

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ И ПРОБЛЕМА ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МЕТЕОРОВ

Введение

Если бы ошибки измерений элементов орбит были ничтожно малы, то проблемы гиперболических орбит не существовало бы. По оценкам С.К. Всехсвятского гиперболические метеоры должны наблюдаться в атмосфере Земли ежедневно [1]. С.К. Всехсвятский возлагал большие надежды в отношении открытия межзвездных метеоров по данным радиолокационных наблюдений в силу большой статистической обеспеченности результатов наблюдений при радиометодом. В то же время С.К. Всехсвятский предполагал, что межзвездными могут быть только ярко выраженные гиперболы с эксцентриситетами значительно превышающими единицу. С.К. Всехсвятский [1] произвольно выбрал в качестве минимального предела для уверенных гиперболических орбит величину эксцентриситета $e=1,35$, считая, что меньшие значения эксцентриситета могут быть обусловлены ошибками измерений. В Харькове в ХНУРЭ в конце 70-х годов был проявлен интерес к проблеме гиперболических орбит при радиолокационных наблюдениях метеоров благодаря содружеству двух ученых С.К. Всехсвятского и Б.Л. Кашеева, возглавлявших две большие украинские научные школы: кометную – киевскую и метеорной радиолокации – харьковскую. Именно С.К. Всехсвятский предложил Б.Л. Кашееву искать межзвездные метеоры в харьковских метеорных данных. Б.Л. Кашеев знал, что в арсенале накопленных в его научной школе данных имеется довольно много гиперболических орбит метеороидов. Также ему было известно, что наблюдателями ХНУРЭ было установлено, что если регистрируется много гиперболических орбит в момент проведения эксперимента, то это признак каких-то технических неполадок. После некоторых колебаний Б.Л. Кашеев дал «зеленый свет» направлению по решению проблемы метеорных гиперболических орбит [2].

Обсуждение проблемы

Проблема гиперболических орбит метеорных тел была и остается проблемой повышения точности измерений и вычислений, а также статистической обеспеченности исследований. При классических радиолокационных наблюдениях существуют определенные технические ограничения, не позволяющие регистрировать наблюдаемые скорости, большие 100 км/с , даже метеорные частицы со скоростями, большими 90 км/с , уже являются спорными в отношении их достоверности. Это кажущееся несоответствие между требованием больших эксцентриситетов, а следовательно, и требованием больших гелиоцентрических скоростей для межзвездных метеоров, и ограничениями в наблюдаемых скоростях при регистрациях радиометеоров породило временные трудности в интерпретации радиолокационных данных в отношении поиска межзвездных частиц. В ходе исследований вопрос о непригодности радиолокационных данных для поиска межзвездных метеоров был снят, во-первых, потому что теоретически было обосновано и наблюдениями [3] подтверждено, что межзвездными могут быть метеороиды и при довольно скромных геоцентрических (и наблюдаемых) скоростях, величины которых при радиолокационном методе можно считать достоверными. Во-вторых, появился новый взгляд относительно величин самих эксцентриситетов для межзвездных частиц – они не обязательно должны быть большими, и даже наоборот, эксцентриситеты межзвездных частиц по ряду моделей предполагались близкими к единице [4]. И все-таки, несмотря на обширный статистический наблюдательный материал, при радионаблюдениях число гиперболических орбит невелико и теоретически, и практически. Так, при радиолокационных наблюдениях в Харькове из почти 50 тысяч всех орбит за 1975 г. гиперболических набралось всего около тысячи. По имеющимся сведениям в измерениях других исследователей число гиперболических орбит колеблется от 1 до 3 % и сильно зависит от предъявляемым к ним требованиям по точности определения.

Исследования проблемы гиперболических метеоров продолжают быть актуальными и сегодня [5], а полученные ранее результаты приобретают важное значение в связи с новыми наблюдательными экспериментами, имеющими даже более высокую статистику, чем в Харькове в 1970-х. С конца 90-х годов стала образовываться сеть метеорных радаров SKiYMET (промышленные радары для научных исследований, приблизительной стоимости порядка 100 000 у.е., компания MARDOC Inc.), имеющих подсистему определения орбит. Однако на сегодня не на всех установленных SKiYMET производятся орбитальные измерения [5].

