

WIESŁAW KOSEK
MACIEJ KALARUS
Centrum Badań Kosmicznych PAN
Warszawa
WALDEMAR POPIŃSKI
Główny Urząd Statystyczny
Warszawa

PORÓWNANIE WYNIKÓW RÓŻNYCH METOD PROGNOZOWANIA PARAMETRÓW ORIENTACJI ZIEMI

ZARYS TREŚCI: Prognozy parametrów orientacji Ziemi potrzebne są do wyznaczenia w czasie rzeczywistym transformacji pomiędzy niebieskim i ziemskim układem odniesienia. W pracy przedstawione zostały różne metody prognozowania współrzędnych x , y bieguna ziemskiego i czasu $UT1 - UTC$, takie jak metoda najmniejszych kwadratów (LS), autoregresji (AR), autoregresji i średniej ruchomej ($ARMA$), autokowariancji (AC), sieci neuronowych (NN), a także kombinacje metody LS z metodami AR , $ARMA$, AC i NN . Przedstawiona została także metoda prognozowania współrzędnych bieguna ziemskiego w układzie współrzędnych biegunowych. Najwyższą dokładność prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego uzyskuje się poprzez zastosowanie kombinacji metody LS z metodą AR ($LS+AR$). Błędy prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego są mniejsze niż dla metody prognozowania obecnie stosowanej przez IERS Rapid Service/Prediction Centre w USNO. Prognozy metodą $LS+AR$ współrzędnych bieguna ziemskiego są raz na tydzień automatycznie wyznaczane, wysyłane do USNO i porównywane na bieżąco z prognozami tam wyznaczanymi. Metoda ta wkrótce zostanie zastosowana do rutynowych wyznaczeń prognoz współrzędnych bieguna ziemskiego w IERS Rapid Service/Prediction Centre.

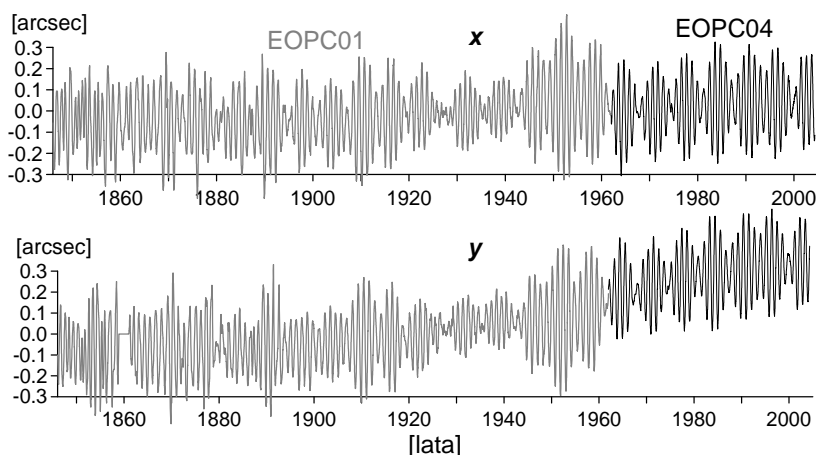
1. PARAMETRY ORIENTACJI ZIEMI A TRANSFORMACJA POMIĘDZY ZIEMSKIM I NIEBIESKIM UKŁADEM ODNIESIENIA

Do parametrów orientacji Ziemi należą współrzędne x , y bieguna ziemskiego, $UT1 - UTC$, oraz efekt precesyjno-nutacyjny wyrażony w długości i nachyleniu. Współrzędne bieguna ziemskiego dostępne są już od 1846 r., zmiany $UT1 - UTC$ od 1962 r., natomiast poprawki do modelu nutacji z obserwacji VLBI od 1979 r. Aktualizowane są one na stronach internetowych Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi (International Earth Rotation Service, IERS) (IERS 2003). W zbiorze IERS EOPC04 o interwale próbkowania 1 dzień, który został wykorzystany w obliczeniach, znajdują się

współrzędne x , y bieguna ziemskiego oraz zmiany czasu uniwersalnego $UT1 - UTC$ i długości doby (**L**ength of **D**ay, LOD). Dodatkowo wykorzystane zostały współrzędne x , y bieguna ziemskiego IERS EOPC01 od 1846 do 1962 r. Z interwałem próbkowania 0.05 lat w celu przedłużenia wstecz ciągu czasowego współrzędnych bieguna EOPC04 obejmującego okres od początku 1962 do połowy 2004 r.

1.1. Ruch bieguna ziemskiego

Ruch bieguna ziemskiego zaobserwowany został po raz pierwszy w połowie XIX w. w wyniku analiz obserwacji astrometrycznych zmian szerokości astronomicznych stacji. Od roku 1980 wyznaczone współrzędne bieguna odnoszono do tzw. Niebieskiego Bieguna Efemerydalnego (**C**elestial **E**phemeris **P**ole, *CEP*) obowiązującego do końca 2002 r. Od 1 stycznia 2003, zgodnie z rezolucją B1.7 przyjętą na XXIV Generalnym Zgromadzeniu IAU w Manchesterze w 2000 r., *CEP* został zastąpiony przez tzw. Niebieski Biegun Pośredni (**C**elestial **I**ntermediate **P**ole, *CIP*) (Capitaine i in. 2003). Najbardziej energetycznymi oscylacjami we współrzędnych bieguna ziemskiego są oscylacje Chandlera i roczna. Rola momentu pędu atmosfery w pobudzeniu oscylacji Chandlera, rocznej (Chao i Au 1991), a także oscylacji o okresach krótszych niż rok (Eubanks i in. 1988; Kosek i in. 1995) jest znacząca, chociaż nie do końca wyjaśnia ich przyczynę. Uwzględnienie dodatkowo momentu pędu oceanu znacznie poprawiło korelację pomiędzy łączną atmosferyczno-oceaniczną funkcją pobudzenia a funkcją pobudzenia wyznaczoną ze współrzędnych bieguna w zakresie częstotliwości Chandlera, rocznej oraz zmian o okresach krótszych niż rok (Ponte i Stammer 1999; Brzeziński i in. 2003; Gross i in. 2003; Kosek 2004a, 2004b). Przebieg zmienności współrzędnych x , y bieguna ziemskiego EOPC04 oraz EOPC01 przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Współrzędne x , y bieguna ziemskiego EOPC01 (linia szara) i EOPC04 (linia czarna)

1.2. Zmiany prędkości obrotowej Ziemi

Zmiany prędkości obrotowej Ziemi wyrażone przez czas $UT1 - UTC$ lub jego pierwszą pochodną LOD powodowane są głównie zmianami pływowymi związanymi z oddziaływaniem grawitacyjnym Słońca i Księżycy (McCarthy i Luzum 1993) oraz niepływowymi, których główną przyczyną jest wymiana momentu pędu pomiędzy Ziemią a atmosferą (Hide i in. 1980). Jednym z ważniejszych czynników wpływających na długookresowe zmiany składowej osiowej momentu pędu atmosfery oraz LOD jest zjawisko ENSO (El Niño – Southern Oscillation) (Dickey i in. 1999; Salstein i in. 1999).

Deformacje pływowe $UT1-UTC$ i LOD

Oddziaływanie grawitacyjne Słońca i Księżycy w zmianach czasu uniwersalnego $UT1 - UTC$ lub zmianach długości doby LOD może być modelowane przy użyciu funkcji deterministycznej odpowiednio według następujących wzorów:

$$\delta UT1 = \sum_{i=1}^{62} B_i \sin \xi_i + C_i \cos \xi_i, \quad \delta LOD = \sum_{i=1}^{62} B'_i \cos \xi_i + C'_i \sin \xi_i \quad (1)$$

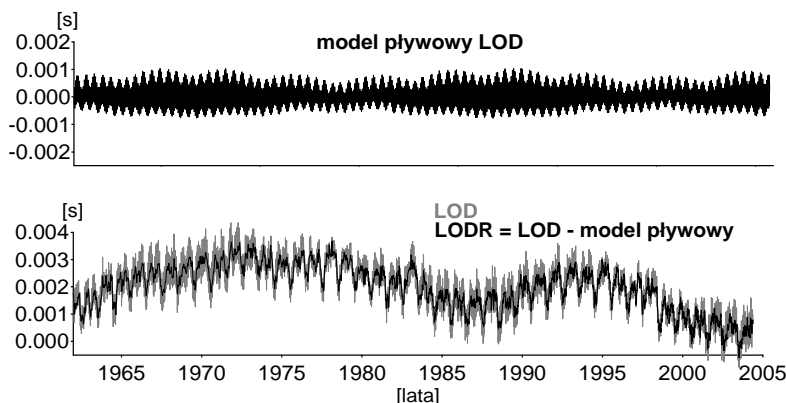
gdzie B_i, C_i, B'_i, C'_i – parametry modelu

$$\xi_i = \sum_{j=1}^5 a_{ij} \alpha_j$$

a_{ij} – całkowite mnożniki

α_j – argumenty nutacji lunisolarnej l, l', F, D, Ω (McCarthy 1996).

Model oscylacji pływowych w zmianach długości doby oraz zmiany długości doby przed i po odjęciu modelu pływowego widoczne są na rysunku 2.



Rys. 2. Model oscylacji pływowych w zmianach długości doby oraz zmiany długości doby przed (LOD – linia szara) i po odjęciu modelu pływowego ($LODR$ – linia czarna)

1.3. Precesja i nutacja

Główną przyczyną zmian precesji i nutacji jest oddziaływanie grawitacyjne Słońca i Księżyca na część masy Ziemi znajdującej się poza masą kulistą. Zmiany te dla Ziemi stałe są dobrze poznane ze względu na dokładnie określone okresy precesji (25 600 lat) oraz głównych wyrazów nutacji (13.66 dni, 0.5 roku, 1 rok, 9.3 lat oraz 18.6 lat). Wpływ atmosfery i oceanu na zmiany nutacji (zmiany położenia bieguna względem *ICRS*) jest znacznie mniejszy niż na zmiany współrzędnych bieguna ziemskiego (zmiany położenia bieguna względem *ITRS*) lub *UTI* – *UTC*, chociaż, jak wskazują ostatnie badania, nie jest on zaniedbywalny i dalsze modelowanie nutacji jest obecnie przedmiotem intensywnych badań (Gegout i in. 1998; Bizouard i in. 1998; de Viron i in. 2001; Dehant i in. 2003).

1.4. Transformacja pomiędzy niebieskim i ziemskim układem odniesienia oraz jej dokładność

Transformacja pomiędzy niebieskim i ziemskim układem odniesienia (*ICRF* i *ITRF*) jest funkcją czasu i jej parametrami są parametry orientacji Ziemi (Earth Orientation Parameters, EOP). Parametry orientacji Ziemi określają ruch osi Ziemi w przestrzeni względem *ICRF*, czyli precesję i nutację oraz ruch osi obrotu Ziemi względem *ITRF*, czyli ruch bieguna oraz zmiany prędkości obrotowej Ziemi. Transformacja ta realizowana jest wzorem:

$$[CRS] = Q(t)R(t)W(t)[TRS] \quad (2)$$

gdzie macierze $Q(t)$, $R(t)$, $W(t)$ określają kolejno: ruch bieguna względem systemu niebieskiego, obrót Ziemi wokół osi biegunowej oraz obrót uwzględniający ruch bieguna względem systemu ziemskiego.

Tablica 1. Błąd wyznaczenia x , y , UTI – UTC w poszczególnych latach w rozwiązaniu kombinowanym EOPC04

	1976	1980	1984	1988	1992	1996	2000	2004
x [mas]	16.3	2.6	0.72	0.53	0.29	0.12	0.074	0.058
y [mas]	14.3	1.5	0.60	0.47	0.29	0.15	0.074	0.060
$UTI - UTC$ [ms]	0.406	0.238	0.069	0.044	0.016	0.010	0.012	0.006

Dokładność transformacji dwóch konwencjonalnych układów odniesienia *ICRF* i *ITRF* w czasie rzeczywistym zależy od precyzji wyznaczenia i prognozowania EOP, których dokładność wzrastała od początku lat 70. dzięki zastosowaniu nowoczesnych technik geodezji kosmicznej. W tablicy 1 pokazane są średnie błędy EOP od 1976 r. Parametry orientacji Ziemi zostały wyznaczone przez IERS jako kombinacja różnych rozwiązań EOP z obserwacji astrometrycznych, SLR, VLBI, GPS i DORIS. Obecna dokładność wyznaczenia współrzędnych bieguna ziemskiego i poprawek do modelu nutacji IAU2000A wynosi około 0.06 mas, natomiast zmian długości doby około

0.006 ms, co na powierzchni Ziemi odpowiada przesunięciom odpowiednio rzędu 1.8 mm i 2.8 mm.

Dokładność prognozowania EOP jest bardzo mała w stosunku do dokładności ich wyznaczenia, a stosunek średniego błędu prognozy do średniego błędu wyznaczenia EOP wzrasta z długością prognozy (Kosek 1993, 1997, 2000, 2002; Kosek i in. 1998, 2000, 2001, 2002, 2004; Malkin i Skurikhina 1996; McCarthy i Luzum 1991; Schuh i in. 2002). W tablicy 2 przedstawione zostały średnie błędy prognozy EOP od 1 do 60 dni w przyszłości oraz stosunek tych błędów do średnich błędów ich wyznaczenia w roku 2000. Biorąc pod uwagę to, że prognoza EOP obliczana jest przez IERS Rapid Service/Prediction Centre raz w tygodniu, widoczne jest, że po tym czasie błędy prognoz EOP są kilkadziesiąt razy większe niż dokładność ich wyznaczenia. Stosunek błędów prognozy do błędów wyznaczenia EOP rośnie szybciej dla $UTI - UTC$ niż dla współrzędnych bieguna ziemskiego. Pozostałe parametry transformacji pomiędzy systemami $ICRS$ i $ITRS$, precesja i nutacja prognozowane są prawie z dokładnością ich wyznaczenia ze względu na to, że deterministyczny model tych zmian jest obecnie bardzo dobrze znany (McCarthy 1996; McCarthy i Luzum 2003; Brzeziński i Kosek 2004). Błąd prognozy precesji i nutacji niezależnie od jej długości wynosi 0.13 mas. Czym wyższa precyzja wyznaczenia EOP, tym większy staje się stosunek błędów ich prognozowanych wartości do błędów ich wyznaczenia. Stąd, IERS Rapid Service/Prediction Centre jest zainteresowane dokładniejszym niż obecnie prognozowaniem współrzędnych x, y bieguna ziemskiego oraz $UTI - UTC$.

