OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE

UNIWERSYTETU ADAMA MICKIEWICZA

Raport nr 7 / 1989

PORÓWNANIE DWÓCH ALGORYTMÓW IDENTYFIKACJI STRUMIENI METEOROIDOWYCH

Tadeusz J. Jopek .

Pracę wykonano w ramach problemu CPBP 01.11

1. Wstęp .

Obserwowane w ubiegłym stuleciu zjawiska deszczy meteorytowych pozwoliły astronomom na właściwą interpretację ich natury. Uświadomiono sobie, że w Układzie Słonecznym towarzyszami Ziemi są także niewielkie ciała poruszające się względem Słońca w sposób zwarty, na podobieństwo roju pszczół, bądź zajmujące w każdym momencie znacznie większy obszar ale poruszające się po bardzo podobnych orbitach. W ostatnim wypadku mówimy o strumieniu meteoroidów.

Znanych jest wiele strumieni meteoroidowych, ale co do ich dokładnej liczby nie ma wśród astronomów zgody. Lindblad w pracy (Lindblad 1971) podaje listę 78 strumieni fotograficznych, 88 strumieni podano w pracy (Jopek 1986), Terenteva wśród danych wizualnych i fotograficznyvh zidentyfikowała 168 strumieni (Terenteva 1966), Sekanina zidentyfikował 275 strumieni radiowych (Sekanina 1976), 819 radiowych strumieni zidentyfikowano w pracy (Lebedinets et al. 1966).

Różnorodność uzyskanych rezultatów daje się usprawiedliwić różnorodnością zbiorów orbit, wśród których poszukiwano strumieni. Ale jedynie częściowo. Wiadomo bowiem, że nawet na tym samym zbiorze danych, możliwym jest zidentyfikowanie różnej liczby strumieni.

Sytuacja ta wynika z podstawowej trudności na jaką napotykamy podczas identyfikacji strumieni . Mianowicie, jak dotąd nie istnieje kryterium, z pomocą którego można by w sposób pewny orzekać o przynależności meteoroidu do określonego strumienia.

Próbowano w tym celu wykorzystać różne kryteria (np. stała Tisseranda) ale przydatność ich okazała się niewielka . Dopiero sformułowane przaz Southwortha i Hawkinsa kryterium podobieństwa między orbitami (Southworth, Hawkins 1961) tzw D kryterium wyraźnie poprawiło sytuację. Nie zniknęły wszakże wszystkie trudności występujące podczas wyszukiwania strumieni. Celem niniejszej pracy jest pokazanie niektórych problemów związanych z tym zagadniem .

2. Algorytmy wyszukiwania orbit strumieni meteoroidowych.

Interesowano się wyłącznie sposobami pozwalającymi na znajdywanienie orbit należących nie tylko do strumieni już znanych, ale również dotąd nie odkrytych .

Jako kryterium podobieństwa orbitalnego wybrano oryginalną postać D kryterium. Jego modyfikacji zaproponowanej przez Drummonda (Drummond 1979) nie stosowano z powodu omówionego już wcześniej w pracy (Jopek 1986).

Biorąc jako orbity O_k i O_l zbiory klasycznych elementów :

$$O_k = \{ q, e, \omega, \Omega, i \}_k , \qquad O_l = \{ q, e, \omega, \Omega, i \}_l ,$$

wówczas, według Southwortha i Hawiknsa, jeśli zachodzi warunek

$$D_{kl} < D_{Cryt} = \text{const} ,$$

mówimy, że orbity O_k i O_l są podobne .

Gdzie:

$$D_{kl}=(e_k-e_l)^2+(q_k-q_l)^2+\left[2\sin\frac{I_{kl}}{2}\right]^2+\left(\frac{e_k+e_l}{2}\right)^2\left[2\sin\frac{\pi_{kl}}{2}\right]^2 ,$$

I_{kl} – wzajemne nachylenie orbit ,

π_{kl} – różnica w długościach peryheliów mierzonych od punktu przecięcia się orbit .