Сейчас можно говорить о действующих метеорных орбитальных радарх в Новой Зеландии на радаре «Advanced Meteor Radar» (AMOR), где зарегистрировано около 600 тыс. орбит [6] и в Канаде на радаре «Canadian Meteor orbit Radar» (CMOR), где зарегистрировано около 1 млн орбит [7]. Также орбитальные исследования производятся в Японии, имеются результаты радиолокационных наблюдений орбит в Пуэрто Рико на «Aresibo Meteor Radar» [3]. На радаре CMOR заложена выдача вместе с результатом измерения его возможной ошибки. Некоторые сравнительные сведения о радарх приведены в табл. 1.

Таблица 1

Страна	Украина	Украина	Канада	Новая Зеландия	Пуэрто Рико
Название радара	MARS	MARS	CMOR	AMOR	Aresibo meteor radar
Тип радара	VHF	VHF	HF/VHF, based on SKiYMET	VHF, SKiYMET	UHF, HPLA,
Метод	Импульсно-дифракционный, классический	Импульсно-дифракционный, классический	Импульсно-дифракционный, классический	Импульсно-дифракционный, классический	Незеркальные отражения от головного эхо
Рабочая частота	22,38 MHz	31,1 MHz	29,85 MHz	26,2 MHz	430 MHz
Город	Харьков	Харьков	Travistock, Ontario	Christchurch	Аресибо
Широта инстал.	49° 24' 50" N	49° 24' 50" N	43° 3' N	43° 32' S	
Долгота инстал.	36° 51' 30" E	36° 51' 30" E.	-80° 8' E	172° 30' E	
Период обзора	1967-1971	1972-1978	May, 2002-September, 2004		1997 - 1998, 2002
Что регистрировалось	ABX	T, τ ₁ , τ ₂ , V ₁ , V ₂ , V ₃	T, τ ₁ , τ ₂ , V ₁ , V ₂ , V ₃	Профиль 3 ABX	
Записано на:	киноплёнку	ЭВМ, бумагу	ЭВМ	ЭВМ	ЭВМ
Все орбиты	90 000	250 000 орбит	1 000 000 орбит	~500 000 орбит	50 000 орбит
Гиперболы	не искались	1-3%	1-10%	1-3%	~2%
Предельная зв. величина	+8 ^m / +12 ^m	+12 ^m	+8 ^m	+14 ^m	

Алгоритм расчета ошибок определения скоростей и орбит в Харькове

Любая оценка достоверности гиперболических орбит требует заключения о том, насколько ошибки измерений влияют на элементы вычисленных орбит. Согласно теории ошибок измерений, среднеквадратичные ошибки результатов измерений можно оценить по формуле

$$\sigma f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \Big|_{a=\bar{a}} \cdot (\sigma a)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \Big|_{b=\bar{b}} \cdot (\sigma b)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \Big|_{c=\bar{c}} \cdot (\sigma c)^2 + \dots},$$

где f – функция от исходных величин $a, b, c \dots$. При этом предполагается, что среднеквадратичные ошибки $\sigma a, \sigma b, \sigma c \dots$, от которых зависит результат косвенных измерений, малы по сравнению со средними значениями самих этих величин $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots$, а вторыми производными функции f можно пренебречь по сравнению с первыми.

Вычисление координат радиантов в гелиоцентрической системе (истинных радиантов), геоцентрической скорости и элементов орбит метеорных тел производилось по несколько видоизмененному классическому алгоритму И.А. Клейбера. Автором были выведены формулы расчета ошибок по этому алгоритму на основании классической теории ошибок измерений. Для всех основных и переходных параметров алгоритма были вычислены их ошибки, что позволило оценивать конечный результат по взятым исходным данным. Исходными данными при расчете орбит являются время появления метеора t , временные сдвиги τ_1, τ_2 между дифракционными картинками отражений, принятых в основном и в вынесенных пунктах и значение средней наблюдаемой скорости метеора V_{cp} . Все величины, которые в 70-х годах брались из «Астрономического ежегодника», были представлены в виде аналитических функций времени: расстояние от Земли до Солнца R , орбитальная скорость Земли V_t , долгота Солнца λ_s и звездное время S в момент наблюдения.

