



Рис. 6.

составляет 13 и 20% соответственно. Для равной точности измерения длительность реализации негауссова процесса должна быть больше отрезка $X_T(t)$, например, $X_I(t)$ в 2 раза, $X_{II}(t)$ в 1,5 раза, если $\Delta\omega' = 0,2$, $\omega_0' = 1$.

Таким образом, негауссовость сказывается на результатах измерения спектра СП и иногда весьма существенно, поэтому игнорировать ее нельзя.

В заключение подчеркнем, что известное положение о нормализации СП узкополосной линейной системой справедливо не всегда: $u_I(1; 0) = 1$, $u_{II}(3; 0) = 2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Геранин, Т. Т. Новикова, Г. Д. Симонова. Условия принципиальной эквивалентности основных методов статистического спектрального анализа стационарных случайных процессов.— Труды VI Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей». Л., Изд. ВНИИЭП, 1973.
2. В. А. Геранин. Современный периодограммный анализ стационарных случайных процессов.— Труды IV Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей». Л., Изд. ВНИИЭП, 1971.

Поступила в редакцию 21 октября 1974 г.;
окончательный вариант — 23 октября 1975 г.

УДК 551.501 : 527

С. М. ЯКУШИН
(Астрахань)

МЕТОД ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ЗВЕЗД

Несмотря на успехи в применении электроники, не отпала необходимость в использовании оптических измерительных средств для исследования движения космических объектов (КО) в пространстве. Один из основных видов оптических средств, применяемых для этих целей, —

баллистические камеры (БК) [1]. Они часто применяются для фотографирования КО на фоне звезд. В этом случае на снимок одновременно впечатываются и траекторный след космического объекта, и следы движения звезд.

При обработке результатов фотографирования необходимо произвести отождествление звезд снимка со звездным каталогом. В работе [2] предложен интересный алгоритм, в котором отождествление построено на принципе сопоставления взаимных расстояний между изображениями звезд в тангенциальной системе и прямоугольной системе координат на основе изометричности их с точностью до ϵ .

Данную задачу можно решить, используя иной принцип отождествления по сравнению с алгоритмом [2], а именно отождествление с помощью одной точки — центра снимка ($x=y=0$). На его основе удалось достаточно просто решить задачу автоматического отождествления звезд снимка с каталогом и в случае отсутствия достоверной информации об ориентации снимка в пространстве, что повысило надежность использования БК в полевых условиях.

Содержание алгоритма, построенного по этому принципу, сводится к следующему. Пусть координаты оптического центра, которые известны приблизительно с точностью до Δ (например, $\Delta \leq 10^\circ$), заданы в горизонтальной системе [3] астрономическим азимутом \tilde{A}_0 и зенитным расстоянием \tilde{Z}_0 . На снимке в прямоугольной системе координат с началом в центре снимка ($x=y=0$) измерены положения I звезд x_i, y_i ($i=1, 2, \dots, I$), которые необходимо отождествлять. По x_i, y_i и \tilde{A}_0, \tilde{Z}_0 вычисляются «предварительные» горизонтальные координаты звезд:

$$A'_i = \tilde{A}_0 + \operatorname{arctg} \frac{x_i \cos \left(\operatorname{arctg} \frac{y_i}{f} \right)}{f \sin \left(\tilde{Z}_0 - \operatorname{arctg} \frac{y_i}{f} \right)};$$

$$Z'_i = \operatorname{arcctg} \left[\cos (A'_i - \tilde{A}_0) \operatorname{ctg} \left(\tilde{Z}_0 - \operatorname{arctg} \frac{y_i}{f} \right) \right],$$
(1)