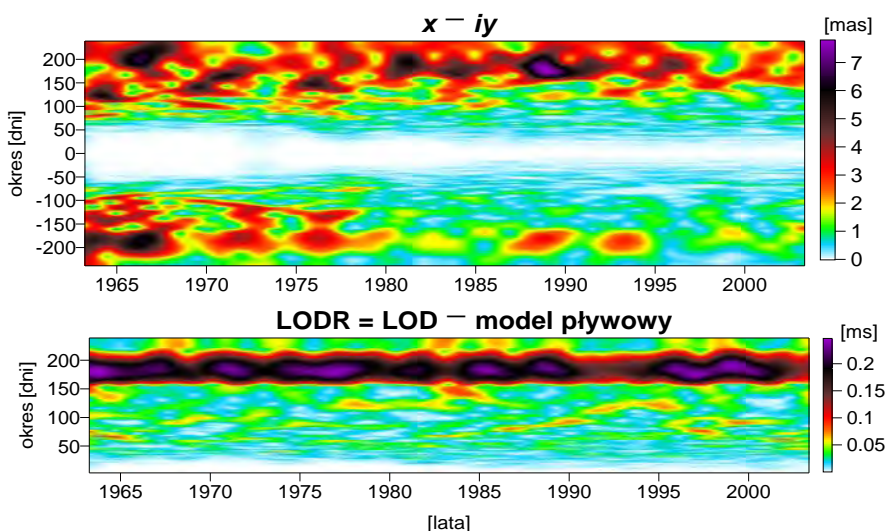
Tablica 2. Średnie błędy prognozy współrzędnych x, y bieguna ziemskiego oraz $UTI-UTC$ od 1 do 60 dni w przyszłości oraz ich stosunek do błędu ich wyznaczenia w 2000 roku

Dni w przyszłości		1	7	20	40	60
x, y [mas]		0.5	2.7	6.3	10.6	14.2
$UTI - UTC$ [ms]		0.12	0.7	3.6	6.9	10.1
Stosunek błędu prognozy do błędu wyznaczenia EOP	x, y	~7	~36	~85	~140	~190
	$UTI - UTC$	~10	~58	~300	~580	~840

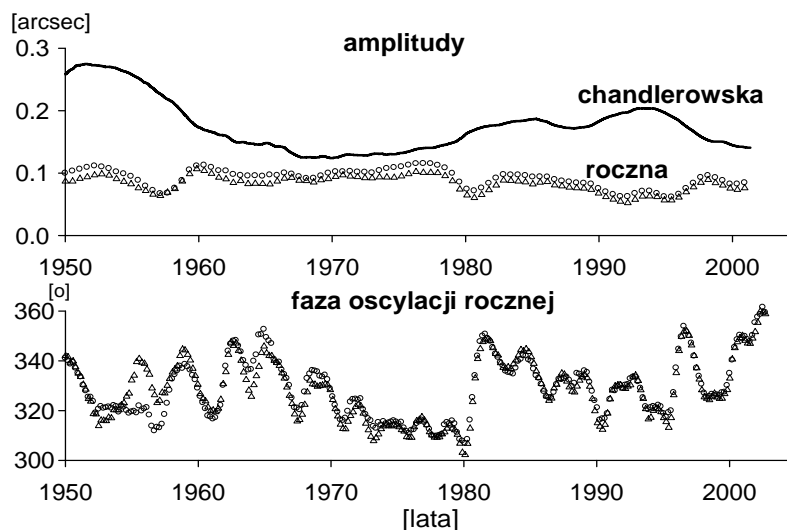
2. PRZYCZYNY WZRATAJĄCYCH BŁĘDÓW PROGNOZY WSPÓLRZĘDNYCH BIEGUNA ZIEMSKIEGO ORAZ $UTI - UTC$

Powodem wzrostu błędu prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego są nieregularne zmiany amplitud i faz oscylacji krótkookresowych od kilku do około 250 dni (Kosek i Kołaczek 1995, 1997; Kosek i in. 1995; Kosek 2000), a także zmiany amplitud i faz oscylacji rocznej i Chandlera (Kosek i in. 2001, 2002). Najbardziej znaczącym czynnikiem wpływającym na wzrost błędów prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego i $UTI - UTC$ do kilku dni w przyszłości są nieregularne zmiany występujące podczas wymiany momen-

tów pędu pomiędzy stałą Ziemią a zewnętrznymi ośrodkami ciekłymi, atmosferą, oceanem i hydrosferą lądową. Przez nieregularne zaburzenia rozumiane są takie, których nie daje się przedstawić ani ekstrapolować funkcją matematyczną. Niemożność wymodelowania tych nieregularnych zmian EOP powoduje wzrost błędu ich prognozy. Rysunek 3 przedstawia czasowo-częstotliwościowe widma mocy wyznaczone metodą środkowoprzepustowego filtra transformaty Fouriera (FTBPF) (Popiński i Kosek 1995; Kosek 1995) zespolonych współrzędnych bieguna ziemskiego i zmian długości doby, na których widoczne są nieregularne zmiany amplitud oscylacji krótkookresowych. Dokładność prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego spowodowana jest także zmianą amplitudy oscylacji rocznej i Chandlera, a także fazy oscylacji rocznej, widocznych na rysunku 4 (Kosek i in. 2001, 2002). Zmiany te zostały wyznaczone metodą LS dla modelu ekstrapolacji współrzędnych bieguna ziemskiego dopasowanego do ciągu danych o długości 3 lat. Model ten składa się z kołowej oscylacji Chandlera oraz dwóch eliptycznych oscylacji rocznej i półrocznej. Zmiany amplitudy oscylacji Chandlera są większe niż rocznej, jednak ze względu na ich wygładzenie nie wpływają na błąd prognozy tak znacząco jak zmiany amplitudy oscylacji rocznej. Wzrost długości ciągu danych, z których wyznaczany jest model LS, spowodował wzrost błędów prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego, szczególnie w okresie wystąpienia dwóch największych w poprzednim stuleciu zjawisk El Niño w latach 1982/1983 oraz 1997/1998 (Kosek i in. 2001, 2002). Zarówno faza, jak i amplituda oscylacji rocznej osiągnęły największe wartości przed wystąpieniem tych zjawisk. Dokładność prognozy długookresowej zależy natomiast od zmian amplitudy i fazy oscylacji Chandlera, a także zmienności oscylacji długookresowych i wiekowych (Schuh i in. 2001).



Rys. 3. Czasowo-częstotliwościowe widma mocy FTBPF zespolonych współrzędnych bieguna ziemskiego i zmian długości doby



Rys. 4. Zmiany amplitud oscylacji Chandlera (linia ciągła) i rocznej oraz zmiany fazy oscylacji rocznej wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów w 3-letnich przedziałach czasowych współrzędnych x (okręgi), y (trójkąty) bieguna ziemskiego IERS EOPC04

3. PROGNOZA PARAMETRÓW RUCHU OBROTOWEGO ZIEMI WYZNACZANA W IERS RAPID SERVICE/PREDICTION CENTRE W USNO

Prognoza współrzędnych x , y bieguna ziemskiego, $UT1 - UTC$ oraz poprawek do modelu nutacji obliczana jest obecnie przez IERS Rapid Service/Prediction Centre, zlokalizowany w U.S. Naval Observatory w Waszyngtonie. Od 22 maja 2001 r. prognoza współrzędnych x , y bieguna ziemskiego jest ekstrapolacją modelu najmniejszych kwadratów kołowej oscylacji Chandlera, dwóch eliptycznych oscylacji rocznej i półrocznej oraz składowej liniowej. Model ten jest dopasowany do współrzędnych bieguna ziemskiego z ostatnich 400 dni i ekstrapolowany na 1 rok w przyszłość (McCarthy i Luzum 1991). Do prognozy dodawana jest poprawka liniowa wynikająca z różnicy pomiędzy ostatnią wartością danych a modelem. Poprawka ta maleje wraz z długością prognozy. Poprzednia metoda prognozowania ruchu bieguna ziemskiego była ekstrapolacją tego samego modelu dopasowywanego do ostatnich 1100 dni danych ruchu bieguna ziemskiego. Skrócenie czasu dopasowania modelu najmniejszych kwadratów do danych współrzędnych bieguna ziemskiego z 3 lat do 1 roku podyktowane było wzrastającymi błędami prognozy szczególnie w okresie zjawisk El Niño (Kosek i in. 2001).

Od 14 sierpnia 2001 r. prognoza $UT1 - UTC$ wykorzystuje składową osiową momentu pędu EAAM NCEP/NCAR poprzez dołączenie jej do wek-

tora obserwacyjnego filtru Kalmana w postaci szeregu czasowego podobnego do zmian *UTI* (UTAAM) (Luzum i in. 2001; Johnson i in. 2004). Dokładność tej prognozy do około 10 dni w przyszłości wzrosła o 42% w stosunku do poprzedniej metody prognozowania metodą filtru Gaussa (McCarthy i Luzum 1991).

Prognoza poprawek $\Delta\psi, \Delta\varepsilon$ do nutacji wyznaczana jest jako ekstrapolacja modelu najmniejszych kwadratów KSV_1996_3 (McCarthy 1996). Ze względu na pozyskanie nowego modelu precesyjno-nutacyjnego (Mathews i in. 2002) nowy model metody najmniejszych kwadratów zawiera mniejszą liczbę parametrów niż poprzedni.

4. ZASTOSOWANE METODY PROGNOZOWANIA

Głównym problemem w prognozowaniu jest wyznaczenie przewidywanej wartości szeregu czasowego poza przedziałem czasowym, w którym szereg ten jest określony. Prognoza szeregów czasowych obliczona dowolną metodą prognozowania jest tym dokładniej wyznaczona, im mniejsza jest różnica pomiędzy jej wartością a rzeczywistymi danymi w przyszłości. Porównanie takich różnic w różnych momentach czasu rozpoczęcia prognozowania pozwala ocenić dokładność każdej metody prognozy.

4.1. Metoda autokowariancyjna (AC)

W autokowariancyjnej metodzie prognozowania (AC) wartość pierwszego punktu prognozy stacjonarnego dwuwymiarowego szeregu czasowego x_1, x_2, \dots, x_n (gdzie $x_t = x_1 + ix_2$) wyznaczana jest następującym wzorem (Kosek 2002):

$$x_{n+1} = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} \hat{c}_k x_{n-k+1}}{\hat{c}_0} \quad (3)$$

gdzie

$$\hat{c}_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} x_t \bar{x}_{t+k} \quad k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

jest estymatorem autokowariancji szeregu czasowego x_t , n – liczbą danych.

Następny punkt prognozy x_{n+l} można wyznaczyć wówczas, gdy poprzedni punkt prognozy x_{n+l-1} zostanie dodany do szeregu czasowego, gdzie l jest długością prognozy.

4.2. Metoda autoregresji (AR)

Proces autoregresji rzędu p określony jest następującym wzorem:

$$x_t = a_1 x_{t-1} + a_2 x_{t-2} + \dots + a_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (5)$$

gdzie a_1, a_2, \dots, a_p są współczynnikami autoregresji, p jest rzędem autoregresji, natomiast ε_t jest białym szumem.

Prognoza metodą autoregresji (AR) spełnia równanie procesu autoregresji (5) i określona jest wzorem:

$$\hat{x}_{n+l} = \hat{a}_1 \hat{x}_{n+l-1} + \hat{a}_2 \hat{x}_{n+l-2} + \dots + \hat{a}_p \hat{x}_{n-p-l} \quad \text{dla } l = 1, 2, \dots \quad (6)$$

gdzie $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p$ są estymatorami współczynników autoregresji wyznaczanymi z równań Yule'a-Walkera (Box i Jenkins 1976):

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \cdot \\ \hat{a}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{c}_0 & \hat{c}_1 & \cdot & \hat{c}_{p-1} \\ \hat{c}_1 & \hat{c}_0 & \cdot & \hat{c}_{p-2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{c}_{p-1} & \hat{c}_{p-2} & \cdot & \hat{c}_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{c}_1 \\ \hat{c}_2 \\ \cdot \\ \hat{c}_p \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$\hat{c}_0, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_p$ są estymatorami autokowariancji określonymi równaniem (4), rząd autoregresji p wyznaczony jest z kryterium Akaike (Akaike Information Criterium, AIC) (1974):

$$\text{AIC}(p) = \ln \hat{\sigma}_\varepsilon^2(p) + \frac{2p}{n} = \min \quad (8)$$

w którym $\hat{\sigma}_\varepsilon^2(p) = \hat{c}_0 - \hat{a}_1 \hat{c}_1 - \hat{a}_2 \hat{c}_2 - \dots - \hat{a}_p \hat{c}_p$ jest estymatorem wariancji szumu opartym na p -parametrowym modelu.

Współczynniki autoregresji dwuwymiarowych szeregów czasowych wyznaczone zostały metodą najmniejszych kwadratów (Brzeziński 1994, 1995) według algorytmu, który jest modyfikacją algorytmu Barrodale'a i Ericksona (1980) dla jednowymiarowych szeregów czasowych.

4.3. Metoda autoregresji średniej ruchomej (ARMA)

Proces autoregresji średniej ruchomej ARMA(p, q) określony jest następującym wzorem (Box i Jenkins 1976):

$$x_t = \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} + \sum_{i=0}^q \phi_i \varepsilon_{t-i} \quad (9)$$

gdzie a_i , ϕ_i oraz p , q są odpowiednio współczynnikami oraz rzędami autoregresji i średniej ruchomej.

Wprowadzając operator przesunięcia wstecz B , o własnościach $Bz_t = z_{t-1}$, $Bz_{t-1} = B^2z_t = z_{t-2}$, równanie (9) może być przekształcone w następujący sposób:

$$x_t - a_1Bx_t - \dots - a_pB^p x_t = \varepsilon_t + \phi_1B\varepsilon_t + \dots + \phi_qB^q \varepsilon_t \quad (10)$$

$$x_t(1 - a_1B - \dots - a_pB^p) = \varepsilon_t(1 + \phi_1B + \dots + \phi_qB^q) \quad (11)$$

$$x_t a(B) = \varepsilon_t \phi(B) \quad (12)$$

Proces autoregresji średniej ruchomej skończonego rzędu ARMA(p , q) można przekształcić do procesu średniej ruchomej nieskończonego rzędu MA(∞) w następujący sposób:

$$x_t = \frac{\phi(B)}{a(B)} \varepsilon_t = \psi(B) \varepsilon_t = \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j \varepsilon_{t-j} \quad (13)$$

gdzie $\psi(B)$ jest wielomianem procesu średniej ruchomej nieskończonego rzędu.