Случайные ошибки измерений временных сдвигов и наблюдаемой скорости метеоров влияют на последующий расчет радиантов и элементов орбит и могут вызвать значительное отличие вычисленных элементов орбиты от истинных. При радиолокационных наблюдениях определение наклонной дальности до метеорного следа, положение экстремумов и величин временных сдвигов τ_1, τ_2 , а также момент наблюдений можно считать прямыми измерениями. Остальные величины находятся косвенно, поскольку связаны с результатами прямых измерений определенными функциональными зависимостями. Точность результатов измерений можно оценить величиной среднеквадратичной ошибки. Эта ошибка вычисляется в предположении, что в данном процессе измерений случайная ошибка распределена по нормальному закону, причем математическое ожидание случайной ошибки равно нулю. О том, чем могут быть вызваны первичные ошибки, подробно описывалось [2, 8]. Существуют оценки ошибок по разбросу индивидуальных значений этих величин при наблюдении метеорного потока [8], что не совсем корректно. А при выяснении реальности гиперболических орбит особенно необходима индивидуальная оценка точности вычисления элементов каждого метеора.

Полный алгоритм приведен в отчете НИР ХНУРЭ 1981 г., формулы конечного этапа алгоритма, совпадающие с [10], можно посмотреть в [10]. Для примера приведен фрагмент алгоритма: формула для вычисления ошибки геоцентрической скорости метеорного тела.

Геоцентрическая скорость V_g и ее среднеквадратичная ошибка σV_g

$$V_g = \frac{V' \cdot \sin(\psi_E - \Delta s)}{\sin \psi_E},$$

где $\Delta s = \sqrt{(\Delta \alpha \cos \delta_u)^2 + (\Delta \delta)^2}$,

$$\sigma(\Delta s) = \frac{1}{\Delta s} \cdot \left\{ \left[(\Delta \alpha) \cdot \cos^2 \delta_u \cdot \sigma(\Delta \alpha) \right]^2 + \left[(\Delta \delta) \cdot \sigma(\Delta \delta) \right]^2 + \left[(\Delta \alpha)^2 \cdot \sin \delta_u \cdot \sigma \delta_u \right]^2 \right\}^{1/2}$$

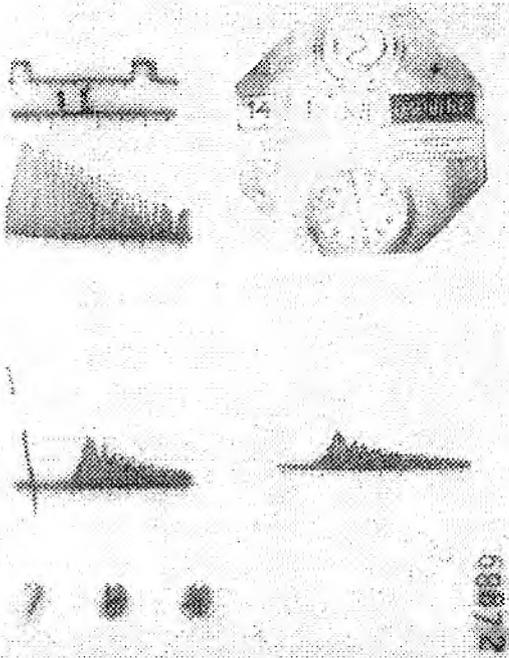
$$\sigma V_g = \frac{1}{\sin \psi_E} \cdot \left\{ \left[\sin(\psi_E - \Delta s) \cdot \sigma V' \right]^2 + \left[V' \cdot \cos(\psi_E - \Delta s) \cdot \sigma(\Delta s) \right]^2 + \left[V' \cdot \frac{\sin(\Delta s)}{\sin \psi_E} \cdot \sigma \psi_E \right]^2 \right\}^{1/2}$$

где α, δ_u – координаты радианта метеора (прямое восхождение и склонение), ψ_E – вспомогательный угол, V' – скорость метеорного тела с учетом зенитного притяжения.

