

JULIAN RADECKI

[528.77:53:629.785](98/99)

## Badanie przemieszczeń bieguna geograficznego na mocy dopplerowskich obserwacji sztucznych satelitów Ziemi

W latach sześćdziesiątych w amerykańskim Naval Weapons Laboratory, w Dahlgren w stanie Virginia, opracowano metodę wyznaczania położenia biegunów geograficznych na mocy dopplerowskich obserwacji sztucznych satelitów Ziemi. Wkrótce zorganizowano stałą służbę, noszącą nazwę Dahlgren Polar Monitoring Service (DPMS). Obserwowane są satelity nawigacyjne. Ich wykaz zawiera tablica 1.

Tablica 1

Oznaczenie	Data uruchomienia	Nachylenie orbity	Okres obiegu w minutach	Uwagi
1967—034 A	IV. 14	90°	107	
1967—048 A	V. 18	90	107	
1967—092 A	IX. 25	89	107	
1968—012 A	III. 2	90	107	
1970—067 A	VIII. 27	90	107	Oscar 6

Pierwsze publikacje, zawierające dosyć skąpe informacje o technologii pomiarów i redukcji, a za to szczegółowe zestawienia wyników końcowych w postaci współrzędnych bieguna, ukazały się w roku 1970 [1], [2]. Podano współrzędne otrzymane z dwudobowych cykli obserwacyjnych dwóch satelitów oraz błędy standardowe.

Satelity nawigacyjne [3] emitują fale o wysoce stabilnej częstotliwości w zakresie od 100 do 1000 MHz. Ostatnio w programach astronomicznych były stosowane dwie częstotliwości, a mianowicie: 150 i 400 MHz. Na stacjach naziemnych za pomocą zestawu dopplerowskiego (antena, generator, odbiornik, zegary) mierzy się wielkość zmiany częstotliwości, wynikającą z prędkości zbliżania się lub oddalania satelity od anteny urządzenia odbiorczego. Jeżeli dla chwil pomiaru znane są współrzędne i prędkość satelity, to można obliczyć drogą rozważań czysto geometrycznych współrzędne środka fazowego anteny odbiorczej. Współrzędne satelity są odniesione do pewnego układu współrzędnych bieguna, z reguły do OCI.

Współrzędne anteny natomiast, obliczone na mocy dopplerowskich danych pomiarowych, są to chwilowe współrzędne geocentryczne. Zmiany tych współrzędnych w czasie są prostymi funkcjami zmian współrzędnych bieguna względem początku układu, do którego były odniesione współrzędne satelity.

W modelu dynamicznym wyrównaniu poddaje się dane obserwacyjne z wielu przejść satelitów nad szeregiem stacji. Wynikiem wyrównania są współrzędne stacji i satelitów oraz współczynniki rozwinięć opisujących pole grawitacyjne Ziemi. W modelu półdynamicznym oblicza się od razu współrzędne stacji na podstawie wyznaczonych już uprzednio współrzędnych satelitów.

Pojedyncze wyznaczenie współrzędnych bieguna jest wynikiem obserwacji satelitów wykonanych w ciągu 48 godzin przez 13 stacji. Pomiaru są prowadzone dzień i noc, przy każdej pogodzie.

Na dokładność wyznaczenia decydujący wpływ mają następujące grupy błędów:

- 1) błędy współrzędnych satelity,
- 2) błędy znajomości wpływu refrakcji w jonosferze i troposferze,
- 3) błędy instrumentalne.