Na podstawie równania (13) można określić przyszłe wartości procesu autoregresji średniej ruchomej według następujących wzorów:

$$x_{t+l} = \underbrace{\{\psi_0\varepsilon_{t+l} + \psi_1\varepsilon_{t+l-1} + \dots + \psi_{l-1}\varepsilon_{t+1}\}}_{\text{przyszłe } \varepsilon_{t+k} = 0 \text{ dla } k = 1, 2, \dots, l} + \{\psi_l\varepsilon_t + \psi_{l+1}\varepsilon_{t-1} + \dots\}, \quad (14)$$

$$x_{t+l} = \psi_l\varepsilon_t + \psi_{l+1}\varepsilon_{t-1} + \dots \quad (15)$$

Korzystając ze wzoru (13), określa się przyszłe wartości procesu również w inny sposób:

$$x_{t+l} = \psi(B)\varepsilon_{t+l} = \psi(B)B^{-l}\varepsilon_t = \left\{ \frac{\psi(B)}{B^l} \right\} \cdot \varepsilon_t = \left\{ \frac{\psi(B)}{B^l} \right\} \cdot \frac{x_t}{\psi(B)} \quad (16)$$

Stąd prognoza procesu autoregresji średniej ruchomej (ARMA) może być wyrażona przez wartości procesu stochastycznego x_t według następującego wzoru:

$$\hat{x}_{t+l} = \left\{ \frac{\psi(B)}{B^l} \right\}_+ \cdot \frac{x_t}{\psi(B)} \quad (17)$$

gdzie $\left\{ \frac{\psi(B)}{B^l} \right\}_+$ oznacza część operatora zawierająca tylko dodatnie potęgi B .

4.4. Metoda sieci neuronowych (NN)

Sztuczne Sieci Neuronowe (SSN) należą do jednej z najbardziej popularnych inteligentnych technik przetwarzania informacji. Stosuje się je szeroko w inżynierii, nauce i ekonomii do rozwiązywania wielu problemów, szczególnie nieliniowych, np. prognozowania, rozpoznawania dźwięku i obrazu, zarządzania, wnioskowania. Model SSN jest matematycznym modelem inspirowanym przez funkcjonalność ludzkiego mózgu, a w szczególności przez jego zdolność do uogólniania wiedzy. Proces projektowania takiej sieci nie jest prosty i w ogólności bazuje na wielokrotnych testach oraz, w głównej mierze, na doświadczeniu. Popularność sieci w dziedzinie prognozowania wynika z tego, że dają one rezultaty lepsze niż wiele wyrafinowanych metod statystycznych. Naukę sieci, w tym przypadku, można rozpatrywać jako pewien proces optymalizacyjny, który poprzez trenowanie wydobywa ukryte relacje między kolejnymi elementami szeregu czasowego.

Prognozowanie danych EOP przy pomocy SSN zostało przetestowane przez Eggera i Fröhlicha (1993) oraz Schuha i in. (2002). W celu zredukowania liczby danych do prognozowania metodą Neural Network (NN), a tym samym skrócenia czasu obliczeń, interpolowano szeregi EOPC04 z rozdzielczością 10 dni. Amplitudy oscylacji o okresach mniejszych niż kilkanaście dni nie przekraczają 0.4 mas (Kosek 1995, 1997). Interpolowanie szeregu ze wspomnianą rozdzielczością nie przyczynia się zatem do utraty istotnych informacji.

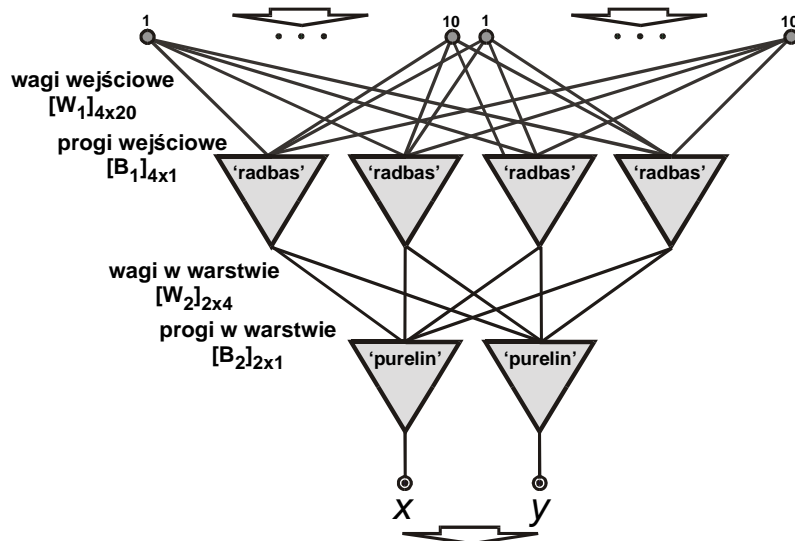
4.4.1. Topologia i algorytm trenowania sieci

Podstawowym problemem związanym z projektowaniem sieci jest ustalenie odpowiedniej liczby neuronów oraz zastosowanie efektywnego algorytmu trenowania. W szczególności, jeżeli liczba neuronów będzie za duża, trenowanie może zająć zbyt wiele czasu, natomiast zbyt mała liczba neuronów nie zdoła poprawnie reprezentować zadanego szeregu czasowego. Architektura sieci najczęściej jest ustalona, natomiast nauka prowadzona jest z użyciem różnych metod. Istnieje wiele metod poszukiwania optymalnej struktury sieci (de Falco i in. 1998; Goldberg 1989).

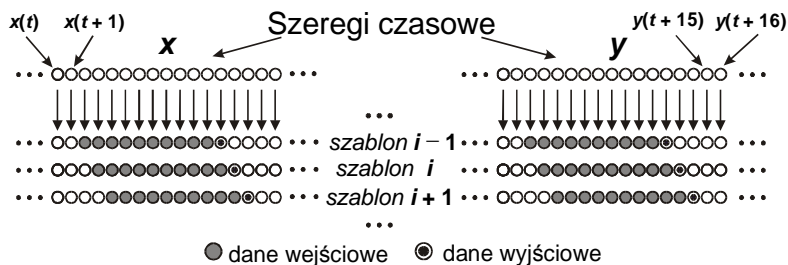
W opisywanym eksperymencie topologia sieci neuronowej została zoptymalizowana w trakcie testów. Ostatecznie przyjęto sieć składającą się z dwóch warstw (rys. 5). Warstwa pierwsza (ukryta) zawierała cztery neurony z radialnymi funkcjami aktywacji (Kalarus i Kosek 2004). Liczbę wejść ustalono na 20 (2×10), zatem do otrzymania kolejnych punktów prognozy x i y

należało podawać na wejście sieci po 10 (100 dni) punktów danych, odpowiednio szeregów czasowych x i y (rys. 6). Liczba wejść oraz liczba neuronów określają rozmiar sieci. W przeprowadzonym eksperymencie cała „wiedza” sieci zawarta była w 88 zmiennych opisujących wagi neuronów (*weights*) oraz 8 zmiennych określających próg wzbudzenia neuronu (*biases*) (rys. 5).

Opisana sieć neuronowa została wygenerowana w środowisku Matlab (Neural Network Toolbox) z użyciem funkcji *newff*, która tworzy w pamięci obiekt klasy *feed-forward backpropagation network*.



Rys. 5. Schemat sieci neuronowej



Rys. 6. Generowanie szablonu

Kolejnym ważnym problemem jest znalezienie optymalnej metody trenowania sieci. W eksperymencie wykorzystano najszybszą dostępną w Matlabie metodę trenowania *trainlm*, która uaktualnia wagi neuronów zgodnie z algorytmem optymalizacyjnym Levenberga-Marquardta (LM) (More 1978). Popularność tej metody wynika przede wszystkim z jej prędkości działania, która jest co najmniej kilkakrotnie większa od prędkości klasycznych gradientowych metod propagacji wstecznej (np. *traingd*). Jedną z niewielu jej wad jest natomiast duże zapotrzebowanie na pamięć operacyjną komputera, co wyklucza zastosowanie tej metody w sieciach, gdzie liczba wag przekracza kilkaset.

Działanie algorytmu polega głównie na obliczaniu w każdej iteracji wartości Jakobianu $\mathbf{J}(\mathbf{X})$ względem wag i progów wzbudzenia \mathbf{X} . Następnie każda zmienna jest modyfikowana według wzoru:

$$\Delta \mathbf{X} = - \frac{\mathbf{J}^T(\mathbf{X})\mathbf{E}}{\mathbf{J}^T(\mathbf{X})\mathbf{J}(\mathbf{X}) + \mu \mathbf{I}} \quad (18)$$

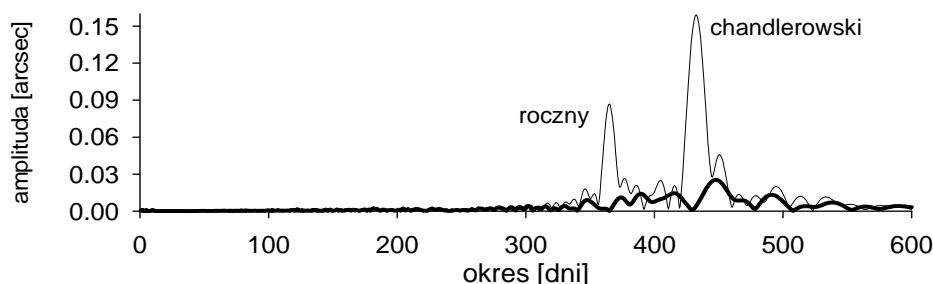
gdzie \mathbf{E} jest wektorem błędów (różnica między pożądaną i aktualną wartością na wyjściu neuronów), zaś \mathbf{I} macierzą jednostkową. Zmienna μ jest na bieżąco modyfikowana i używana w procedurze *trainlm* do redukcji czasu obliczeń.

4.4.2. Model ruchu bieguna

Na pierwszym etapie analizy danych wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów do wpasowania modelu zawierającego trend liniowy oraz dwie najbardziej energetyczne oscylacje: roczną i Chandlera. Model ten został dopasowany do oryginalnych danych współrzędnych x, y bieguna ziemskiego IERS EOPC04 i można go wyrazić następująco:

$$\begin{aligned} x(t) &= \underbrace{a_x t + b_x}_{\text{trend liniowy}} + \underbrace{A_{Chx} \sin(\omega_{Chx} t - \phi_{Chx})}_{\text{oscylacja Chandlera}} + \underbrace{A_{Ax} \sin(\omega_{Ax} t - \phi_{Ax})}_{\text{oscylacja roczna}} \\ y(t) &= \underbrace{a_y t + b_y}_{\text{trend liniowy}} + \underbrace{A_{Chy} \sin(\omega_{Chy} t - \phi_{Chy})}_{\text{oscylacja Chandlera}} + \underbrace{A_{Ay} \sin(\omega_{Ay} t - \phi_{Ay})}_{\text{oscylacja roczna}} \end{aligned} \quad (19)$$

gdzie $\omega_{Chx}, \omega_{Chy}, \omega_{Ax}, \omega_{Ay}$ są odpowiednio częstościami oscylacji Chandlera i rocznej w kierunkach x i y (częstości te są argumentami maksimum amplitudy transformaty Fouriera policzonej oddzielnie dla danych x i y), $A_{Chx}, A_{Chy}, A_{Ax}, A_{Ay}$ i $\phi_{Chx}, \phi_{Chy}, \phi_{Ax}, \phi_{Ay}$ są nieznanymi amplitudami i fazami oscylacji rocznej i Chandlera wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 7. Moduł transformaty Fouriera zespolonych współrzędnych bieguna ziemskiego z usuniętą składową liniową (linia ciągła) oraz transformaty Fouriera reszduów pozostałych po odjęciu modelu (linia pogrubiona)

Moduły transformaty Fouriera (Press i in. 1992; Priestley 1981) zespolonego szeregu współrzędnych bieguna oraz reszduów pozostałych po odjęciu modelu dla oscylacji lewoskrętnych zostały przedstawione na rysunku 7. Odjęcie modelu zmniejsza amplitudę sygnału. Wciąż jednak pozostaje znaczący sygnał w pobliżu oscylacji Chandlera i rocznej. Sygnał ten spowodowany jest zmienną fazą oraz amplitudą oscylacji Chandlera i rocznej (Kołaczek i Kosek 1998; Kosek i in. 2001, 2002; Schuh i in. 2001; Kosek 2003) i nie jest możliwe wymodelowanie go metodą LS.

5. PROGNOZOWANIE WSPÓLRZĘDNYCH BIEGUNA ZIEMSKIEGO POPRZECZ TRANSFORMACJĘ DO UKŁADU BIEGUNOWEGO

W układzie współrzędnych biegunowych promień i długość łuku polhoidii określone są wzorami:

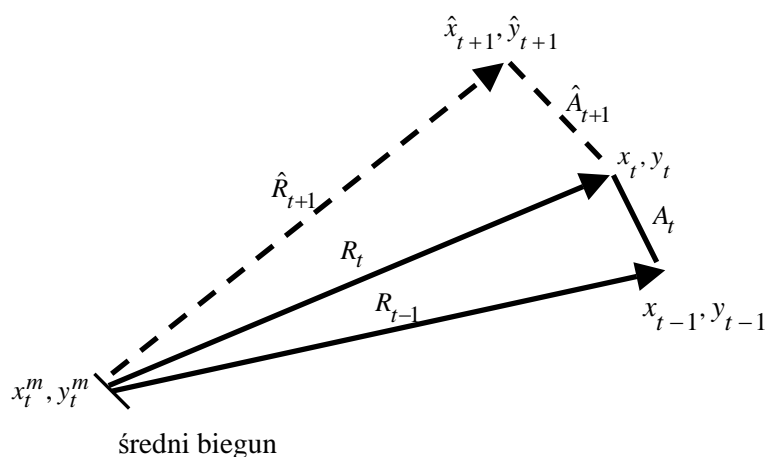
$$R_t = \sqrt{(x_t - x_t^m)^2 + (y_t - y_t^m)^2}, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

$$A_t = \sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2}, \quad t = 2, 3, \dots, n \quad (21)$$

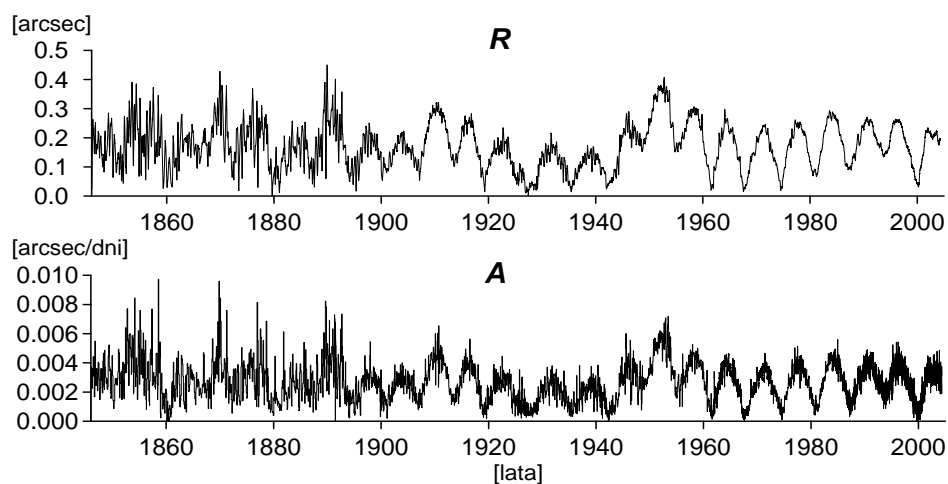
gdzie współrzędne bieguna średniego x_t^m , y_t^m są wyznaczone przy użyciu dolnoprzepustowego filtra Ormsby (1961) z optymalnie zaprojektowanymi parametrami i ekstrapolowane w przyszłość metodą LS (Kosek 2003).