Zaprogramowano dwa algorytmy. W pierwszym zastosowano definicję strumienia podaną w pracy (Southworth, Hawkis 1961) . Mianowicie, przez strumień S można rozumieć zbiór :

$$S = \left\{ O_i,\ i=1,..n : \bigwedge_{i\le n} \bigvee_{j\le n} D_{ij} < D_{cryt} \right\} . \qquad (1)$$

Drugi algorytm realizował proces wyszukiwania orbit strumienia, zaproponowany przez Sekaninę (Sekanina 1970). Według tego autora strumień meteoroiów stanowią cząstki których orbity należą do zbioru :

$$S = \left\{ O_i,\ i=1,..n_k : \bigvee_{O_k} \bigwedge_{i\le n_k} D_{ki} < D_{cryt} \right\} \qquad (2)$$

gdzie, $$O_k = \left[\sum_{i}^{n_k} O_i \left(1-\frac{D_{ki}}{D_{cryt}} \right) \right] \cdot N^{-1} ,$$

$$| O_k-O_{k-1} | \le \varepsilon .$$

W definicji pierwszej występuje tylko jeden parametr wartość krytyczna D_{cryt}, która wg. Southwortha i Hawkinsa zależy od ilości orbit N, w badanym zbiorze :

$$D_{cryt} = 0.2\left[\frac{360}{N}\right]^{1/4} \quad . \qquad (3)$$

Lindblad (Lindblad 1971) podaje formułę dającą nieco mniejsze wartości :

$$D_{cryt} = 0.8\left[\,N\,\right]^{-1/4} \quad . \qquad (4)$$

Algorytm Sekaniny wymaga realizacji procesu iteracyjnego, w którym na każdym kroku oblicza się nową średnią orbitę z pomocą wagi $(1-D_{ki}/\ D_{cryt})$ decydującej o przyczynku danej orbity do orbity średniej. Dodatkowymi parametrami są w tym przypadku, orbita początkowa oraz mała wielkość ε, roztrzygająca o zakończeniu iteracji. Sekanina w celu wyszukiwania nowych strumieni proponuje jako startowe , orbity poszczególnych meteoroidów. Nie mówi natomiast niczego na temat sposobu wyznaczenia ε .

3. Materiał obserwacyjny, opragramowanie, parametry .

Wybrane algorytmy zastosowano do wyszukiwania strumieni w katalogu danych meteoroidowych KPOM-3, opracowanym wcześniej przez autora niniejszej pracy (Jopek 1989). Zawiera on orbity 1932 meteoroidów, obliczone ponownie, po weryfikacji danych zaczerpniętych z oryginalnych źródeł.

Algorytm Southwortha-Hawkinsa (SH), daje się realizować dwoma sposobami. Pierwszy polega na wcześniejszym obliczeniu $N\cdot(N-1)$ wartości D kryterium, zapamiętaniu ich, po czym w następnym kroku dla danej wartości D_{cryt} wyszukuje się orbit strumieniowych zgodnie z definicją strumienia (1). Po wykonaniu obliczeń wartości D, sam proces wyszukiwania jest już bardzo szybki. Takie podejście wymaga jednak olbrzymiej pamięci wewnętrznej komputera bądź dysku o bardzo dużej pojemności.

Sposób drugi polega na identyfikowaniu strumieni w trakcie obliczania wartości D . Nie wymaga on dużych pamięci ale kosztem długiego czasu potrzebnego do jego realizacji, rzędu godzin na IBM PC AT z koprocesorem.

Metodę Sekaniny (SE) daje się zaprogramować jedynie w wersji "on line". Komputerowy czas jej realizacji jest dłuższy i silniej, aniżeli w przypadku metody SH, zależy od dobranych parametrów identyfikacji.

