная величина 17.5^m (Stone and Dahn,1995). ПЗС микрометры установлены также и на автоматических МИ в Токио, Бордо, Канарах (Yoshizawa 1995; Yoshizawa et al.,1993; Requeme et al.,1993 и 1995; Stone, 1993). Производительность МИ с ПЗС микрометрами также высока: около 9000 звезд можно наблюдать в час на МИ во Флагстаффе и до 7500 звезд на МИ в Токио. В новых программах для ПЗС МИ планируется получение до миллиона наблюдений звезд в год (Hög, 1995a и 1995b).

Для измерения положений звезд на ПЗС матрице используется главным образом способ с временной задержкой и накоплением (*drift-scan*), который позволяет вести наблюдения длинными полосами при неподвижном МК и ПЗС приемнике, в то время как изображение звезды суточным движением пересекает матрицу (Requeme et al.,1995; Stone and Dahn, 1995; Stone, 1993). При дифференциальном способе наблюдений для регистрации достаточного числа опорных звезд длина полосы достигает двух и более часов. Положения определяемых звезд измеряются относительно опорных из таких каталогов, как НС или ТС. Однако, изменения инструментальных параметров и атмосферной рефракции будут деформировать длинную полосу по прямому восхождению и склонению. Для учета инструментальных ошибок из-за смещения инструмента и ПЗС матрицы используется лазерная система (Stone and Dahn,1995). На горизонтальном МИ, имеющем

возможность наблюдений звезд одновременно с автоколлимационными измерениями без изменения установки трубы по зенитному расстоянию можно использовать метод наблюдений короткими полосами (Pinigin et al., 1996; Ковальчук и др., наст. сб.).

Влияние рефракции является другой важной проблемой для наземной ПЗС астрометрии, где выполняются измерения больших углов на небесной сфере. При дифференциальных измерениях с достаточным числом опорных звезд на ПЗС полосе можно учитывать влияние вариаций рефракции, таких как дневная и годичная. Аномальная рефракция, такая как павильонная учитывается обычно достаточно хорошо с помощью систем сбора метеоданных. Труднее устранить влияние флуктуаций рефракции, обусловленных атмосферной турбуленцией высокой частоты, которые имеют доминирующее влияние. По различным оценкам такой тип рефракции может быть учтен посредством измерений в течение одной-двух минут с точностью до 0."03 (Яценко, 1990; Yatzenko, 1990), до 0."03-0."06 для звезд в диапазоне 9-16 величины (Requeme et al., 1995) или до 0."05 (Hög, 1995b). Расчеты, проведенные в (Stone and Dahn, 1995) показали, что с ПЗС МИ с полем зрения $30' \times 30'$ и временем экспозиции 100 секунд можно измерить положения звезд дифференциально с точностью до 22 mas. Перспективная оценка была сделана также и в (Rap et al., 1995). В соответствии с этими исследованиями для широкоугольных наблюдений в видимом диапазоне длин волн с помощью двухцветной методики можно достигнуть атмосферного предела точности, около 10 mas. Для перспективных горизонтальных МИ с полем зрения ПЗС, порядка, $60' \times 60'$, с использованием многоцветовой методики наблюдений, отражательной оптикой, наконец с использованием опорных каталогов высокой плотности типа TC вполне реально достижение точности, порядка нескольких миллисекунд.

3. ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МИ С ПЗС РЕГИСТРИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ.

Учитывая реальные и перспективные возможности автоматических МИ рассмотрим круг задач в современной астрометрии, где участие МИ может принести значительный эффект. Как уже отмечалось, наиболее актуальной задачей в настоящее время является установление связи между оптической и радио СК как через промежуточные ступени, так и прямым образом. Представляет интерес использовать современные МИ с ПЗС микрометрами для прямой связи оптической СК (*Hipparcos*) с радио СК, либо путем создания промежуточной СК 12 - 14 звездной величины, уменьшая таким образом число промежуточных ступеней и следовательно повышая окончательную точность привязки. Реализация первого варианта уже выполняется. Наблюдения более 300 радиозвезд в системе FK5 проводились на автоматических меридианных кругах в Бордо и Канавах (Morrison, 1994), а положения 77 внегалактических радиоисточников определялись на ПЗС МИ во Флагстаффе (Stone, 1994; Stone and Dahn, 1995). В 1996 году на АМК были начаты наблюдения звезд, распределенных вокруг 396 внегалактических радиоисточников для создания промежуточной СК $12^m - 14^m$ и ее последующего использования для связи оптической и радио СК. Будущий каталог должен быть дифференциальным в системе каталога *Hipparcos* (HC) и включать слабые звезды из *GSC* в зоне склонений $-20^\circ - +90^\circ$ градусов.