Po wyznaczeniu prognozy promienia \hat{R}_{n+1} i długości łuku \hat{A}_{n+1} polhoidii wyznaczane są prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego \hat{x}_{n+1} , \hat{y}_{n+1} (rys. 8) dowolną metodą prognozowania przy zastosowaniu wzorów liniowego wcięcia w przód. Zakłada się przy tym, że ruch bieguna ziemskiego odbywa się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (Kosek 2002, 2003). Zmiany promienia i długości łuku polhoidii pokazane są na rysunku 9.

W zmianach tych widoczna jest 6–7-letnia oscylacja o zmieniającej się amplitudzie, wynikająca ze zdudnienia oscylacji Chandlera i rocznej. Prognozowanie w układzie współrzędnych biegunowych pozwala na wyeliminowanie problemu rozdzielania tych dwóch najbardziej energetycznych oscylacji o bliskich sobie częstotliwościach (Kosek i Kalarus 2003).



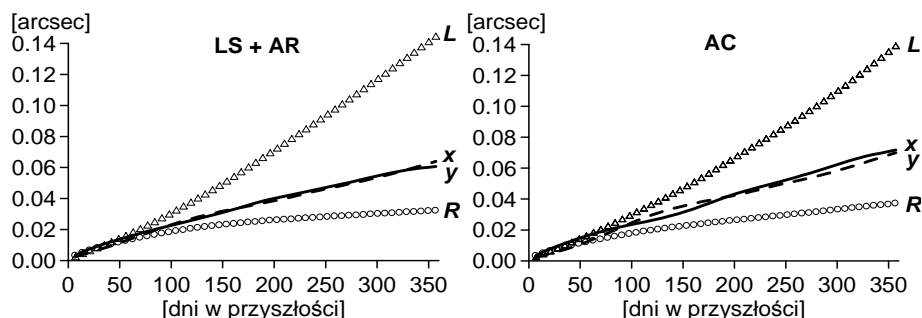
Rys. 8. Schemat prognozowania współrzędnych bieguna ziemskiego w układzie współrzędnych biegunowych poprzez liniowe wcięcie w przód prognozy promienia i długości łuku polhodii



Rys. 9. Szeregi czasowe zmian promienia R i długości łuku polhodii A

W celu wyznaczenia prognozy promienia i długości łuku polhodie zastosowana została metoda autokowariancyjna (AC) oraz kombinacja metody najmniejszych kwadratów z metodą autoregresji (LS+AC). W metodzie kombinacji LS+AR wyznaczany jest model metody LS promienia i długości łuku polhodie, a następnie wyznaczane są residua ekstrapolacji jako różnica pomiędzy danymi a modelem. Prognoza metodą kombinacji LS+AR jest sumą ekstrapolacji modelu LS oraz prognozą AR residuów ekstrapolacji. W prognozowaniu metodą AC wykorzystane zostały w obliczeniach zmiany promienia i długości łuku polhodie z okresu 40 lat. W prognozowaniu metodą LS+AR model metody LS składał się z sześciu oscylacji o okresach: 2220 (6.1 lat), 1200, 650, 310, 200 i 130 dni (Kosek i Kalarus 2003) i dopasowany został do danych promienia i długości łuku polhodie z okresu 35 lat, natomiast model autoregresji obliczony był z residuów ekstrapolacji z okresu ostatnich 6 lat.

Średnie błędy prognozy współrzędnych x , y bieguna ziemskiego oraz promienia R i scałkowanej długości łuku L polhodie w przedziale 1984–2004.5 dla metod LS+AR oraz AC pokazane są na rysunku 10. Błędy prognozy współrzędnych x , y bieguna ziemskiego stają się duże ze względu na szybko rosnący błąd prognozy scałkowanej długości łuku polhodie. Wadą prognozowania współrzędnych bieguna ziemskiego w biegunowym układzie współrzędnych jest mała dokładność prognozy scałkowanej długości łuku polhodie bez względu na zastosowaną metodę prognozy.



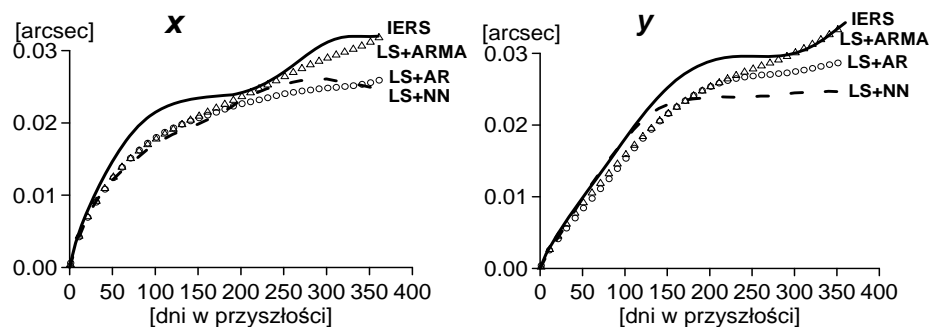
Rys. 10. Średni błąd prognozy współrzędnych x (linia ciągła), y (linia przerywana) bieguna ziemskiego oraz promienia R (okręgi) oraz scałkowanej długości łuku polhodie L (trójkąty) w latach 1984–2004.34 dla metod LS+AR oraz AC

6. PROGNOZOWANIE WSPÓLRZĘDNYCH BIEGUNA ZIEMSKIEGO ORAZ CZASU $UTI - UTC$

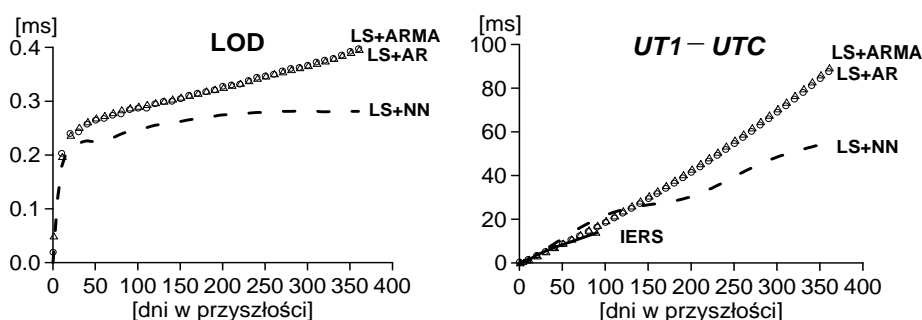
W celu prognozowania czasu współrzędnych bieguna ziemskiego, $UTI - UTC$ i LOD zastosowano kombinacje metody LS z metodami stochastycznymi AC, AR, ARMA i NN. Wszystkie wymienione metody zaprojekt-

towane zostały do prognozowania dwuwymiarowych szeregów czasowych, z wyjątkiem metody NN, którą prognozuje się tylko jednowymiarowe szeregi czasowe. W celu prognozowania $UTI - UTC$ odejmowane są skoki sekundo-we ($UTI - TAI$), następnie model oscylacji pływowych ($UTIR - TAI$) oraz model zmian sezonowych wyznaczany poprzez dopasowanie metodą LS. W przypadku prognozowania zmian LOD odejmowany jest model oscylacji pływowych (LODR) oraz zmiany sezonowe wyznaczane metodą LS. Do prognozowania zmian $UTI - UTC$ oraz LOD wykorzystano te same programy co do prognozowania dwuwymiarowych współrzędnych bieguna ziemskiego przy założeniu zerowania się części urojonej szeregu czasowego. W kombinacji metody LS z metodami stochastycznymi wyznaczany jest model ekstrapolacji LS współrzędnych x, y bieguna ziemskiego, $UTIR - TAI$ lub LODR. Końcowa prognoza tych zmian jest sumą ekstrapolacji modelu LS oraz prognozy metody stochastycznej residuów ekstrapolacji LS.

W kombinacji LS+AR, LS+ARMA model metody LS składający się z kołowej oscylacji Chandlera, dwóch eliptycznych oscylacji rocznej i półrocznej oraz trendu liniowego dopasowany został do 10-letniego ciągu danych współrzędnych bieguna ziemskiego, natomiast model autoregresji do ostatnich 890 dni (dwukrotny okres Chandlera) residuów ekstrapolacji LS. W kombinacji LS+AC modele metody LS i AC dopasowane zostały odpowiednio do ciągu ostatnich 30 lat danych współrzędnych bieguna ziemskiego oraz ich residuów ekstrapolacji. W kombinacji LS+NN model metody LS dopasowany został osobno do interpolowanych danych x i y współrzędnych bieguna ziemskiego IERS EOPC04 od 1962 do 2004.5 r., natomiast długość szablonu do trenowania sieci na residuach ekstrapolacji LS była równa 100 dni (Kalarus i Kosek 2004). Średnie błędy prognoz współrzędnych x, y bieguna ziemskiego w latach 1984.0–2004.5 wyznaczonych metodami LS+AR, LS+ARMA, LS+NN oraz dla obecnej metody prognozowania IERS Rapid Service/Prediction Centre w USNO pokazano na rysunku 11. Średnie błędy prognozy współrzędnych x, y bieguna ziemskiego są na ogół mniejsze dla kombinacji metody LS z metodami stochastycznymi niż dla metody stosowanej w IERS Rapid Service/Prediction Centre (rys. 11). Metoda LS+AR zostanie wkrótce zastosowana do rutynowych wyznaczeń prognoz współrzędnych x, y bieguna ziemskiego w IERS Rapid Service/Prediction Centre. Od stycznia 2004 r. wyniki prognoz wyznaczane raz w tygodniu tą metodą są na bieżąco porównywane z prognozami wyznaczanymi w IERS. Absolutne wartości różnic od 1 do 60 dni w przyszłości pomiędzy współrzędnymi x, y bieguna ziemskiego i ich prognozami wyznaczonymi przez USNO oraz kombinacją metody LS z metodami AR, ARMA, AC i NN pokazane są na rysunku 13.



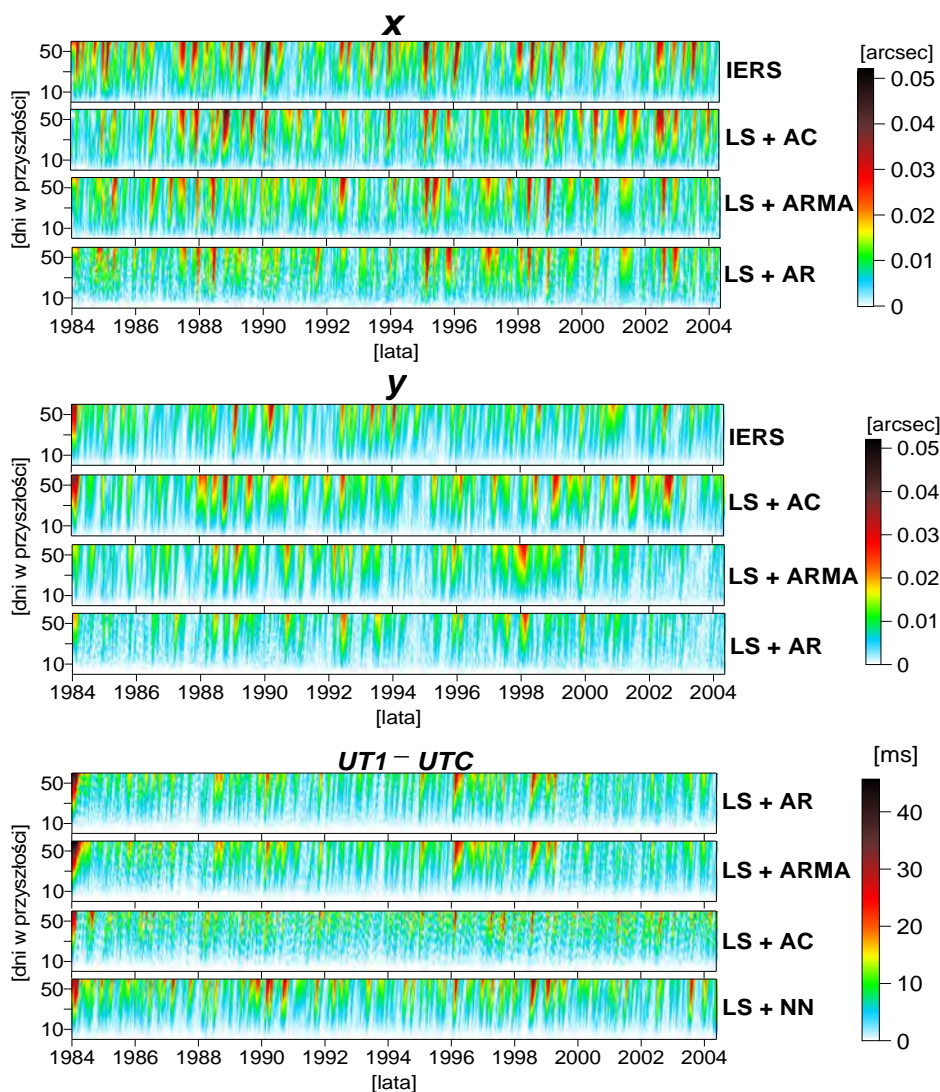
Rys. 11. Średni błąd prognozy współrzędnych x , y bieguna ziemskiego w latach 1984.0–2004.5 wyznaczony kombinacją metod LS+AR (okręgi), LS+ARMA (trójkąty), LS+NN (linia przerywana) oraz dla obecnej metody prognozowania IERS Rapid Service/Prediction Centre (linia ciągła)