Харьковские наблюдательные данные 1967 – 1971 гг.

В эти годы запись регистраций орбит велась фотографированием экрана осциллографа на киноплёнку. Первым автором были восстановлены сведения об информации, хранящейся на киноплёнке, и некоторые детали эксперимента. В правом нижнем углу фрагмента киноплёнки с регистрацией (рисунок) – номер кадра (метеора), в правом верхнем углу – впечатаны данные о моменте наблюдения, фамилия наблюдателя, дата в формате – день, месяц, год. В левом верхнем углу – развертка дальности с двумя шкалами дальности. Нижняя шкала дальности

сти более грубая – 25 и 100 км, верхняя шкала более тонкая – 25 и 5 км отметками. На пленке впечатаны 3 АВХ, полученные в трех базисных пунктах наблюдения. С фотопленки снимаются: R – наклонная дальность, дата, момент времени с точностью до минут и положения первых восьми экстремумов. Характеристики РЛС 1968 – 1971 гг.: 13,59 м, $f = 22 - 23$ МГц, частота повторения импульса $F=300$ Гц в 1968 г. и $F=500$ Гц – в 1969 – 1971 гг. Наклонная дальность – это расстояние от РЛС до точки зеркального отражения на следе. Оценки погрешности наклонной дальности при считывании показаний с электронно-лучевого индикатора дальности приняты исследователями при наблюдениях как $\Delta R = \pm 1$ км



Фрагмент кинопленки с регистрацией орбиты (данные 1967 – 1971 гг.)

Результаты

Среднеквадратичные ошибки определения скоростей, координат радиантов и орбитальных элементов метеороидов при разных методах регистрации приведены в табл. 2, где: 1. Фотографический метод в Одессе и Душанбе. 2. Радиолокационный метод в Харькове (наблюдения метеорного потока Геминид). 3. Радиолокационный метод в Харькове (вычисление по аналитическим формулам, средние величины для эллиптических орбит). 4. Радиолокационный метод в Харькове (индивидуальные гиперболические орбиты). 5. Радиолокационный метод в Обнинске. 6. Фотографические наблюдения потока Персеид в Душанбе. 7. AMOR радар.

Таблица 2

	$\sigma V_g, \text{ km/s}$	σA°	σZ°	$\sigma \alpha^\circ$	$\sigma \delta^\circ$	σe	$\sigma(1/a)$ AU-1	σi°	$\sigma \omega^\circ$
1	0.6	-	-	0.5	0.5	0.052	0.054	2.12	2.46
2	2.0	-	-	2.7	2.4	0.028	0.15	5.6	4.3
3	1.4	-	-	-	-	0.25	0.12	6.6	-
4	2.4	1.8	4.2	-	-	0.205	0.253	7.0	7.6
5	1.6	-	-	2.0	2.0	0.04	0.08	3.0	4.0
6	0.6	-	-	0.5	0.05	0.048	0.050	1.78	1.92
7	5%(v_h)	-	-	-	-	-	-	2°	2°

Выводы

Харьковские исследования в решении проблемы гиперболических метеоров являются необходимым дополняющим звеном для аналогичных исследований в Канаде, Новой Зеландии, США и др. Одним из препятствий более интенсивного решения проблемы гиперболических метеоров (включающей в себя и проблему поиска межзвездных метеорных тел), является низ-

кая статистическая обеспеченность данными именно по такому классу орбит. Повышение точности определения орбит остается решающим моментом в идентификации типа орбиты. Поэтому продолжение работ в области исследования шибков измерений несомненно актуально.