Istnieją dwa rodzaje współrzędnych satelitów: precyzyjne i robocze, czyli operacyjne. Dokładność pierwszych zawiera się w granicach od 1 do 3 m, drugich — od 20 do 30 m. Od kwietnia 1975 roku efemerydami precyzyjnymi dysponuje amerykańska agencja kartograficzna (U.S. Defence Mapping Agency). Wyznacza je sieć stacji TRANET drogą śledzenia za satelitą na 48-godzinnym łuku orbity. Efemerydy [4] dotyczą tylko jednego lub dwóch satelitów i zawierają zestawienia współrzędnych zaokrąglonych do jednego metra oraz prędkości zaokrąglonych do jednego milimetra na sekundę. Argumentem jest uniwersalny czas koordynowany TUC, a interwał argumentu wynosi jedną minutę. Efemerydy odniesione są do początku układu współrzędnych bieguna OCI, a podawane post factum z opóźnieniem dochodzącym nawet do jednego miesiąca.

Efemerydy robocze [5] powstają w wyniku śledzenia za satelitami na 36-godzinnych łukach orbit przez cztery stacje amerykańskie, położone na terytorium następujących stanów: Maine, Minnesota, Kalifornia i na Hawajach. Są one ekstrapolowane na 16 godzin naprzód i wprowadzane do pamięci każdego satelity nawigacyjnego dwa razy dziennie, a przekazywane użytkownikom automatycznie drogą radiową. Efemerydy robocze są podawane w postaci zestawień parametrów orbit oskulacyjnych i perturbowanych na żadaną epokę.

Błędy współrzędnych satelitów są następstwem nie tylko błędów towarzyszących obserwacjom, ale również konsekwencją niedoskonałej znajomości pola grawitacyjnego.

Błędy instrumentalne — to przede wszystkim zmienność opóźnień aparatury odbiorczej, zmienność położenia środka fazowego anteny odbiorczej, zmienność częstotliwości emitowanych przez satelitę sygnałów, niestałość chodu zegara i częstotliwości generatora naziemnego, a także niedokładna znajomość czasu koordynowanego.

W roku 1972, w wyniku przeprowadzonego we Francji eksperymentu TRAPOL [6], okazało się w praktyce, że obserwacje dopplerowskie jednego satelity o orbicie prostopadłej do równika ziemskiego, wykonywane na jednej tylko stacji, pozwalają na wyprowadzenie z dobrą dokładnością zmian szerokości i długości geograficznych tej stacji, o ile znane są precyzyjne współrzędne satelity. W następnym roku została zainstalowana w Cerga koło Grasse, w Prowansji, około 15 km na północ od Cannes, aparatura dopplerowska i w listopadzie rozpoczęto regularne obserwacje [7]. Do marca 1974 roku obserwowano satelitę 1967—092 A, a od kwietnia 1974 roku satelitę Oscar 6.

Dotychczasowe wyniki wyznaczeń szerokości i długości geograficznych stacji Cerga układają się w pasach wzdłuż wyrównanych krzywych: rozrzut pierwszych zamyka się w granicach  $0,03''$ , drugich zaś nie przekracza  $0,08''$ . Ponadto przejawiają się okresowe odchylenia wyników od danych BIH i DPMS, mające swe źródło najprawdopodobniej w niedokładnej znajomości pola grawitacyjnego.

Międzynarodowe Biuro Czasu w Paryżu rozpoczęło wykorzystywać dane DPMS od 1972 roku [8], początkowo dla wyprowadzenia współczynników rozwinięcia różnic współrzędnych bieguna w obu systemach, a od 1973 roku do bieżących wyznaczeń współrzędnych bieguna i podtrzymywania układu odniesienia.

Współrzędne bieguna  $x$  oraz  $y$  są uważane za wahania szerokości geograficznej dwóch stacji fikcyjnych położonych na równiku, których dłu-