Rys. 12. Średni błąd prognozy LOD i $UT1 - UTC$ w latach 1984.0–2004.5 wyznaczony kombinacją metod LS+ARMA (trójkąty), LS+AR (okręgi) oraz LS+NN (linia przerywana), a także średni błąd prognozy $UT1 - UTC$ od 1 do 90 dni dla metody stosowanej przez IERS Rapid Service/Prediction Centre (linia ciągła) (Johnson i in. 2004)

W kombinacji LS+AR oraz LS+ARMA model metody LS składający z dwóch oscylacji rocznej i półrocznej oraz trendu liniowego dopasowany został do ciągu danych zmian $UT1R - TAI$ i LODR o długości 10 lat, natomiast model autoregresji do ostatnich 2 lat residuów ekstrapolacji modelu LS. W kombinacji LS+AC modele metody LS i AC dopasowane zostały odpowiednio do ostatnich 30 lat danych zmian $UT1R - TAI$ i LODR oraz ich residuów ekstrapolacji LS. W kombinacji LS+NN model metody LS dopasowany został do interpolowanych danych $UT1R - TAI$ lub LODR od 1962 do 2004.5 r., natomiast długość szablonu do trenowania sieci na residuach ekstrapolacji modelu LS była równa 100 dni. Rysunek 12 przedstawia średni błąd prognozy LOD i $UT1 - UTC$ w latach 1984.0–2004.5 wyznaczony kombinacją metody LS z metodami stochastycznymi. Absolutne wartości różnic pomiędzy rzeczywistymi zmianami $UT1 - UTC$ a ich prognozami od 1 do 60 dni

w przyszłości wyznaczonymi kombinacją metody LS z metodami stochastycznymi widoczne są na rysunku 13. Ze względu na występowanie nieregularnych zmian o charakterze krótkookresowym dokładność prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego, $UT1 - UTC$ i LOD zależy głównie od momentów czasu, w których rozpoczynane jest prognozowanie (Kosek i Kołaczek 1995; Kosek 2000).



Rys. 13. Absolutna wartość różnicy pomiędzy współrzędnymi x , y bieguna ziemskiego, czasem $UT1 - UTC$ a ich prognozami wyznaczonymi przez IERS Rapid Service/Prediction Centre oraz kombinacjami metod LS + AR, LS + ARMA, LS + AC i LS + NN

WNIOSKI

- Średnie błędy prognozy współrzędnych x , y bieguna ziemskiego do około 60 dni w przyszłości, dla metody najmniejszych kwadratów stosowanej w USNO i metody autokowariancyjnej w układzie współrzędnych biegunowych są tego samego rzędu.
- Błędy prognozy współrzędnych x , y bieguna ziemskiego oraz $UT1 - UTC$ i LOD zależą od momentów czasu, w których rozpoczyna się prognozowanie.
- Przyczyną błędów prognozy współrzędnych bieguna ziemskiego są głównie nieregularne zmiany amplitud i faz oscylacji krótkookresowych oraz zmiany amplitudy i fazy oscylacji rocznej.
- Problemem prognozowania w układzie współrzędnych biegunowych jest mało dokładna prognoza scałkowanej długości łuku polhodie.
- Dokładność prognozy współrzędnych x , y bieguna ziemskiego metodami LS + AR i LS + ARMA jest wyższa niż dla obecnie stosowanej metody prognozowania IERS Rapid Service/Prediction Centre.
- Dokładność prognozy $UT - UTC$ metodami LS + AR, LS + ARMA do około 100 dni w przyszłości jest tego samego rzędu co metody prognozowania IERS Rapid Service/Prediction Centre.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują prof. Aleksandrowi Brzezińskiemu za udostępnienie procedur do wyznaczania metodą najmniejszych kwadratów współczynników autoregresji dla dwuwymiarowych szeregów czasowych.

BIBLIOGRAFIA

- Akaike H., 1974, *A New Look at Statistical Model Identification*, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-19, pp. 716–723.
- Barrodale I., Erickson R.E., 1980, *Algorithms for least-squares linear prediction and maximum entropy spectral analysis – Part II: Fortran program*, Geophysics, 45, pp. 433–446.
- Bizouard Ch., Brzeziński A., Petrov S., 1998, *Diurnal atmospheric forcing and temporal variations of the nutation amplitudes*, Journal of Geodesy, Vol. 72, pp. 561–577.
- Box G.E.P., Jenkins G.M., 1976, *Time series analysis: forecasting and control*, Holden-Day, New York.
- Brzeziński A., 1994, *Algorithms for estimating maximum entropy coefficients of the complex-valued time series*, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 3/1994, Herbert Wichman Verlag GmbH, Heidelberg, pp. 101–112.

- Brzeziński A., 1995, *On the interpretation of maximum entropy power spectrum and cross-power spectrum in earth rotation investigations*, Manuscripta geodaetica, Vol. 20, pp. 248–264.
- Brzeziński A., Nastula J., Kołaczek B., 2003, *Oceanic excitation of polar motion from intraseasonal to decadal periods*, accepted to Proc. XXIII IUGG General Assembly, Symposium G06.
- Brzeziński A., Kosek W., 2004, *Free core nutation: stochastic modeling versus predictability*, Proc. Journées 2003 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, 22–25 September 2003, (eds.) A. Finkelstein, N. Capitaine, Inst. of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, pp. 99–106.
- Capitaine N., Chapront J., Lambert S., Wallace P.T., 2003, *Expressions for the Celestial Intermediate Pole and Celestial Ephemeris Origin consistent with the IAU 2000A precession nutation model*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 400, pp. 1145–1154.
- Chao B.F., Au A.Y., 1991, *Atmospheric excitation of the Earth's annual wobble: 1980–1988*, J. Geophys. Res., Vol. 96, pp. 6577–6582.
- Dehant V., Feissel-Vernier M., de Viron O., Ma C., Yseboodt M., Bizuard C., 2003, *Remaining error sources in the nutation at the submilliarc second level*, J. Geophys. Res., Vol. 108, No B5.
- Dickey J.O., Gegout P., Marcus S.L., 1999, *Earth-atmosphere angular momentum exchange and ENSO: The rotational signature of the 1997–98 event*, Geophys. Res. Lett., 26, No 16, pp. 2477–2480.
- Egger D., Fröhlich H., 1993, *Prädiktion von Erdrotationsdaten – klassisch und neuronal*, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 10, pp. 366–375.
- Eubanks T.M., Steppe J.A., Dickey J.O., Rosen R.D., Salstein D.A., 1988, *Causes of rapid motions of the Earth's pole*, Nature, 334, No 6178.
- de Falco I., della Cioppa A., Iazzetta A., Natale P., Tarantino E., 1998, *Optimizing neural networks for time series prediction*, Institute for Research on Parallel Information Systems National Research Council of Italy (CNR), Via P. Castellino 111, Naples, Italy.
- Gegout P., Hinderer J., Legros H., Greff M., Dehant V., 1998, *Influence of atmospheric pressure on Free Core Nutation, precession and some forced nutational motions of the Earth*, Phys. Earth Planet. Intern., 106, pp. 337–351.
- Goldberg D.E., 1989, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Gross R.S., Fukumori I., Menemenlis D., 2003, *Atmospheric and oceanic excitation of the Earth's wobbles during 1980-2000*, J. Geophys. Res., Vol. 108, (B8), 2370, doi:10.1029/2002JB002143.
- Hide R., Birch N.T., Morrison L.V., Shea D.J., White A., 1980, *Atmospheric angular momentum fluctuations and changes in the length of day*, Nature, 286, pp. 114–117.

- IERS, 2003, *Annual Report*, Observatoire de Paris, EOP: <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>.
- Johnson T.J., Luzum B.J., Ray J.R., 2004, *Improved near-term Earth rotation predictions using forecast of atmospheric angular momentum*, J. Geodynamics, in print.
- Kalarus M., Kosek W., 2004, *Prediction of Earth orientation parameters by artificial neural networks*, Artificial Satellites – Journal of Planetary Geodesy, Vol. 39, No 2, pp. 175–184.
- Kolaczek B., Kosek W., 1998, *Variations of the amplitude of the Chandler Wobble*, Proc. Journées 1998 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, Conceptual, conventional and practical studies related to Earth rotation, September 21–23, Observatoire de Paris, France, pp. 215–220.
- Kosek W., 1993, *The Autocovariance Prediction of the Earth Rotation Parameters*, Proc. 7th International Symposium "Geodesy and Physics of the Earth" IAG Symposium No 112, Potsdam, Germany, 5–10 Oct. 1992, H. Montag and Ch. Reigber (eds.), Springer Verlag, pp. 443–446.
- Kosek W., 1995, *Time Variable Band Pass Filter Spectra of Real and Complex-Valued Polar Motion Series*, Artificial Satellites, Planetary Geodesy, No 24, Vol. 30, No 1, pp. 27–43.
- Kosek W., 1997, *Autocovariance Prediction of Short Period Earth Rotation Parameters*, Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy, Vol. 32, No 2, pp. 75–85.
- Kosek W., 2000, *Irregular short period variations in Earth rotation*, IERS Technical Note 28, pp. 61–64.
- Kosek W., 2002, *Autocovariance prediction of complex-valued polar motion time series*, Advances of Space Research, Vol. 30, No 2, pp. 375–380.
- Kosek W., 2003, *Polar motion prediction by different methods in polar coordinate system*, Proc. Journées 2002 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, Bucarest, 25–28 September 2002, pp. 125–131.
- Kosek W., 2004a, *Possible excitation of the Chandler wobble by variable geophysical annual cycle*, Artificial Satellites – Journal of Planetary Geodesy, Vol. 39, No 2, pp. 135–145.
- Kosek W., 2004b, *Excitation of the Chandler wobble by variable geophysical annual cycle*, accepted to Proc. ECGS Chandler Workshop, Luxembourg, 21–24 April 2004.
- Kosek W., Kołaczek B., 1995, *Irregular Short Period Variations of Polar Motion*, Proc. Journées 1995 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, Warsaw, Poland, 18–20 September, pp. 117–120.
- Kosek W., Nastula J., Kołaczek B., 1995, *Variability of polar motion oscillations with periods from 20 to 150 days in 1979–1991*, Bulletin Géodésique, Vol. 69, pp. 308–319.
- Kosek W., Kołaczek B., 1997, *Semi-Chandler and Semiannual Oscillations of Polar Motion*, Geophysical Research Letters, Vol. 24, No 17, pp. 2235–2238.

- Kosek W., McCarthy D.D., Luzum B., 1998, *Possible Improvement of Earth Orientation Forecast Using Autocovariance Prediction Procedures*, Journal of Geodesy, Vol. 72, pp. 189–199.
- Kosek W., McCarthy D.D., Luzum B.J., 2000, *Prediction of complex-valued polar motion using the combination of autocovariance prediction and a least-squares extrapolation*, EGS General Assembly, 2000, Nice, France, 24–29 April 2000.
- Kosek W., McCarthy D.D., Luzum B.J., 2001, *El Nino impact on polar motion prediction errors*, Studia geophysica et geodaetica, 45, (2001), pp. 347–361.
- Kosek W., McCarthy D.D., Luzum B.J., 2002, *Variations of annual oscillation parameters, El Nino and their influence on polar motion prediction errors*, Proc. Journées 2001 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, Brussels, 24–26 September 2001, pp. 85–90.
- Kosek W., McCarthy D.D., Johnson T.J., Kalarus M., 2004, *Comparison of polar motion prediction results supplied by the IERS Sub-bureau for Rapid Service and Predictions and results of other prediction methods*, Proc. Journées 2003 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, 22–25 September 2003, (eds.) A. Finkelstein, N. Capitaine, Inst. of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, pp. 164–169.
- Kosek W., Kalarus M., 2003, *Time-frequency analysis and prediction of polar motion radius and angular motion*, Artificial Satellites – Journal of Planetary Geodesy, Vol. 38, pp. 41–54.
- Luzum B.J., Ray J.R., Carter M.S., Josties F.J., 2001, *Recent Improvements to IERS Bulletin A Combination and Prediction*, GPS Solutions, 4(3), 34.
- Malkin Z., Skurikhina E., 1996, *On Prediction of EOP*, Comm. IAA 93.
- Mathews P.M., Herring T.A., Buffett B.A., 2002, *Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior*, J. Geophys. Res. (Solid Earth), Vol. 107, Issue B4, p. ETG 3-1.
- McCarthy D.D., Luzum B.J., 1991, *Prediction of Earth Orientation*, Bulletin Géodésique, Vol. 65, pp. 18–21.
- McCarthy D.D., Luzum B.J., 1993, *An analysis of tidal variations in the length of day*, Geophys. J. Int., 114, pp. 341–346.
- McCarthy D.D. (ed.), 1996, *IERS Conventions*, IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris.
- McCarthy D.D., Luzum B.J., 2003, *An Abridged Model of the Precession Nutation of the Celestial Pole*, Celest. Mech. Dyn. Astr., 85, pp. 37–49.
- More J.J., 1978, *The Levenberg-Marquardt algorithm implementation and theory*, Numerical Analysis, ser. Lecture Notes in Mathematics, G. Watson, (ed.), No 630, New York, Springer-Verlag, pp. 105–116.
- Ormsby J.F.A., 1961, *Design of Numerical Filters with Application to Missile Data Processing*, J. Assoc. Compt. Mach., 8, pp. 440–466.