Można stwierdzić, że wyszukiwanie strumieni meteorowych daje się zrealizować zawrtym oprogramowaniem nie wymagającym dużych pamięci wewnętrznych (< 100 kb), ale wymagane są w tym celu raczej szybkie komputery.

Poszukiwano strumieni dla D_{cryt} przyjmujących wartości ze zbioru { 0.100,0.115,0.120,0.125,0.131,0.150,0.175,0.200,0.250 } .

Dla algorytmu SE, parametr ε wybrano w oparciu o precyzję elementów orbit z KPOM-3. Mianowicie, warunkiem zakończenia procesu iteracyjnego było spełnienie nierówności :

$$\left[|e_k - e_{k-1}| + |q_k - q_{k-1}| \right] \cdot 100 + |\omega_k - \omega_{k-1}| + |\Omega_k - \Omega_{k-1}| + |i_k - i_{k-1}| < \varepsilon = 0.5$$

Orbity startowe natomiast, dobierano zgodnie z sugestiami autora jako kolejne orbity nie należące jeszcze do żadnego strumienia.

4. Rezultaty identyfikacji strumieni.

Metodą Sekaniny, udało się zrealizować wyszukiwanie strumieni jedynie dla $D_{cryt} \leq 0.150$. Dla większych wartości proces iteracyjny nie zbiegał się . (Patrz rozdział następny.)
W tabeli poniżej podano globalne rezultaty wyszukiwania .

Tabela I. Rezultaty identyfikacji strumieni meteoroidowych.

L_{SH}, L_{SE} liczba zidentyfikowanych strumieni.

$I_{\%SH}, I_{\%SE}$ procent orbit strumieniowych w KPOM-3 ,

$L'_{SH}, L'_{SE}, I'_{\%SH}, I'_{\%SE}$ jak wyżej, ale po odrzuceniu strumieni o liczebności równej 2 .

D_{cryt}	L_{SH}	L_{SE}	$I_{\%SH}$	$I_{\%SE}$	L'_{SH}	L'_{SE}	$I'_{\%SH}$	$I'_{\%SE}$
0.100	125	175	49	41	41	64	41	35
0.115	139	183	54	50	60	73	46	39
0.120	148	199	57	52	66	77	48	40
0.125	147	207	58	54	66	80	50	41
0.131	140	205	61	55	65	85	53	43
0.150	128	211	67	60	63	98	60	48
0.175	94	–	73	–	44	–	67	–
0.200	86	–	77	–	34	–	68	–
0.250	76	–	83	–	33	–	80	–

Z tabeli wynika, że algorytm Sekaniny identyfikujc znacznie więcej strumieni. Są one jednak mniej liczebne w stosunku do analogicznych strumieni otrzymanych metodyką SH. Dlatego widoczny w tabeli procent meteoroidów strumieniowych w badanej populacji, jest w przypadku algorytmu Sekaniny mniejszy.
W drugiej części tabeli podano analogiczne wielkości jak w

części pierwszej, ale po usunięciu z rozważań strumieni, w skład których wchodziły jedynie po dwa meteoroidy. Za ich usunięciem przemawiają rezultaty wyszukiwania strumieni w sztucznej próbie orbit. Mianowicie, wygenerowano losowo z rozkładem jednostajnym dla poszczególnych elementów 1935 orbit, i poddano je procedurom wyszukującym strumienie. Badania te wykonano w ograniczonym zakresie, jedynie dla $D_{cryt} = 0.125$.

Algorytmem SH zidentyfikowano 29 strumieni o liczebności 2, trzy strumienie o liczebności równej 3. Algorytmem SE odpowiednio 30 strumieni i jeden strumień. Innych nie zidentyfikowano.

Ostatecznie po odrzuceniu strumieni dwuelementowych, metodą SH zidentyfikowano około 65 ciu strumieni przy wartościach krytycznych D_{cryt} od 0.120 do 0.150. W przedziale tym mamy niemal stałą liczbę zidentyfikowanych strumieni.