Tablica 2

Okres czasu	$X_{DPMS} - X_{BIH}$ w 0,001"					$Y_{DPMS} - Y_{BIH}$ w 0,001"				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
1967,00 ÷ 1967,95	+69	+51	+18	+29	+12	-72	-26	-30	-24	-3
1968,00 ÷ 1968,95	+52	+40	-11	-5	+4	-77	+35	+25	+22	+7
1969,00 ÷ 1969,95	-7	+12	-12	+4	-14	+57	+3	+2	+6	-5
1970,00 ÷ 1970,95	-23	+15	-33	-9	+1	+1	-5	+2	+14	+17
1971,00 ÷ 1971,95	-3	+20	-4	-6	-2	-13	-12	-12	-8	+10
1972,00 ÷ 1972,95	-13	+12	-28	-13	0	-3	0	-6	+5	+4
1973,00 ÷ 1973,95	-10	+6	-12	-8	0	-10	+4	-1	+1	0
1974,00 ÷ 1974,95	-9	+17	-11	-2	+7	-8	+4	0	0	0

gości geograficzne wynoszą odpowiednio  $0^\circ$  i  $+90^\circ$ . Wyniki dwudobowych pomiarów traktuje się na równi z obserwacjami grup gwiazd i tak samo redukuje do dat co 0,05 roku. Różnice współrzędnych ( $x_{\text{DPMS}} - x_{\text{BIH}}$ ) oraz ( $y_{\text{DPMS}} - y_{\text{BIH}}$ ), analogicznie do obserwacji astrometrycznych, są rozwijane w szereg następujący:

$$(\text{DPMS} - \text{BIH}) = a + b \sin 2\pi t + c \cos 2\pi t + d \sin 4\pi t + e \cos 4\pi t.$$

Współczynniki [8] podano w tablicy 2.

Od początku roku 1969 dane DPMS opierają się na nowym systemie współrzędnych NWL9 na elipsoidzie o następujących parametrach [9]:

$$a = 6\,378\,145 \text{ m}; \quad \frac{a-b}{a} = 298,25.$$

O dużej dokładności rezultatów DPMS łatwo przekonać się porównując zmienność współczynników z tablicy 2 ze zmiennością współczynników klasycznych obserwacji astrometrycznych. Dla przykładu zestawiono w tablicy 3 współczynniki dla dwóch czołowych obserwatoriów służby szerokości [8].

Tablica 3

Okres czasu	Herstmonceux PZT <i>R w 0,001''</i>					Paris Astrolabium <i>R w 0,001''</i>				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
1967,00 ÷ 1967,95	+368	+19	+3	+1	-18	+7	0	+40	-6	-25
1968,00 ÷ 1968,95	+369	+29	-2	+4	-7	+9	+9	+46	-4	-7
1969,00 ÷ 1969,95	+333	+19	-8	+10	-11	+29	0	+32	-14	+12
1970,00 ÷ 1970,95	+362	+11	-12	0	-11	-4	+30	+41	+12	-2
1971,00 ÷ 1971,95	+362	-11	-17	-12	-24	-10	+14	+43	-7	-5
1972,00 ÷ 1972,95	+370	+33	-9	-4	-18	-6	+23	+51	0	0
1973,00 ÷ 1973,95	+369	-4	-19	-12	-6	-4	+17	+57	0	-6
1974,00 ÷ 1974,95	+350	+16	-4	-3	-36	+35	-12	+70	-26	+8

Współczynniki z tablicy 2 wykazują większą stałość niż te z tablicy 3. Też BIH przyjmuje do wyrównania ostatecznych wartości współrzędnych bieguna wyniki DPMS ( $x$ ) z wagą 150, DPMS ( $y$ ) z wagą 200, a rezultaty obserwatorium grynickiego i paryskiego z wagami 99. Wyniki stacji Cerga są jeszcze w fazie dostosowywania do systemu BIH.