- Ponte R.M., Stammer D., 1999, *Role of ocean currents and bottom pressure variability on seasonal polar motion*, J. Geophys. Res., 104, No C10, pp. 23392–23409.
- Popiński W., Kosek W., 1995, *The Fourier Transform Band Pass Filter and its Application to Polar Motion Analysis*, Artificial Satellites, Vol. 30, No 1, pp. 9–25.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., 1992, *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing*, Second Edition, Cambridge University Press.
- Priestley M.B., 1981, *Spectral Analysis and Time Series*, Academic Press, London, 1981.
- Salstein D.A., Kołaczek B., Gambis D. (eds.), 1999, *IERS Technical Note 26 “The impact of El Nino and other low-frequency signals on Earth rotation and global Earth system parameters”*, Observatoire de Paris, pp. 1–74.
- Schuh H., Nagel S., Seitz T., 2001, *Linear Drift and Periodic Variations Observed in Long Time Series of Polar Motion*, Journal of Geodesy, Vol. 74, pp. 701–710.
- Schuh H., Ulrich M., Egger D., Müller J., Schwegmann W., 2002, *Prediction of Earth orientation parameters by artificial neural networks*, Journal of Geodesy, Vol. 76, pp. 246–258.
- de Viron O., Ponte R., Dehant V., 2001, *Indirect effect of the atmosphere through the oceans on the Earth’s nutation by the torque approach*, J. Geophys. Res., 106(B6), pp. 8841–8851.

WIESŁAW KOSEK
MACIEJ KALARUS
Space Research Centre
Polish Academy of Sciences
Warsaw
WALDEMAR POPIŃSKI
Central Statistical Office
Warsaw

COMPARISON OF EARTH ORIENTATION PARAMETERS PREDICTION USING DIFFERENT METHODS

S u m m a r y

Predictions of Earth orientation parameters are needed for determination in real time parameters of transformation between celestial and terrestrial reference frames. Different methods of prediction of x , y coordinates of the pole and $UTI - UTC$, such as least squares method (LS), autoregression method (AR), autoregression moving-average method (ARMA), autocovariance method (AC), neural networks method (NN) as well as the methods combining LS with AR, ARMA, AC and NN, are presented in the paper. The method of prediction of pole coordinates data in polar coordinate system was also presented. The method combining LS with AR, i.e. (LS+AR) provides the predicted data with the best accuracy. Prediction errors of the coordinates of Earth's pole obtained with that method are smaller than those obtained with the method recently used by the IERS Rapid Service/Prediction Centre at USNO. Coordinates of Earth's pole are once a week predicted using the LS+AR method in the automatic mode and they are transmitted to USNO where they are compared with current IERS predictions. The method will soon be implemented to routine predictions of Earth pole coordinates data at the IERS Rapid Service/Prediction Centre.

**Rezolucje XXI Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej
Unii Astronomicznej (IAU)
Buenos Aires, 23 lipca – 1 sierpnia 1991 r.**

REZOLUCJA A4

Rekomendacje Grupy Roboczej <<Systemy Odniesienia>> IAG

REKOMENDACJE I – IX

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

REKOMENDACJA I

biorąc pod uwagę,

że w ramach ogólnej teorii względności należy zdefiniować kilka czasoprzestrzennych układów współrzędnych,

zaleca,

aby wybrać w czasoprzestrzeni 4 współrzędne ($x^0 = ct, x^1, x^2, x^3$) w taki sposób, żeby w każdym układzie współrzędnych o początku w barycentrum dowolnego zbioru mas, kwadrat interwału ds^2 był wyrażony co najmniej ze stopniem przybliżenia podanym według wzoru:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = -(1 - c^{-2}2U) (dx^0)^2 + (1 + c^{-2}2U)[(dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2],$$

gdzie c jest prędkością światła, τ jest czasem własnym, a U jest sumą potencjału grawitacyjnego tego układu mas i potencjału pływowego, generowanego przez ciała zewnętrzne względem układu i zanikającego w barycentrum.

Komentarz do Rekomendacji I

1. Zalecenie to w sposób wyraźny wprowadza ogólną teorię względności jako teoretyczną podstawę do definicji niebieskiego czasoprzestrzennego układu odniesienia.
2. Zalecenie to uznaje, że czasoprzestrzeń nie może być opisana przez jeden układ współrzędnych, ponieważ dobór odpowiedniego układu współrzędnych może w znacznym stopniu ułatwić rozważanie poszczególnych zagadnień i objaśnić odpowiednie zjawiska fizyczne. Z dala od początku przestrzeni potencjał zbioru mas, z którym dany układ współrzędnych jest związany, staje się zaniedbywalny, a potencjał pochodzący od ciał zewnętrznych przejawia się tylko poprzez wyrazy pływowe, które zanikają w początku przestrzeni.
3. W proponowanym wyrażeniu na ds^2 podane są tylko te wyrazy, które są wymagane na obecnym poziomie dokładności obserwacji. Wyrazy wyższego rzędu mogą być dodane, jeżeli okaże się to użytkownikom potrzebne. Dalsze wyrazy zostaną dodane jeżeli IAU uzna to za niezbędne. Wyrazy te mogą być dodawane bez zmiany pozostałej części Rekomendacji I.
4. Znak algebraiczny potencjału we wzorze na ds^2 ma być przyjęty jako dodatni.
5. Na poziomie przybliżenia przyjętego w tej rekomendacji, potencjał pływowy składa się ze wszystkich wyrazów co najmniej drugiego stopnia w lokalnych współrzędnych przestrzennych, w rozwinięciu potencjału newtonowskiego, generowanego przez ciała zewnętrzne.

REKOMENDACJA II

biorąc pod uwagę,

- a) potrzebę zdefiniowania barycentrycznego układu współrzędnych o początku w środku mas Układu Słonecznego i układu współrzędnych geocentrycznych o początku w środku mas Ziemi, oraz celowość zdefiniowania analogicznych układów współrzędnych dla innych planet i Księżyca,
- b) że układ współrzędnych powinien być związany z jak najlepszą realizacją systemu odniesienia w przestrzeni i czasie, i
- c) że takie same jednostki fizyczne powinny być używane we wszystkich układach współrzędnych,

zaleca, żeby

1. siatki współrzędnych przestrzennych o początkach w barycentrum Układu Słonecznego i w środku mas Ziemi nie przejawiały globalnej rotacji względem zbioru odległych obiektów pozagalaktycznych,
2. współrzędne czasowe były wyprowadzane ze skali czasu realizowanej przez działające na Ziemi zegary atomowe,
3. podstawowymi jednostkami fizycznymi czasoprzestrzeni, we wszystkich układach współrzędnych były: sekunda międzynarodowego systemu jednostek (SI) dla czasu własnego i metr (SI) dla długości własnych, związany z sekundą SI przez prędkość światła $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$.

Komentarz do Rekomendacji II

1. *Zalecenie to określa rzeczywiste fizyczne struktury i wielkości, które zostaną użyte do ustanowienia układów odniesienia oraz skal czasu, opartych na idealnej definicji systemu, podanej w Rekomendacji I.*
2. *Kinematyczny warunek nałożony na prędkości obrotu geocentrycznego i barycentrycznego systemu odniesienia nie może być ściśle spełniony. Zakłada się, że średni obrót dużej liczby obiektów pozagalaktycznych może być uznany jako reprezentatywny dla obrotu całego wszechświata i jest przyjęty jako równy zero.*
3. *Jeżeli zdefiniowany przez tę rekomendację barycentryczny system odniesienia będzie użyty do studiów nad dynamiką wewnątrz Układu Słonecznego to może zająć konieczność uwzględnienia kinematycznych efektów geodezyjnej precesji galaktyki.*
4. *Ponadto, zdefiniowane w tej rekomendacji więzy kinematyczne dla obrotu geocentrycznego układu odniesienia powodują, że gdyby układ miał być używany do celów dynamiki (np. ruchu Księżyca i satelitów Ziemi), to zależna od czasu precesja geodezyjna układu geocentrycznego względem układu barycentrycznego musiała by być uwzględniona przez wprowadzenie do równań ruchu odpowiednich wyrazów inercjalnych.*
5. *Wielkości i stałe astronomiczne są wyrażane w jednostkach SI bez współczynników przekształcenia zależnych od układów współrzędnych, w których zostały pomierzone.*

REKOMENDACJA III

biorąc pod uwagę

dążenie do standaryzacji jednostek i początków czasów współrzędnych używanych w astronomii,

zaleca, żeby

1. jednostki pomiaru czasów współrzędnych we wszystkich układach współrzędnych, o początkach w barycentrach zbiorów mas, zostały tak dobrane, aby były spójne z właściwą jednostką czasu, którą jest sekunda SI,
2. wskazania tych czasów współrzędnych wynosiły dokładnie 1977 1 stycznia $0^h 0^m 32^s.184$ w dniu 1 stycznia 1977 roku dokładnie o $0^h 0^m 0^s$ TAI ($JD = 2\ 443\ 144.5$ TAI), w środku mas Ziemi,
3. czasy współrzędnych w układach współrzędnych mających odpowiednio swoje przestrzenne początki odpowiednio w środku mas Ziemi i w barycentrum Układu Słonecznego, ustanowione zgodnie z treścią punktów 1 i 2, były oznaczane jako: czas współrzędnych geocentrycznych (TCG) i czas współrzędnych barycentrycznych (TCB).

Komentarz do Rekomendacji III

1. W obszarze wspólnym dla dwóch dowolnych układów współrzędnych, prawo transformacji tensorowej zastosowane do tensora metrycznego jest ważne bez przeskazywania jednostki czasu. Stąd, rozważane powyżej różne czasy współrzędnych przejawiają zmiany wiekowe. Rekomendacja 5 (1976) Komisji 4, 8 i 31 IAU, uzupełniona Rekomendacją 5 (1979) Komisji 4, 19 i 31 IAU stanowiła, że Ziemijski Czas Dynamiczny (TDT) i Barycentryczny Czas Dynamiczny (TDB) powinny się różnić tylko o zmiany okresowe. Dlatego różnica między TDB i TCB z biegiem czasu ulega zmianie. Zależność między tymi skalami czasu, wyrażona w sekundach, ma postać:

$$TCB - TDB = L_B \times (JD - 2\ 443\ 144.5) \times 86\ 400$$

Obecnie wartość L_B szacuje się na $1.550\ 505 \times 10^{-8}$ ($\pm 1 \times 10^{-14}$) (Fukushima i in., *Celestial Mechanics*, 38, 215, 1986).

2. Zależność TCB – TCG określona jest poprzez pełną 4-wymiarową transformację:

$$TCB - TCG = c^{-2} \left[\int_{t_0}^t \left[\frac{v_e^2}{2} + U_{ext}(\mathbf{x}_e) \right] dt + \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) \right]$$

\mathbf{x}_e i \mathbf{v}_e oznaczają barycentryczną pozycję i prędkość środka mas Ziemi, a \mathbf{x} barycentryczną pozycję obserwatora. Potencjał zewnętrzny U_{ext} jest potencjałem newtonowskim wszystkich – prócz Ziemi – ciał Układu Słonecznego. Potencjał wewnętrzny powinien być wyznaczony w środku mas Ziemi. W całce, $t = TCB$ i t_0 są tak dobrane, by były zgodne z epoką określoną w punkcie 3 niniejszego komentarza. Jako przybliżenia do TCB – TCG, wyrażonego w sekundach, można używać:

$$TCB - TCG = L_C \times (JD - 2\ 443\ 144.5) \times 86\ 400 + c^{-2} \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) + P$$

Obecnie wartość L_C szacuje się na $1.480\ 813 \times 10^{-8}$ ($\pm 1 \times 10^{-14}$) (Fukushima i in., *Celestial Mechanics*, 38, 215, 1986). Wielkość tę można wyrazić jako $[3GM/2c^2a]$

- + ε , gdzie G jest stałą grawitacyjną, M jest masą Słońca, a jest średnią odległością heliocentryczną Ziemi, zaś ε jest bardzo małym wyrazem (rzędu 2×10^{-12}) powstałym z uśrednionego potencjału planetarnego na Ziemi. Wielkość P przedstawia wyrazy okresowe, które mogą być oszacowane na podstawie wzoru Hirayamy i in. ("Analytical Expression of TCB – TDT₀", in *Proceedings of the IAG Symposia, IUGG XIX General Assembly, Vancouver, August 10–22, 1987*). Dla obserwatorów na powierzchni Ziemi, wyrazy zależne od ich ziemskich współrzędnych mają charakter dobowy, o maksymalnej amplitudzie 2.1 μ s.
3. Początki czasów współrzędnych zostały tak dobrane, aby według Rekomendacji IV każdy z tych czasów dokładnie pokrywał się z Czasem Ziemskim (TT) w środku mas Ziemi, w momencie 1977 1 stycznia 0^h 0^m 0^s TAI (patrz pkt. 3 Rekomendacji IV).
 4. Gdy potrzebne są realizacje TCB i TCG wówczas sugeruje się aby wprowadzić dla nich oznaczenia takie jak: TCB(xxx), gdzie xxx wskazuje na źródło realizowanej skali czasu (np. TAI) i teorię stosowaną do transformacji do TCB lub TCG.

REKOMENDACJA IV

biorąc pod uwagę,

- a) że skale czasu używane do określania daty zjawiska obserwowanego z powierzchni Ziemi oraz w metrologii na Ziemi powinny stosować jako jednostkę sekundę SI, realizowaną przez ziemskie wzorce czasu,
- b) definicję Międzynarodowego Czasu Atomowego TAI, aprobowaną przez 14 Konferencję Generalną Wag i Miar (Conférence Générale des Poids et Mesures, 1971) i uzupełnioną na 9 sesji Komitetu Doradczego do Definicji Sekundy (1980),

zaleca, żeby

1. czasem odniesienia dla pozornych, geocentrycznych efemeryd był czas ziemski TT ,
2. TT był skalą, która różni się od TCG z Rekomendacji III w stałym stosunku i, żeby jednostka miary TT była wybrana tak, by odpowiadała sekundzie SI na geoidzie,
3. dokładnie w momencie 1977 1 stycznia 0^h 0^m 0^s TAI, TT ma wynosić dokładnie 1977 1 stycznia 0^h 0^m 32^s.184.

Komentarz do Rekomendacji IV

1. Podstawą pomiaru czasu na Ziemi jest Międzynarodowy Czas Atomowy (TAI), który jest osiągalny za pomocą opracowywanych i rozpowszechnianych poprawek do wskazań zegarów i skal czasu w poszczególnych państwach. Skala czasu TAI została zdefiniowana na 59 sesji Międzynarodowego Komitetu Wag i Miar (1970) i zaaprobowana przez Generalną Konferencję Wag i Miar (1971) jako realizowana skala czasu. Ponieważ błędy realizowania skali czasu nie zawsze są zaniedbywalne – uznano za konieczne zdefiniowanie idealnej formy TAI, którą po uwzględnieniu przesunięcia 32.184 s określa się obecnie jako Czas Ziemski TT .
2. Skala czasu TAI jest ustanowiona i rozpowszechniana zgodnie z zasadą synchronizacji współrzędnych w geocentrycznym układzie współrzędnych, w sposób określony przez 9 sesję CCDS (1980) i w Raportach CCIR (1990), aneks do Vol. VII (1990).