Mętodyka Sekaniny w badanym przedziale D_{cryt}, wykazuje odmienne własności. W przedziale tym obserwujemy ciągły wzrost liczby zidentyfikowanych strumieni.

Inna różnica dotyczy podziału populacji meteoroidów na sporadyczne i strumieniowe. Algorytm SH dla $D_{cryt} \in [0.120, 0.131]$ około 50% orbit z KPOM-3 identyfikuje jako strumieniowe, algorytm SE mniej, około 40% .

5. Szczegółowe rezultaty wyszukiwania strumieni.

Znalezione strumienie podzielono na trzy grupy :

a) strumienie zidentyfikowane przez dwa algorytmy niemal identycznie,

b) strumienie, które przynajmniej jeden z algorytmów identyfikuje jako składające się z kilku gałęzi,

c) strumienie zidentyfikowane tylko jedną metodą lub różniące się wyraźnie ze względu na liczebności uzyskane badanymi metodami. Porównania dokonano na wynikach odpowiadających maksymalnej liczbie strumieni uzyskanych daną metodą. Dla metody SH brano rezultaty odpowiadające $D_{cryt} = 0.125$, dla metody SE, odpowiadające $D_{cryt} = 0.150$.

Tabela II. Strumienie zidentyfikowane metodami SH i SE . Przypadki najlepszej zgodności rezultatów . N_{SH}, N_{SE} liczebności poszczególnych strumieni.

L_p	Nazwa/Kod	N_{SH}	N_{SE}	L_p	Nazwa/Kod	N_{SH}	N_{SE}
1	Lirydy	8	7	24	ω Ursa Majorydy-1	2	3
2	τ Herkulidy-1	3	3	25	Kod 86	2	3
3	Pd. δ Akwarydy-2	3	3	26	o Serpentydy	5	5
4	Aurygidy	3	3	27	γ Drakonidy-2	4	4
5	ε Geminidy	5	5	28	Pd.ι Akwarydy	3	3
6	Kwadrantydy	14	14	29	Pn.ι Akwarydy	4	3
7	ψ Geminidy	4	4	30	α Kaprikornidy-3	2	3
8	λ Wirginidy	3	3	31	α Kaprikornidy-4	3	4
9	λ Wirginidy-1	3	3	32	$\varkappa$ Akwarydy	3	3
10	α Wirginidy	4	5	33	Kod 107	4	4
11	θ Ophiuhidy-1	4	3	34	Kod 112	2	3
12	Geminidy	86	85	35	Kod 114	2	3
13	Monocetorydy	3	3	36	γ Drakonidy-1	3	3
14	σ Hydrydy	4	5	37	Hiper.Perseidy-1	4	4
15	χ Skorpionidy	4	4	38	Hiper.Perseidy-3	3	2
16	μ Ophiuhidy	3	3	39	γ Perseidy	4	4
17	δ Piscidy	5	4	40	δ Kasjopeidy	2	3
18	Kod 63	3	3	41	Pn.ι Akwarydy-1	3	3
19	Kod 65	4	4	42	β Kasjopeidy	4	4
20	ζ Kancrydy	2	3	43	$\varkappa$ Cygnidy	3	3
21	Kod 77	3	3	44	γ Botydy	2	3
22	Kod 82	3	3	45	Draconidy	2	3
23	β Librydy	2	3	46	Kod 140	2	3

Z punktu widzenia metodyki SH tabela II zawiera blisko 50% zidentyfikownych strumieni. Są to jednak w większości strumienie małe o niewielkich liczebnościach.Występują tu tylko trzy wielkie strumienie : Geminidy, Kwadrantydy oraz Lirydy . Jak widać z rysunku 1., mają one bardzo podobne orbity , a w wypadku Geminid i Liryd, d o datkowo bardzo duże nachylenia orbit względem ekliptyki. Obie cechy bardzo ułatwiają proces identyfikacji orbit należących do tych strumieni .