где f — фокусное расстояние объектива. Вычисленные таким образом горизонтальные координаты звезд A'_i, Z'_i преобразуются в экваториальные α'_i, δ'_i (прямое восхождение, склонение) по формулам связи [3]. Вокруг каждой звезды с координатами α'_i, δ'_i на небесной сфере выделяются небольшие участки, ограниченные по величине прямого восхождения и по склонению некоторыми величинами $\Delta\alpha, \Delta\delta$, которые рассчитываются пропорционально Δ :

$$\begin{aligned} |\Delta\alpha| &\approx 4,0 |\Delta^0|; \\ |\Delta\delta| &\approx 1,3 |\Delta^0| \end{aligned}$$
(2)

($|\Delta\alpha|$ — в часовых минутах, $|\Delta\delta|$ — в градусах, а $|\Delta^0|$ — величина Δ в градусах). Коэффициенты при $|\Delta^0|$ получены по результатам практической отработки алгоритма.

В звездном каталоге выделяется множество K звезд на предполагаемый участок фотографирования. Из них для каждой i звезды с координатами α'_i, δ'_i выбирается совокупность звезд, удовлетворяющих условиям

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &\in (\alpha'_i - \Delta\alpha; \alpha'_i + \Delta\alpha); \\ \delta_{ij} &\in (\delta'_i - \Delta\delta; \delta'_i + \Delta\delta), \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J. \end{aligned}$$
(3)

Назовем такие совокупности частными выборками, входящие сюда звезды — претендентами. Имеется в виду, что каждая образованная по

правилу (3) частная выборка включает в себя $x_i, y_i, N_{ij}, \alpha_{ij}, \delta_{ij}$, где N_{ij} — номера звезд по каталогу, а индексами подчеркивается принадлежность их к соответствующей выборке (i) и место каждой звезды в ней по порядку (j). Далее утверждается, что в каждой из I выборок среди своих J звезд-претендентов будут находиться и те, положение которых зафиксировалось на снимке. Справедливость такого утверждения обосновывается тем, что каждая частная выборка получена как по α_i, δ_i , так и по $\Delta\alpha, \Delta\delta$, при этом последние рассчитывались с учетом Δ . Назовем такие звезды фиксированными. Для выделения их из всей массы претендентов используется следующий простой способ.

По экваториальным координатам α_{ij}, δ_{ij} всех звезд-претендентов и формулам связи [3] рассчитываются их горизонтальные координаты A_{ij}, Z_{ij} . Затем, используя измеренные координаты положений звезд x_i, y_i и вновь вычисленные значения A_{ij}, Z_{ij} , рассчитываются горизонтальные координаты центра снимка ($x=y=0$) для каждой звезды в выборке по формулам

$$A_{0ij} = A_{ij} - \arcsin \frac{x_i \operatorname{cosec} Z_{ij}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}}; \quad (4)$$

$$Z_{0ij} = \arccos \left(\cos Z_{ij} \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + f^2}{y_i^2 + f^2}} \right) + \operatorname{arctg} \frac{y_i}{f}.$$

После вычислений с помощью (4) каждая частная выборка имеет вид $x_i, y_i, N_{ij}, A_{0ij}, Z_{0ij}$ (A_{0ij}, Z_{0ij} — горизонтальные координаты центра снимка, вычисленные в предположении, что измеренным на снимке координатам x_i, y_i соответствует звезда с номером N_{ij}). Общее, что выделяют фиксированные звезды в выборках от остальных претендентов, это то, что между ними разность как по A , так и по Z не превосходит некоторую малую величину $d\Delta$.

Далее выбирается любая l -выборка ($1 \leq l \leq I$), которую назовем эталонной. Из нее для координат первой по счету звезды A_{0l1}, Z_{0l1} составляются разности с координатами звезд-претендентов всех выборок. Затем в каждой выборке ищутся звезды, имеющие минимум разности как по A , так и по Z . Из них формируется массив Q_i ($i=1, 2, \dots, I$), включающий в себя $N_{ij}, \Delta A_{0ij}, \Delta Z_{0ij}$. Выделенные разности сравниваются с $d\Delta$. Если большинство I выбранных разностей окажется больше $d\Delta$, то выбирается очередная звезда эталонной выборки, составляются новые разности и анализ продолжается. Если же разности оказались меньше $d\Delta$, то процесс отождествления считается законченным. В этом случае количество $N_{от}$ отождествленных звезд равно I . Теперь известны номера звезд по каталогу и соответствующие номера выборок, что достаточно для формирования $x_i, y_i, \alpha_i, \delta_i$.