Другие программы для наземной астрометрии, в которых автоматические МИ могли

бы принять в настоящее время эффективное участие: а) перенаблюдение звезд каталогов НС и ТС для уточнения их собственных движений. Например, к 2000 году положения звезд в НС ухудшится с 2 mas до 20 mas, а в ТС с 30 mas до 40 mas (Hög, 1995b); б) расширение списка НС и ТС на слабые звезды до 17-й величины с целью прямой связи оптической и радио СК; в) создание входных каталогов для будущих космических проектов (GAIA, ROEMER, СТРУВЕ, ЛОМОНОСОВ и др.); г) наблюдения тел солнечной системы для уточнения динамической СК и ее связи с оптической СК; е) определение положений избранных объектов представляющих интерес для галактической и звездной астрономии. Таким образом, наземная меридианная астрометрия на ближайшее время имеет достаточно важное и интересное поле деятельности: создание высокоточных каталогов положений небесных объектов в интервале звездных величин 10 - 18.

Дополнительно, следует отметить, что использование автоматических МИ, обладающих указанными свойствами имеет определенные преимущества перед инструментами других конструкций. В частности, МИ позволяют проводить прямые измерения больших дуг на небесной сфере с достаточной точностью, что невозможно на астрографах и тем более на больших оптических телескопах с малым полем зрения.

Учитывая что переходной *Post-Hipparcos* период должен быть не очень длительным, порядка 15-20 лет, имеет смысл рассматривать лишь те меридианные инструменты, которые уже работают или имеют возможность быть запущенными в работу в самые кратчайшие сроки, чтобы в течение ближайших лет участвовать в современных астрометрических программах. При этом, принимая во внимание развитие и быстрое внедрение новых средств и методов в астрометрии за последние годы, следует также учесть, что значительно возросли объемы наблюдений (до десятков и сотен млн. звезд), расширилась астрофизическая и слабая часть (до 16-18 зв. величин) астрометрических программ, появилась новая техника (ПЗС, мощные ЭВМ) и конкурирующие методы - РСДБ, оптическая интерферометрия, космические и др). В частности, многообещающим прорывом в области высокоточных наземных наблюдений является использование оптического интерферометра. В настоящее время в USNO завершено создание астрометрического оптического интерферометра (NPOI) (Corbin, 1996). Его конструкция включает 4 сидеростата с диаметром зеркал 0.5 метра и 3 независимые базы от 18 до 35 метров. Планируется в 1996 г. начать наблюдения 1000 звезд до 10-й величины с ожидаемой точностью на миллисекундном уровне по обеим координатам. Однако, чтобы участвовать в массовых наблюдениях обширных списков звезд оптические интерферометры должны пройти длительный путь усовершенствования. Хотя вне всякого сомнения - это инструмент 21 столетия.

Рассмотрим реальное положение с автоматическими МИ. Современный меридианный инструмент с автоматическим управлением представляет собой сложный, дорогостоящий аппаратный комплекс, оснащенный высокоточными измерительными устройствами и мощным вычислительным оборудованием, на котором должны работать специалисты высокого класса. Ясно, что создание такого телескопа не может быть серийным и доступно лишь крупным обсерваториям или их сообществу в одном-двух экземплярах. В практике мировой астрометрии все больше обсерваторий работают с телескопами коллективного пользования. Например, консорциум европейских обсерваторий имеет САМС на острове Ла Пальма и второй МИ в южном полушарии (Аргентина). Франция, Япо-

ния имеют по одному автоматическому МИ. США имеет один автоматический МИ во Флагстаффе и второй МИ в Новой Зеландии. В Китае завершается создание двух МИ оригинальной конструкции: ДСМТ и LLMS.

Нам представляется целесообразным для астрометристов стран Содружества (СНГ) с учетом их многолетних связей иметь один общий комплекс из двух автоматических горизонтальных меридианных телескопов - николаевского АМК, введенного в действие в 1995 г. и пулковского Меридианного автоматического горизонтального инструмента Сухарева (МАГИС), завершение изготовления которого может быть осуществлено достаточно быстро. Достоинства и возможности автоматического меридианного комплекса АМК-МАГИС достаточно полно представлены в (Пинигин и др., наст.сб.).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Post-Hipparcos период является начальным этапом эры глобальной астрометрии. Этот период характеризуется миллисекундным уровнем точности, что определяет и требования к новому поколению автоматических МИ: обеспечение минимальных ошибок, полная автоматизация наблюдений и их обработки, возможность коллективного пользования для выполнения больших программ в короткие сроки. Анализ автоматических меридианных инструментов горизонтального типа указывает на их перспективность и реализуемость. Новое поколение автоматических меридианных телескопов, созданных в виде инструментальных комплексов может быть эффективно использовано в качестве: а) высокоточных меридианных телескопов в астрометрии широких полей (глобальной); в) ПЗС телескопов для дифференциальной астрометрии с малым полем.

ЛИТЕРАТУРА.

Ковальчук А.Н., Г.И.Пинигин, Ю.И.Процюк, А.В.Шульга, ПЗС-Аксиальный меридианный круг Николаевской астрономической обсерватории, наст.сборник.