3. Aby zdefiniować *TT* należy precyzyjnie określić układ współrzędnych za pomocą rodzaju metryki, do której należy. Aby mieścić się w przedziale błędów częstotliwości najlepszych wzorców wystarczy obecnie (1991) używać metryki relatywistycznej podanej w Rekomendacji I.
4. Aby zapewnić ciągłość z poprzednio stosowanym w efemerydach argumentem czasu, Czasem Efemeryd (*ET*), wprowadzono przesunięcie czasu tak, że $TT - TAI = 32.184$ s dokładnie 1977 1 stycznia 0^h 0^m 0^s *TAI*. Data ta odpowiada momentowi wprowadzenia procesu sterowania częstotliwością *TAI* tak, aby jednostka *TAI* była zgodna z możliwie najlepszą realizacją sekundy *SI* na geoidzie. *TT* można uznać za równoważny *TDT* zdefiniowanemu w Rekomendacji 5 IAU (1976) Komisji 4, 8 i 31 oraz Rekomendacji 5 IAU (1979) Komisji 4, 19 i 31.
5. Rozbieżność między *TAI* i *TT* wynika z fizycznych wad wzorców czasu atomowego. W okresie 1977–1990, oprócz stałego przesunięcia 32.184 s, odchyłka ta mieściła się prawdopodobnie w granicach ± 10 μ s. Oczekuje się, że w przyszłości, dzięki poprawie wzorców, będzie ona wzrastała jeszcze wolniej. W wielu wypadkach, zwłaszcza przy publikacji efemeryd, odchyłka ta jest zaniedbywalna. Można wtedy twierdzić, że argumentem efemeryd jest *TAI* + 32.184 s.
6. Czas Ziemi *TT* różni się od *TCG* zdefiniowanego w Rekomendacji III o współczynnik skali, w sekundach:

$$TCG - TT = L_G \times (JD - 2\,443\,144.5) \times 86\,400$$

Obecnie wartość L_G szacuje się na $6.969\,291 \times 10^{-10}$ ($\pm 3 \times 10^{-16}$). Numeryczna wartość L_G jest wyznaczona z ostatnich danych o potencjale grawitacyjnym na geoidzie, $W = 62\,636\,860$ (± 30) $m^2 s^{-2}$ (Chovitz, *Bulletin Géodésique*, 62, 359, 1988). Obie skale czasu oznaczone są różnymi nazwami aby uniknąć błędów skalowania. Zależność między L_B i L_C określonymi w punktach 1 i 2 Komentarza do Rekomendacji III, i L_G jest następująca: $L_B = L_C + L_G$.

7. Jednostką miary *TT* jest sekunda *SI* na geoidzie. W przypadku powszechnie stosowanych wielokrotności sekundy, takich jak doba *TT* odpowiadająca 86 400 sekundom *SI* na geoidzie i juliańskie stulecie *TT* zawierające 36 525 dób *TT*, wszędzie gdzie może powstać niejednoznaczność musi być wyraźnie wskazane ich odniesienie do *TT*. Odpowiadające sobie interwały czasu *TT* i *TAI* są zgodne z dokładnością podstawowych wzorców atomowych (np. w granicach $\pm 2 \times 10^{-14}$ w jednostkach względnych w 1990 roku).
8. Znaczniki skali czasu *TT* mogą przebiegać zgodnie z dowolnym systemem datowania opartym na sekundzie, np. kalendarzem cywilnym lub datami juliańskimi, pod warunkiem, że jasno zostanie określona relacja względem *TT* wszędzie tam, gdzie może powstać niejednoznaczność.
9. Sugeruje się, aby realizacje *TT* były oznaczane identyfikatorem *TT*(xxx). W większości wypadków wygodnym przybliżeniem *TT* jest:

$$TT(TAI) = TAI + 32.184 \text{ s}$$

W niektórych zastosowaniach może jednakże być korzystne użycie innej realizacji *TT*. Na przykład BIPM używa skali *TT*(BIPM90).

REKOMENDACJA V

biorąc pod uwagę,

że pewne ważne prace zostały już wykonane z użyciem Barycentrycznego Czasu Dynamicznego (*TDB*), zdefiniowanego w Rekomendacji 5 (1976) Komisji 4, 8 i 31 IAU oraz Rekomendacji 5 (1979) Komisji 4, 19 i 31 IAU,

uznaje,

że *TDB* może nadal być używany do prac, w których zachodzi obawa nieciągłości z pracami wykonanymi uprzednio.

Komentarz do Rekomendacji V

Niektóre wielkości i stałe astronomiczne mają różne wartości numeryczne zależnie od tego czy użyto TDB czy TCB. Stosując te wartości należy sprecyzować użytą skalę czasu.

REKOMENDACJA VI

biorąc pod uwagę

potrzebę wprowadzenia konwencjonalnego niebieskiego barycentrycznego systemu odniesienia, opartego na obserwowanych pozycjach obiektów pozagalaktycznych, i

zauważając,

istnienie eksperymentalnych układów odniesienia, konstruowanych przez różne instytucje i powiązanych przez Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) w układ używany do opisywania szeregów czasowych parametrów ruchu obrotowego Ziemi,

zaleca,

1. aby intensywnie dokonywać porównań tych systemów w celu oceny ich dokładności i określania systematycznych różnic pomiędzy nimi,
2. żeby Grupa Robocza IAU, składająca się z członków Komisji 4, 8, 19, 24, 31 i 40 oraz IERS, a także innych odpowiednio dobranych ekspertów, w konsultacjach ze wszystkimi instytucjami tworzącymi katalogi radioźródeł pozagalaktycznych, ustaliły listę obiektów kandydujących, mogących posłużyć jako źródła podstawowe do definicji nowego, konwencjonalnego układu odniesienia, wraz z listą drugorzędnych radioźródeł, które mogłyby później zostać włączone jako podstawowe albo zastąpić któreś ze źródeł podstawowych, i

zwraca się z prośbą,

1. żeby ta lista została przedstawiona na XXII Zgromadzeniu Ogólnym (1994) jako część definicji nowego konwencjonalnego systemu odniesienia,
2. aby obiekty z tej listy były systematycznie obserwowane w programie VLBI i innych odpowiednich programach astrometrycznych.

Komentarz do Rekomendacji VI

Rekomendacja ta przede wszystkim opisuje pierwszą część prac, które muszą być wykonane aby przygotować realizację systemu odniesienia, zdefiniowanego w Reko-

mendacjach I i II. Wyboru obiektów należy dokonać uwzględniając w pierwszym rzędzie ich obserwowalność metodą VLBI, ale szczególną uwagę należy poświęcić włączeniu odpowiednio dużej liczby pozagalaktycznych radioźródeł, z dobrze identyfikowalnym składnikiem optycznym.

REKOMENDACJA VII

biorąc pod uwagę,

- a) że nowy konwencjonalny niebieski barycentryczny układ odniesienia powinien być możliwie bliski równikowi i ekwinokcjum FK5, oraz dynamicznemu ekwinokcjum, odniesionym do J2000.0,
- b) że układ ten powinien on być dostępny dla astrometrii w zakresie widma widzialnego i długości fal radiowych,

zaleca,

1. żeby podstawowa płaszczyzna nowego konwencjonalnego niebieskiego systemu odniesienia była możliwie bliska średniemu równikowi w epoce J2000.0, a początek (liczenia rektascensji) w tej podstawowej płaszczyźnie znajdował się możliwie blisko dynamicznego ekwinokcjum na epokę J2000.0,
2. żeby pozycje obiektów pozagalaktycznych, wybranych zgodnie z Rekomendacją VI i stanowiących układ odniesienia, były początkowo obliczane w odniesieniu do równika i ekwinokcjum J2000.0, z użyciem najlepszych, dostępnych danych o odchyleniu bieguna względem wartości otrzymanych przy użyciu przyjętych przez IAU wyrażen opisujących precesję i nutację,
3. żeby dolożono starań, aby porównać różne rodzaje układów odniesienia, a szczególnie układów FK5, Układu Słonecznego i pozagalaktycznego,
4. żeby podjąć nowe lub kontynuować już prowadzone programy obserwacyjne w celu nawiązania pozycji planet do obiektów radiowych i optycznych, i wyznaczać zależności między katalogami pozycji źródeł pozagalaktycznych i najlepszymi katalogami pozycji gwiazd, w szczególności katalogami FK5 i Hipparcos.

Komentarz do Rekomendacji VII

1. Rekomendacja ta określa dobór osi współrzędnych, które zostaną przyjęte w ostatecznej postaci układu odniesienia oraz opisuje prace, które mają być wykonane zanim taki układ może być skonstruowany. Choć w przytoczonych tu rozważaniach zaleca się aby katalog podstawowy tworzony był w oparciu o obserwacje w zakresie widma widzialnego i fal radiowych, to nie wyklucza się stosowania danych obserwacyjnych na innych długościach fal. Pozycje obiektów obserwowanych na innych długościach fal powinny także być odniesione do tego samego systemu.
2. Celem tej rekomendacji jest zapobieżenie nieciągłości w pozycjach gwiazd przy zmianie układu odniesienia FK5 na pozagalaktyczny układ odniesienia. Oznacza to, że pozycje obiektów pozagalaktycznych powinny być wyznaczone w układzie FK5, na epokę J2000.0. Uznano, że należy użyć możliwie najlepszych wartości nutacji i precesji, aby uniknąć wprowadzenia pozornego efektu ruchu własnego do pozycji obiektów pozagalaktycznych. Ostateczne przejście do żądanego ekwinokcjum i płaszczyzny podstawowej zostanie wykonane przez zastosowanie rotacji w J2000.0.

3. *Dynamiczne ekwinokcjum jest w tej rekomendacji zdefiniowane jako przecięcie średniego równika i ekliptyki. Ta ostatnia z kolei jest zdefiniowana jako jednostajnie obracająca się płaszczyzna orbity barycentrum układu Ziemia-Księżyc, uśredniona w całym okresie, dla którego efemerydy są ważne. Ponieważ położenie ekliptyki zależy od efemeryd, wyboru punktu ekwinokcjum należy dokonać z użyciem powszechnie dostępnych, najdokładniejszych w danym czasie efemeryd Układu Słonecznego.*
4. *Definicja systemu odniesienia podana w Rekomendacjach I i II sugeruje stabilność w czasie układu współrzędnych, realizowanego przez niebieski układ odniesienia. Kierunki osi współrzędnych nie powinny ulec zmianie nawet, jeżeli po pewnym czasie realizacja dynamicznego ekwinokcjum lub niebieskiego bieguna efemerydalnego ulegnie poprawie. Podobnie, modyfikacje zbioru obiektów pozagalaktycznych, tworzących system odniesienia, powinny być dokonywane tak, aby kierunki osi współrzędnych nie uległy zmianie. Oznacza to, że skoro osie współrzędnych zostały raz wybrane, w sposób opisany w pierwszej części Rekomendacji VII, to powiązanie definicji konwencjonalnego systemu odniesienia z właściwościami kinematyki Ziemi zostanie zerwane.*
5. *Dopóki zależność między układami optycznych i radiowych źródeł pozagalaktycznych nie będzie dostatecznie dokładnie wyznaczona, Katalog FK5 będzie uważany za tymczasową realizację niebieskiego systemu odniesienia w zakresie optycznym.*

REKOMENDACJA VIII

uznając

- a) ważność dla astronomii przyjęcia konwencjonalnych wartości stałych fizycznych i astronomicznych,
- b) że wartości tych stałych powinny pozostać nie zmieniane dopóki nie różnią się w sposób znaczny od ich ostatnio przyjętych wartości,
- c) oszacowania tych stałych powinny być często poprawiane, aby odzwierciedlać bieżący stan wiedzy,
- d) konieczność udostępniania standardowych procedur z użyciem ich numerycznych wartości, i

zauważając,

- a) że standardy MERIT i IERS przyczyniły się znacząco do postępu astronomii i geodezji,
- b) że numeryczne wartości tych standardów służyły jako system stałych w analizie obserwacji o wysokiej jakości, i

biorąc pod uwagę,

że procedury w tych standardach nie obejmują całości zagadnień astronomii fundamentalnej,

zaleca,

żeby Komisje 4, 5, 8, 19, 24 i 31, w porozumieniu z IAG i IERS, zorganizowały stałą grupę roboczą, której zadaniem będzie uaktualnianie i poprawianie systemu jednostek i stałych astronomicznych, ustalanie wartości astronomicznych stałych fundamentalnych oraz standardowych procedur. Grupa ta:

1. przygotuje projekt sprawozdania o systemie jednostek i stałych astronomicznych, co najmniej na sześć miesięcy przed XXII Zgromadzeniem Generalnym (1994),
2. będzie przygotowywała listę najlepszych oszacowań wielkości astronomicznych, co najmniej na sześć miesięcy przed każdym, kolejnym Zgromadzeniem Generalnym,
3. będzie przygotowywała co najmniej na sześć miesięcy przed każdym kolejnym Zgromadzeniem Generalnym projekt sprawozdania o standardowych procedurach, niezbędnych w astronomii fundamentalnej, które
 - a) w najwyższym stopniu powinny być spójne ze standardami IERS,
 - b) powinny zawierać implementacje procedur w postaci przetestowanego oprogramowania i/lub przykłady testowe,
 - c) powinny być dostępne nie tylko w postaci wydruków lecz także w postaci informacji czytelnej dla komputerów,
4. co najmniej na sześć miesięcy przed XXII Zgromadzeniem Generalnym przygotuje projekt sprawozdania o możliwości elektronicznego dostępu do tych jednostek, stałych, wielkości oraz procedur.

REKOMENDACJA IX

uznając,

że powszechnie akceptowana teoria nutacji nieszttywnej Ziemi, zawierająca wszystkie znane efekty na poziomie dziesiątej części milisekundy łuku, nie jest jeszcze dostępna,

zaleca,

1. aby ci, których zadowala dokładność określenia kątów nutacji (ϵ lub $\psi \sin \epsilon_0$) większa niż $\pm 0''.002$ (1 sigma rms) mogli nadal używać teorii nutacji IAU1980 (P.K. Seidelmann, *Celestial Mechanics*, 27, 79, 1982),
2. aby ci, dla których niezbędne są wartości kątów nutacji z dokładnością większą niż $\pm 0''.002$ (1 sigma rms) korzystali z Biuletynów IERS, w których publikowane są dane obserwacyjne i ekstrapolowane z sześciomiesięcznym wyprzedzeniem odchylenia położenia bieguna niebieskiego z dokładnością około $\pm 0''.0006$ (1 sigma rms),
3. aby zachęcić IUGG do opracowania i przyjęcia odpowiedniego modelu Ziemi, który posłuży jako podstawa do nowej teorii nutacji IAU.