Координаты отождествленных звезд, помимо расчета с помощью их угловых координат КО, могут быть использованы для вычисления дисторсии объектива и уточнения его фокусного расстояния [4, 5].

Поскольку по всем фиксированным звездам получены горизонтальные координаты центра снимка, вычисляется его весовое среднее значение A_0, Z_0 . За «вес» каждой фиксированной звезды можно принять величину, обратно пропорциональную линейному расстоянию ее от центра снимка. Если положение оптического центра определено относительно центра снимка (т. е. измерены \bar{x}, \bar{y}), то по A_0, Z_0 и формулам (1) вычисляются его горизонтальные координаты \bar{A}_0, \bar{Z}_0 [4].

Для работы алгоритма весьма важным является выбор численного значения $d\Delta$. Выбор конкретного значения $d\Delta$ зависит от того, насколько полно могут быть учтены факторы, влияющие на смещение изображений

положений звезд на снимке от «истинных» их положений (за счет фотообъектива, внешних причин, точности измерения на компараторе и т. д.). Так, для рассматриваемого алгоритма величина $d\Delta$ принята равной двум угловым минутам ($d\Delta = \pm 2'$). Кроме того, выбор значения $d\Delta$ важен еще и тем, что эта величина характеризует разрешающую способность отождествления звезд снимка с каталогом, т. е. способность различить и правильно отождествить фиксированную звезду от близлежащих соседних. Для данного алгоритма при $d\Delta = \pm 2'$ и $f = 400$ мм плановая величина разрешения составляет $\pm 0,3$ мм относительно измеренного положения каждой фиксированной звезды.

Описанный выше алгоритм автоматического отождествления звезд снимка с каталогом, работающий в условиях, когда координаты оптического центра известны с точностью $\Delta \leq 10^\circ$, запрограммирован на ЭВМ М-222. Опыт практической эксплуатации в течение нескольких лет полностью доказал его работоспособность. Следует заметить, что рассматриваемый вариант для $\Delta \leq 10^\circ$ не является предельным. При необходимости величину Δ можно довести до $15-20^\circ$, что не представляет практической трудности при реализации такого варианта алгоритма на ЭВМ типа М-222.

Затраты машинного времени на отождествление 20 звезд с ориентировкой алгоритма на вариант $\Delta \leq 10^\circ$ составляют менее 3 мин. Время работы алгоритма зависит от $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$: чем они больше по абсолютному значению, тем больше затрачивается машинного времени.

О динамике работы алгоритма можно судить по данным таблицы, где для двух вариантов процедуры отождествления ($\Delta \leq 10^\circ$ и $\Delta \leq 2^\circ$) приводятся массив Q_i (номера звезд даются по каталогу Босса), число претендентов J по каждой фиксированной звезде и их звездные величины m (пример обработки одного снимка). Анализ таблицы позволяет примерно судить о порядке звездных величин фиксируемых звезд (среднее время экспозиции 150 с) и качественном составе множества K по m , используемому на практике.