Пинигин Г.И., Шульга А.В., Гумеров Р.И., Автоматический меридианный комплекс для решения задач наземной астрометрии в *Post-Hipparcos* период, наст. сб.

✓ Пинигин Г.И.: 1989, Проблемы построения координатных систем в астрономии. Серия "Проблемы исследования Вселенной", вып.12, Л.,с.140-161.

Пинигин Г.И., Шульга А.В., Федоров П.Н., Петров А.Г., Мажаев А.Э.: 1994, Кинематика и физика небесных тел. Том 10, No.1, с.54-57.

Яценко А.Ю.: 1990, Теория рефракции, Казань, изд.КГУ, с.130.

Corbin T.: Contribution of the USNO to the optical reference frame, Report on the IAU Colloquium 165, Poznan, Poland, July 1-6,1996.

✓ Gumerov R., Kapkov V., Pinigin G. : 1986, IAU Symp.109, Astrometric Techniques. Eichhorn H.K., Leacock R.J. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 459.

Hog E.: 1995a, Proc. G.Colombo Mem. Conf., Ideas for Space Research after year 2000. Padova, 1994.

Hog E.: 1995b, IAU Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelmann P.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 317.

IAU Information Bulletin: 1995, No.74,3. Implementation of the IERS Celestial Reference Frame: 1996, 1995 IERS Annual Report, Observatoire de Paris, II-19.

Kirian T., Pinigin G., 1993: IAU Symp.156, Developments in Astrometry and their Impact on Astrophysics and Geodynamics. Mueller I.I., Kolaczek B. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 119.

✓ Kirian T.R., Naumov K.N. Nikiforov V.V., et al.: 1993, IAU Symp.156, Developments in Astrometry and their Impact on Astrophysics and Geodynamics. Mueller I.I., Kolaczek B. (eds.), Kluwer, Dordrecht, p.117.

Li Zhigang: 1993, IAU Symp.156, Developments in Astrometry and their Impact on Astrophysics and Geodynamics. Mueller I.I., Kolaczek B. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 79.

✓ Li Zhigang, Mao Wei, Qi Guanrong : 1996, A joint project on chinese meridian circles, report on the MAO conference, Sept.9-12, 1996, Mykolayv.

Morrison L.V.: 1994, Report Comm.8 to the 22d IAU. Reports on Astronomy, Vol.XXIIA, Kluwer, Dordrecht, 29-37.

Morrison L.V., Argule R.V., Helmer L., et al.: 1990, IAU Symp.141, Inertial Coordinate Systems on the Sky. Lieske J.H., Abalakin V.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 391.

Pan,X., Kulkarni,S., Colavita M.M., Shao M.: 1995, IAU Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelmann P.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht,13.

Perryman M.A.C.: 1995, IAU Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelmann P.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 83.

✓ Pinigin G.I., A.V.Shulga, P.N.Fedorov, A.N.Kovalchuk, A.E.Mazhaev, A.G.Petrov, Y.I.Protsyuk: 1995, Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub- Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelman P.K.(eds), Kluwer, Dordrecht, 365.

Pinigin G.I., Li Zhigang, Zu Zhi: 1996, Astronomical and Astrophysical Transactions, No.12 (in print).

Requieme I., Morrison L.V., Lindegren L., et al.: 1993, Second International Workshop on Positional Astronomy and Celestial Mechanics. Observatorio Astronomico. Univ. de Valencia, 20.

Requieme I., Montignac G., Le Champion J. F., Bosq F., Chauvet F., Benevides-Soares P., Teixeira R.: 1995, IAU Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelmann P.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 358.

Stone R.C., Dahn C.C.: 1995, IAU Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelmann P.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 3.

Stone R.C.: 1994, AJ 108, 313.

Stone R.C.: 1993, IAU Symp.156, Developments in Astrometry and their Impact on Astrophysics and Geodynamics. Mueller I.I., Kolaczek B. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 65.

Yatsenko A.Yu.: 1990, IAU Symp.141, Inertial Coordinate Systems on the Sky. Lieske J.H., Abalakin V.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 143.

Yoshizawa M.: 1995, IAU Symp.166, Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry. Hög E., Seidelmann P.K. (eds.), Kluwer, Dordrecht, 31.

✓ Yoshizawa M.: 1986, Ann.of the Tokyo Astron.Obs., 21, 219.

Yoshizawa M., Suzuki S.: 1989, Publ.Natl.Astron.Obs.Japan,1,127.

✓ Yoshizawa M., Suzuki S., Kuwabara T., Ishizaki H.: 1993, IAU Symp.156, Developments in Astrometry and their Impact on Astrophysics and Geodynamics. Mueller I.I., Kolaczek B. (eds.), Kluwer, Dordrecht, p.71.

Yoshizawa M., Suzuki S., Soma M.: 1992, Pub. Natl. Astron. Obs. Japan, 2, 475.