Tabela III. Strumienie zidentyfikowane metodami SH i SE . Przypadki rozgałęzień .

G_{SH}, G_{SE} ilość zidentyfikowanych gałęzi .

L_p	Nazwa /Kod	N_{SH}	G_{SE}	N_{SE}	G_{SH}
1	ω Ursa Majorydy	5	2	5	2
2	α Kaprikornidy	33	3	19	1
3	Perseidy	357	12	235	1
4	ϰ Cygnidy	31	3	17	1
5	ϰ Akwarydy	14	3	4	1
6	Taurydy	89	12	18	1
7	Leonidy	20	2	16	1
8	Orionidy	34	4	26	1
9	δ Akwarydy	27	2	24	1
10	Pn.δ Akwarydy	12	2	9	1
11	β Wirginidy-1	11	3	8	1
12	Cyklidy	8	2	4	1
13	θ Wirginidy	9	3	4	2
14	θ Ophiuhidy	7	2	5	1
15	τ Herkulidy	8	3	8	1
16	ε Piscydy	10	4	3	1
17	θ Herkulidy	4	1	6	2
18	θ Wirginidy	3	2	4	2
19	Andromedydy-1	–	–	7	3
20	χ Ophiuhidy	3	2	–	–

Z dużymi strumieniami mamy głównie do czynienia w tabeli III. Zawiera ona przypadki trudniejsze w których , strumienie tworzą w stosunku do rezultatów jednego z algorytmów, czasami bardzo liczne gałęzie. Dzieje się tak zwłaszcza dla meteoroidów o małych nachyleniach orbit. W ramach przyjętych parametrów, widzimy, że algorytm Sekaniny działa w sposób bardziej selektywny aniżeli algorytm SH. Aby uzyskać z jego pomocą dla dużych strumieni wyniki zbliżone do metody SH prawdopodobnie należałoby stosować go przy $D_{cryt} > 0.150$. Z drugiej strony zmniejszenie D_{cryt} w algorytmie SH nie da takiego efektu.

Nie wszystkie przypadki rozgałęzień strumieni są jednakowo kłopotliwe. Dla Perseid np. główna gałąź wg metody SE jest również bardzo liczna. Świadczy to raczej o zbyt selektywnym działaniu metodyki SE (albo zbyt mało selektywnym metodyki SH) aniżeli o skomplikowanej strukturze samego strumienia. Inną mamy jednak sytuację w przypadku strumienia Tauryd. Wykreślone na rysunku 2 orbity tego strumienia świadczą o jego skomplikowanej strukturze. W tabeli IV przedstawiono pozostałe rezultaty, sprawiające największe trudności.

Dla pierwszych pięciu strumieni obserwujemy istotną przewagę w liczebności N_{SE}. Nie jest to czymś szczególnie zaskakującym ale sprzeciwia się wcześniej obserwowanej tendencji do mniejszej liczebności strumieni uzyskanych algorytmem SE. Skłonność ta ma jednak miejsce jedynie dla wielkich strumieni, gdzie "łańcuchowy" charakter definicji strumienia (1) odgrywa istotną rolę. Dla małych strumieni o liczebności decyduje głównie D_{cryt}.

W myśl tych uwag zaskakujący jest jednak fakt nie zidentyfikowania metodą SE strumieni σ Leonid, η Tauryd i Wirginid-1.

Z punktu widzenia przyjętych w rozważaniach dla obu metod wartości krytycznych D jest to rezultat paradoksalny.

Szczegółowa analiza tych przypadków pozwoliła na znalezienie przyczyny takiego zachowania się algorytmu SE. Miamowicie dla wspomnianych orbit mamy do czynienia ze swoistym rozbieganiem się procesu iteracyjnego. Przyczyną tego efektu jest obliczanie na każdym kroku procesu orbity średniej . Jak widać z definicji (2) dokonuje się tego z pomocą ważonej średniej arytmetycznej poszczególnych elementów orbit.