Można sądzić, że znaczenie obserwacji dopplerowskich będzie stopniowo rosło, choć klasyczne metody astrometryczne długo jeszcze będą decydowały o stałości układu odniesienia. Metoda Dopplera daje wyniki o charakterze różnicowym, które muszą być dowiązywane i dostosowywane do systemu tworzonego przez rezultaty bezpośrednich obserwacji klasycznych.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Anderle R.J., Beuglass L.K.*: Doppler Satellite Observations of Polar Motion. Bulletin Géodésique, nr 96, Paris 1970.
- [2] *Anderle R.J.*: Pole position based on Doppler Satellite Observations. NWL Technical Report TR-2432, Dahlgren 1970.
- [3] *Wells D.E., Kouba J.*: Semi-dynamical Doppler satellite positioning. General Assembly of the IAG, Grenoble 1975.
- [4] *Sims T.*: The NWL precise ephemeris. NWL Technical Report TR-2872, Dahlgren 1972.
- [5] *Piscane V.L., Holland B.B., Black H.D.*: Recent improvements in the Navy Navigation Satellite System. Navigation nr 20, 1973.
- [6] *Capitaine N.*: Résultats de l'expérience TRAPOL. Détermination du pôle par des observations Doppler en une seule station. Bulletin GRGS nr 9, 1973.
- [7] *Capitaine N., Saint-Crit L.*: Variation of latitude and longitude of station of Cerga from Doppler satellite tracking and precise satellite ephemeris. General Assembly of the IAG, Grenoble 1975.
- [8] Bureau International de l'Heure: Rapports Annuels du BIH pour 1967÷1974. Paris.
- [9] *Weightman J.A.*: Doppler Ties to European Datum and the European Geoid. Commonwealth Survey Officers Conference 1975.

*Recenzował doc. dr hab. inż. Janusz Sledziński*

*Rękopis złożono w Redakcji w styczniu 1976 r.*

ЮЛИАН РАДЕЦКИ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛЮСА С ПОМОЩЬЮ ДОППЛЕРОВСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

### Резюме

Целью этой работы является указание на основе новейшей литературы направления, в котором развиваются в настоящее время методы наблюдений перемещений географических полюсов.

В шестидесятых годах введено в Dahlgren метод определения положения полюса на основе доплеровских наблюдений искусственных спутников Земли и вскоре организована была служба под названием Dahlgren Polar Monitoring Service. На точность определения решающее значение имеют ошибки координат спутника, недостаточное знание влияния рефракции в ионосфере и тропосфере, а также инструментальные ошибки.

Эксперимент TRAPOL показал, что доплеровские наблюдения одного спутника, проводимые в одной только станции, разрешают ввести с хорошей точностью изменении географической широты и долготы этой станции, насколько являются известные точные эфемериды спутника. В 1973 году начаты в Cerga регулярные исследования перемещений полюсов этим методом.

Bureau International de l'Heure в Париже начано использовать результаты спутниковых определений. Результаты полученные с помощью DPMS, оказались точнее, чем определение полученные классическими методами. Эти последние, однако еще долгое время будут решать о постоянстве системы отнесения.

*JULIAN RADECKI*

## INVESTIGATION OF POLAR MOTION USING DOPPLER OBSERVATIONS OF THE ARTIFICIAL EARTH SATELLITES

### Summary

The aim of this paper is to show, on the basis of the current literature, the direction in which methods of polar motion investigations developed nowadays.

In the sixties in Dahlgren a method of determination of the pole position on the basis of the Artificial Earth Satellites Doppler observations was developed and soon after that regular service called Dahlgren Polar Monitoring Service was set up. Errors of satellite coordinates, inexact knowledge of the refraction influence in the ionosphere and troposphere as well as the instrumental errors have the essential influence on the accuracy of determination.

In the course of TRAPOL experiment it was shown that Doppler observations of one navigation satellite, carried on only from one station allow to determine changes in the latitude and longitude of such a station with proper precision, providing that accurate satellite ephemerides are known. In 1973 in Cerga regular analyses of the pole displacements were started.

Bureau International de l'Heure in Paris has begun to apply the results of satellite determination. The results obtained by DPMS came to be more precise than the ones that were determined by conventional methods. Though, the lastmentioned methods will decide about stability of the reference system for a long time.