Предложенный выше алгоритм автоматического отождествления звезд снимка с каталогом для варианта $\Delta \leq 10^\circ$ позволяет упростить организацию геодезического обеспечения БК в полевых условиях и повысить возможность их оперативного использования. Так, совмещение точки стояния БК с пунктом триангуляции может решить вопрос планового обеспечения прибора (координаты точки стояния БК принимаются равными координатам пункта триангуляции). Для углового (азимутального) обеспечения достаточно приблизительно ориентировать БК с помощью компаса или небесных светил (по Полярной звезде, Солнцу и т. п.). Что касается угла места (зенитного расстояния), то наличие вертикального круга позволяет после горизонтирования прибора приблизительно определить и его. Приближенность задания координат оптическо-

	Q_i			m	$\Delta \leq 10^\circ$			$\Delta \leq 2^\circ$		
	N	ΔA	ΔZ		J	m_{\min}	m_{\max}	J	m_{\min}	m_{\max}
1	17616	0	0	4,96	117	6,97	4,56	6	6,58	4,96
2	17833	0'23"	0'05"	5,22	123	6,99	2,95	4	6,55	5,22
3	17769	0'01"	-0'26"	5,90	110	6,98	2,95	9	6,72	5,90
4	17825	0'29"	0'01"	6,18	120	6,94	2,95	4	6,55	5,22
5	17988	0'56"	0'29"	5,45	105	6,98	2,80	4	6,50	5,22
6	17493	-0'26"	-0'12"	5,10	106	6,98	2,95	9	6,97	4,96
7	17767	0'10"	-0'13"	6,04	110	6,99	2,95	11	6,83	5,22
8	17667	0'11"	-0'06"	6,01	113	6,99	2,95	3	6,18	5,22
9	17654	0'10"	-0'10"	6,12	111	6,99	2,95	7	6,63	5,22

го центра (примерная ориентировка БК на район появления КО) компенсируется широким полем зрения объектива и возможностью ручной доводки прибора на объект по данным визуального наблюдения. Фотографирование звезд и КО одновременно на одну фотопластинку является достаточным условием надежного определения (уточнения) координат оптического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Брандин, А. А. Васильев, С. Т. Худяков. Основы экспериментальной космической баллистики. М., «Машиностроение», 1974.
2. Л. А. Воронцова, Г. П. Чейдо. Алгоритм автоматического отождествления звезд снимка с каталогом. — «Автометрия», 1974, № 4, с. 103—111.
3. М. К. Вентцель. Сферическая астрономия. М., Геодезиздат, 1952.
4. В. В. Подобед. Фундаментальная астрономия. М., «Наука», 1968.
5. Е. Я. Бугославская. Фотографическая астрономия. М., Гостехиздат, 1947.

*Поступила в редакцию 24 февраля 1975 г.;
окончательный вариант — 3 октября 1975 г.*

УДК 621.317.7.085.36 : 621.317.7.088

В. П. ПОПОВ

(Москва)

ОБ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Вопрос обеспечения необходимой точности преобразования в различных условиях эксплуатации аналого-цифровых преобразователей (АЦП) — основной вопрос измерительной техники. Перспективными оказываются структурные методы повышения точности, основанные на введении в проектируемые АЦП дополнительной корректирующей аппаратуры, среди которых особое место занимают методы автоматической коррекции погрешности (АКП).

Несмотря на появление большого количества работ (например, [1—9]), посвященных методам АКП, в литературе не установлен определенный подход к этой проблеме. Описанные методы практически не связаны друг с другом. Отсутствие оценок методических ошибок делает некоторые методы [3—4] узкоспецифичными. Все это не позволяет оценить возможности методов АКП.

В настоящей работе предпринята попытка алгоритмического подхода к автоматической коррекции систематической и сильно коррелированной во времени случайной погрешности результатов преобразования АЦП. Оценивается возможность применения некоторых методов АКП, исследуется итерационный метод АКП [5], вопросы устранения его абсолютной методической ошибки и погрешности ЦАП.

Аналого-цифровое преобразование можно представить как отображение некоторой функцией $f(x)$ множества X значений аналоговой величины в цифровое множество Y .

Реальная функция АЦП $f(x)$ обычно отлична от теоретической $f_T(x)$, по которой производится градуировка АЦП,

$$f(x) \equiv f_T(x) + \delta f(x), \quad (1)$$