Tabela IV. Strumienie zidentyfikowane metodami SH i SE . Przypadki najbardziej skomplikowane .

L_p	Nazwa/Kod	N_{SH}	N_{SE}
1	θ Librydy	2	4
2	Draconidy-1	2	4
3	ν Perseidy	1	3
4	α Sekstantydy	2	4
5	θ Cetydy	2	5
6	σ Leonidy	3	0
7	η Taurydy	3	0
8	Wirginidy	5	0
9	ρ Geminidy	6	2
10	Andromedydy	14	4

Dla np. orbit o identycznuch elementach : $q_1 = q_2$, $e_1 = e_2 = 0.7$, $i_1 = i_2 = 1$ oraz $\omega_1 = 90$, $\Omega_1 = 90$, $\omega_2 = 270$, $\Omega_2 = 270$ wartość D wynosi 0.035. W algorytmie Sekaniny dla tej pary orbitą średnią (pomijając nieduży tutaj wpływ ważenia) jest orbita o jedynie innych elementach $\omega = \Omega = 180$. Obliczone wartości D dla tej orbity i orbit członków tymczasowego strumienia wynoszą 1.4 !

Efekt ten występuje zawsze w przypadku orbit dla których elementy ω i Ω przyjmują wartości z różnych ćwiartek. Można go usuwać "ręcznie", normując odpowiednio wartości kątowe elementów. Jednak nie daje się tego uczynić w sposób prosty w procesie zautomatyzowanym. Wyjścia z tej sytuacji należy zdaniem autora niniejszej pracy szukać w zastąpieniu podczas identyfikacji strumieni tradycyjnych elementów orbity innymi np. wektorialnymi. Wspomniany efekt jest również odpowiedzialny za identyfikowanie bez końca algorytmem SE strumieni w KPOM-3 przy $D_{cryt} > 0.150$. W pewnym stopniu jest również przyczyną identyfikowania różnych gałęzi strumieni. Bowiem mogą one powstawać nieoczekiwanie w efekcie zmiany biegu iteracji po niefortunnym uśrednieniu . Wydaje się, że tego typu zjawisko miało miejsce dla strumienia Andromedyd. W tabeli IV wśród grupy jego 14 orbit algorytm SE jedynie cztery wiąże ze sobą jako strumieniowe.

6. Wnioski .

Wykonane badania ukazały istotne trudności związane z wyszukiwaniem strumieni meteoroidowych. Dla badanej populacji orbit spośród około 65 formalnie zidentyfikowanych strumieni 50% nie wymaga dalszych zabiegów. W pozostałych przypadkach stosowane algorytmy wykazują niekiedy istotne różnice co do liczebności i struktury

Algorytm Sekaniny działa bardziej selektywnie, dając w efekcie strumienie mniej liczne ale bardziej zwarte. Jednakże z faktu obliczania na każdym kroku iteracji, orbity średniej rezultaty uzyskane z jego pomocą oraz zachowanie się samego procesu wyszukiwania mogą być nieoczekiwane.

W tym kontekście algorytm Southwortha-Hawkinsa będąc bezpiecznym wydaje się być bardziej godnym polecenia .

7. Litertura.

Hawkins G.S.,Southworth R.B.: 1961,Smith.Con.Aph.,**4**, 85.

Terenteva A,K.: 1966,Isledowanie meteorov,No 1,62.

Sekanina Z.: 1970,Icarus,**13**,459.

Lindblad B.A.: 1971,Smith.Con.Aph.,No 12,1.

Lindblad B.A.: 1971,Smith.Con.Aph.,No 12,14.

Lebedinets B.N., et al.:1972, Trudy IEM, **1**,(34),88.

Sekanina Z.: 1976,Icarus,**27**,265.

Jopek T.J.:1986, Praca Doktorska .

Jopek T.J.:1989,Raport No 6/1989 Problem CPBP 01.11 .