Получены соотношения, позволяющие выполнить расчет ошибок определения гелиоцентрической скорости, координат радианта в гелиоцентрической системе координат (истинного радианта) и элементов орбит, начиная с желаемого места алгоритма. Расчет ошибок по неизбежно объемным формулам при нынешних возможностях вычислительной техники не является проблемой. Хотя в произведенном поиске задача была поставлена для определенного метода (радиометода), для определенного класса орбит (гиперболических) и для определенных данных (харьковских), полученный алгоритм пригоден и для других наблюдательных методов (фотографического, телевизионного, иных), для другого класса орбит (эллиптических, параболических) и для других данных (другого места наблюдений). Таким образом, произведено усовершенствование имеющегося в Харькове алгоритма расчета орбит, так как теперь для каждого параметра можно иметь некий критерий его достоверности (его возможную ошибку). Несколько формальный характер такой оценки результата не является недостатком, так как не отменяет одновременного применения других критериев достоверности. В то же время доступны для уточнения разные структурные особенности алгоритма, прежде всего связанные с коэффициентами алгоритма или зависящие от места наблюдений. К преимуществам алгоритма следует отнести возможность его поэтапного использования. Выведенный самостоятельно автором алгоритм полностью согласуется с [10]. Алгоритм опробован на полигоне харьковских данных 1975 г около 1 тыс метеорных орбит, отобранных как формальные гиперболы по критерию $e \geq 1$. Полученное $\overline{\sigma e} \approx 0,2$ согласуется с критерием С.К. Всехсвятского $e \geq 1,35$ для отбора реальных гипербол по правилу $2\overline{\sigma e}$. Отдельную ценность полученный алгоритм вычисления ошибок скоростей, координат радиантов и элементов орбит приобретает в связи с появившимися современными техническими возможностями переобработки харьковских данных прошлых лет, хранящихся на киноплёнке. Алгоритм расчета ошибок также может быть введен в электронный каталог орбитальных данных ХНУРЭ за 1972 - 1978 гг.

Список литературы: 1. *Всехсвятский С.К.* Эруптивные процессы в Галактике и гиперболические метеоры // Проблемы космической физики. 1978. Вып. 13. С.141-146. 2. *Кащеев Б.Л., Ткачук А.А., Коломиец С.В.* О проблеме гиперболических метеоров // Проблемы космической физики. 1982. Вып. 17. С. 3-15. 3. *Meisel D.D., Bauer E.E* Eight years of observing micrometeors at Arecibo, Puerto Rico // Сб.науч. тр. 2-го Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ'2005), 19-23 сентября 2005 г. Харьков, Украина. 2005. Т.1. С.218-223. 4. *Белькович О.И., Потапов И.Н.* Ожидаемое распределение некоторых орбитальных элементов межзвездных частиц в Солнечной системе // Астрон. Вестник. 1985. Т. 19, №3. С.206-210. 5. *Modern meteor science. An interdisciplinary view / Ed. R. Hawkes, I. Mann, P. Brown.* Reprinted from Earth, moon, and Planets. Springer. 2004. Vol.95, Nos. 1-46. 732 с. 6. *Baggaley W.J.* The radar systems operating at the University of Canterbury Research Facility New Zealand // Сб.науч. тр. 2-го Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ'2005), 19-23 сентября 2005 г. Харьков, Украина. 2005. Т.1. С.215-217. 7. *Webster, A.R., Brown, P.G., Jones, J., Ellis, K.J., and M. Campbell-Brown.* // The Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR), Atmos. Chem. Phys. Disc. 2004. Том.4. С. 1181-1201. 8. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260с. 9. *Кащеев Б.Л., Ткачук А.А.* Результаты радиолокационных наблюдений слабых метеоров. Каталог орбит метеоров до $+12^m$. Москва: МГТ при Президиуме АН СССР, 1980. 232 с. 10. *Крамер Е.Н., Воробьева О.А.* Опыт работы на метеорном патруле Одесской астрономической обсерватории во время МГТ // Труды Одес. ун-та. 1963. Т. 6, Вып.2. С.29-35.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.01.2010