CCIR: Komitet Doradczy do spraw Międzynarodowej Komunikacji Radiowej

IAG: Międzynarodowa Asocjacja Geodezji

IUGG: Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki

IERS: Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi

(tłumaczenie z oryginału ang. Jan Kryński)

**Rezolucje XXII Zgromadzenia Generalnego
Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU)
Haga, 15–27 sierpnia 1994 r.**

REZOLUCJE B

Rezolucja B5

O Grupie Roboczej <<Układy Odniesienia>>

XXII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

że Grupa Robocza <<Układy Odniesienia>> IAU, składająca się z członków Komisji 4, 8, 19, 24 i 31, z przedstawicieli Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) oraz innych odpowiednich ekspertów, została utworzona w celu ustalenia listy radioźródeł pozagalaktycznych, kandydujących jako źródła podstawowe do definicji nowego, konwencjonalnego układu odniesienia, oraz listy drugorzędnych radioźródeł, które mogłyby później zostać włączone jako podstawowe, albo zastąpić któreś ze źródeł podstawowych,

zauważając,

że zostały sporządzone zarówno lista źródeł, które definiują konwencjonalny układ odniesienia, jak i lista źródeł, które mogłyby w przyszłości zostać włączone jako podstawowe albo zastąpić któreś ze źródeł podstawowych,

zaleca,

aby opracowana lista źródeł, które definiują konwencjonalny układ odniesienia, została przyjęta przez XXII Zgromadzenie Generalne (1994) jako pierwszy krok w kierunku zdefiniowania nowego układu odniesienia, i

zwraca się z prośbą,

aby Grupa Robocza <<Układy Odniesienia>> IAU kontynuowała swoją działalność, oraz aby Komisje 4, 8, 19, 24 i 31, a także IERS wydelegowały do niej swoich przedstawicieli, których zadaniem w Grupie Roboczej będzie:

1. zdefiniowanie pozycji radioźródeł z listy,
2. określenie relacji pomiędzy tym układem i zdefiniowanym przez pozycje gwiazd układem optycznym, i
3. zalecenie XXIII Zgromadzeniu Generalnemu (1997) aby określiło sposób organizacji prac nad podtrzymywaniem i rozwijaniem tego systemu odniesienia, a także jego przedłużenia na inne systemy odniesienia stosowane dla innych długości falowych.

ZAŁĄCZNIK do Rezolucji B5

Lista obiektów pozagalaktycznych identyfikuje źródła, które definiują nowy, konwencjonalny niebieski układ odniesienia, oraz źródła kandydujące do włączenia w przyszłości jako źródła podstawowe lub zastąpienia w przyszłości któregoś ze źródeł podstawowych:

d: źródła definiujące,

c: źródła dodatkowe,

o: obiekty optyczne.

Rezolucja B7

O potrzebie rozwoju astrometrii optycznej o dokładności poniżej milisekundy łuku

XXII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

że na Sympozjum 166 przedyskutowano wiele aspektów pozagalaktycznej, galaktycznej i odniesionej do Układu Słonecznego astronomii i astrofizyki, wymagających astrometrii optycznej o wysokiej dokładności,

podkreśla

silne zapotrzebowanie na dane astrometryczne dla ogromnej liczby gwiazd, o dokładności poniżej milisekundy łuku,

zwraca uwagę,

że zaproponowano nowe misje satelitarne, które mogą dostarczyć w bardziej efektywny sposób i dokładniejszych o kilka rzędów wielkości danych, aniżeli dane z bardzo udanej misji HIPPARCOS/TYCHO, i

zachęca

Agencje Kosmiczne do rozważenia w trybie pilnym możliwości realizacji satelitarnych optycznych misji astrometrycznych o dokładnościach poniżej milisekundy łuku, wykorzystując obecny wysoki poziom wiedzy w tej dziedzinie i zaangażowania.

Rezolucja B8

O Łącznej Grupie Roboczej IAU i IUGG <<Teoria Nutacji Niesztywnej Ziemi>>
--

XXII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

uznając,

1. że przyjęta geofizyczna teoria nutacji dla niesztywnej Ziemi wraz oceanami i atmosferą, uwzględniająca wszystkie znane efekty na poziomie jednej dziesiątej milisekundy łuku nie jest jeszcze dostępna i wymaga dalszych badań,
2. że obserwacje nutacji Ziemi dostarczają pożytecznych informacji o fizyce wnętrza Ziemi,

ustanawia, że

zostanie powołana przez Prezydentów Komisji 4, 7 i 19 Międzykomisyjna Grupa Robocza <<Teoria Nutacji Niesztywnej Ziemi>> pod kierownictwem V. Dehant, i zaprasza IUGG do włączenia się w akcję tworzenia tej Grupy Roboczej, w wyniku czego powstałaby Łączna Grupa Robocza IAU/IUGG.

IUGG: Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki

Rezolucja B10

O zachowaniu reliktyw astronomicznych

XXII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę

naukowe, historyczne i praktyczne znaczenie pomiaru łuku południka przez F.G.W. Struve'go,

zachęca

Komitet Wykonawczy IAU do zwrócenia się do rządów następujących krajów: Norwegii, Szwecji, Finlandii, Estonii, Łotwy, Litwy, Ukrainy, Białorusi, Polski i Mołdawii, w których posiadaniu znajdują się jeszcze relikty tego wydarzenia, z zamiarem podjęcia wszelkich możliwych kroków w kierunku zachowania tych reliktyw, łącznie ze zwróceniem się do UNESCO o umieszczenie ich na liście obiektów światowego dziedzictwa.

UNESCO: Edukacyjna, Naukowa i Kulturalna Organizacja Narodów Zjednoczonych

Rezolucja B11

O kontynuowaniu i rozszerzeniu aktywności Grupy Roboczej <<Standardy Astronomiczne>> (WGAS)

XXII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

że wzajemna wymiana danych obserwacyjnych, wstępnie opracowanych lub surowych, wymaga powszechnego używania stałych i algorytmów, które są elementem standardowych modeli używanych w astronomii fundamentalnej,

zaleca aby

1. Grupa Robocza <<Standardy Astronomiczne>> IAU (WGAS) działała permanentnie i przejęła odpowiedzialność za ustanowienie i podtrzymywanie zbioru stałych, algorytmów i procedur,
2. Grupa Robocza WGAS IAU określiła jeden ośrodek w odpowiedniej instytucji, któremu pod nadzorem ogólnoświatowej komisji powierzone zostanie zorganizowanie, podtrzymywanie i rozprowadzanie drogą elektroniczną zbioru stałych, algorytmów i procedur, i
3. ośrodek ten oraz Grupa Robocza WGAS IAU koordynowały swoją działalność z IERS i IAG.

IERS: Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi

IAG: Międzynarodowa Asocjacja Geodezji

Rezolucja B12

O Międzyunijnej Grupie Roboczej dotyczącej milimetrowej i submilimetrowej astronomii

XXII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

- a) silny argument naukowy przemawiający za utworzeniem dużej sieci milimetro-
wych/submilimetrowych teleskopów, o czułości i rozdzielczości o rząd wielkości
większych niż posiadane przez jakiegokolwiek istniejące urządzenie,
- b) potrzebę nowoczesnych rozwiązań technicznych do realizacji takiego przedsię-
wzięcia w granicach rozsądnych kosztów,
- c) potrzebę współpracy międzynarodowej w celu wykonania takiego instrumentu,
- d) istnienie Grupy Roboczej Komisji J URSI zaangażowanej w tę tematykę,

postanawia

podjąć starania o utworzenie Międzyunijnej Grupy Roboczej o podobnych kompeten-
cjach, a mianowicie:

1. badania głównych celów naukowych w dziedzinie milimetrowej/submilimetrowej
astronomii przewidzianych na początek lat 2000,
2. koordynacji i oceny jasności i czytelności obrazu danych radiowych w aspekcie
oceny obiektu i strategii obserwacji,
3. badania nowych rozwiązań teleskopów i ich oprzyrządowania,
4. badania potencjalnych możliwości partnerstwa międzynarodowego.

URSI: Międzynarodowa Naukowa Unia Radiowa

(tłumaczenie z oryginału ang. Jan Kryński)

**Rezolucje XXIII Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU)
Kyoto, 17–30 sierpnia 1997 r.**

REZOLUCJE B

Rezolucja B1

O użyciu dat juliańskich

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

uznając

- a. potrzebę istnienia systemu umożliwiającego określanie daty w sposób ciągły i służącego analizowaniu zmiennych w czasie danych astronomicznych, i
- b. że do tego celu były w astronomii, geodezji i geofizyce wykorzystywane zarówno daty juliańskie jak i zmodyfikowane daty juliańskie,

zaleca

- a. aby data juliańska (zgodnie z podaną w załączniku definicją) była stosowana do zapisu momentów występowania zjawisk astronomicznych,
- b. aby stosować zmodyfikowaną datę juliańską (równoważną dacie juliańskiej pomniejszonej o 2 400 000.5) w tych przypadkach, w których wygodnie jest przypisywać początek dnia momentowi północy,
- c. aby kiedy występuje jakakolwiek wątpliwość w odniesieniu do użycia zmodyfikowanej daty juliańskiej, określić wyraźnie jej definicję,
- d. aby we wszystkich językach stosować skrót „*JD*” dla daty juliańskiej i „*MJD*” dla zmodyfikowanej daty juliańskiej.

ZAŁĄCZNIK: Proponowane definicje

Zaleca się stosowanie następujących definicji:

1. **Liczba dnia juliańskiego (JDN)**

Liczba dnia juliańskiego, odniesionego do dnia słonecznego, jest liczbą przypisaną do danego dnia w wyniku ciągłego zliczania dni, od dnia o liczbie dnia juliańskiego równej 0, która odnosi się do dnia rozpoczynającego się w południe średniego czasu Greenwich 1 stycznia 4713 p.n.e., co odpowiada – 4712 w juliańskim kalendarzu proleptycznym.

2. **Data juliańska (JD)**

Data juliańska (JD) dowolnego momentu stanowi sumę liczby dni juliańskich odpowiadających poprzedzającemu dany moment południu oraz ułamka dnia od tego południa. Data juliańska rozpoczyna się o 12^h 0^m 0^s UT i składa się z 86 400 sekund. Aby określić przedziały czasu w jednostajnym systemie czasu należy wyrazić JD w jednostajnej skali czasu. W tym celu zaleca się, aby JD było wyrażane w sekundach SI Czasu Ziemi (TT), przy czym długość dnia wynosi 86 400 sekund SI.

W niektórych wypadkach może być konieczne wyrażenie daty juliańskiej przy użyciu innej skali czasu (dla wyjaśnienia różnych stosowanych skal czasu zob. Seidelmann, 1992). W razie potrzeby stosowana skala czasu powinna być wskazana, np. JD(UT1). Należy zauważyć, że interwały czasu obliczone z różnic dat juliańskich, odniesionych do niejednostajnych skal czasu, takich jak UTC, mogą wymagać skorygowania o zmiany w skalach czasu (np. sekundy przestępne). Moment czasu wyrażony w UTC może być przetransformowany do Czasu Ziemi, jeśli wymaga tego precyzja obliczeń. Wartości $TT - UT$ są dostępne w tablicach podanych w pracach: McCarthy i Babcock (1986) oraz Stephenson i Morrison (1984, 1995). Tablica 1 (nie włączona do wersji 1B) dostarcza różnice pomiędzy TAI i UTC od 1961 roku do 1 stycznia 1996 roku. Różnice pomiędzy TT i UTC można obliczyć wiedząc, że $TT = TAI + 32.184$ s. Dla dat po 1996 roku, odpowiednie różnice będą podawane w Annual Reports of the International Earth Rotation Service. Dane z tablicy 1 są także dostępne w formie elektronicznej na stronach internetowych: <http://hpiers.obspm.fr> lub <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bal/bulc/TC-TAI> lub też na stronach <http://maia.usno.navy.mil> lub <ftp://maia.usno.navy.mil/ser7/tai-utc.dat>.

Rezolucja B2

O Międzynarodowym Niebieskim Systemie Odniesienia (ICRS)

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

- (a) że Rekomendacja VII Rezolucji A4 XXI Zgromadzenia Generalnego określa układ współrzędnych dla nowego niebieskiego układu odniesienia i, w szczególności, jego ciągłość z systemem FK5 na epokę J2000.0,
- (b) że Rezolucja B5 XXII Zgromadzenia Generalnego określa listę źródeł pozagalaktycznych, kandydujących do wykorzystania w realizacji nowego niebieskiego układu odniesienia,
- (c) że Grupa Robocza <<Układy Odniesienia>> IAU zakończyła w 1995 roku wyznaczanie pozycji wspomnianych źródeł pozagalaktycznych w układzie współrzędnych dopasowanym do układu FK5, w granicach tolerancji błędów układu FK5 (zob. Komentarz 1),
- (d) że opracowanie Katalogu Hipparcos zakończono w 1996 roku, i że jego układ współrzędnych został dopasowany do układu opartego na źródłach pozagalaktycznych wymienionych w (c) ze zgodnością (na poziomie 1 sigma) ± 0.6 mas na epokę 1991.25 i ± 0.25 mas/rok w prędkości obrotu,

zauważając,

że wszystkie warunki określone w Rezolucjach IAU zostały spełnione,

postanawia,

- (a) że począwszy od 1 stycznia 1998 roku, Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia (ICRS), określony w dotyczącej układów odniesienia Rezolucji IAU z 1991 roku i zdefiniowany przez Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi IERS będzie niebieskim systemem odniesienia IAU (zob. Komentarz 2),

- (b) że odpowiadającym *ICRS* fundamentalnym układem odniesienia będzie Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia (*ICRF*) utworzony przez Grupę Roboczą <<Układy Odniesienia>> IAU,
- (c) że Katalog Hipparcos będzie podstawową realizacją *ICRS* w zakresie widma optycznego,
- (d) że IERS powinien podjąć odpowiednie działania, wspólnie z Grupą Roboczą <<Układy Odniesienia>> IAU, w kierunku podtrzymywania *ICRF* i określania jego relacji z układami odniesienia dla innych zakresów widma.

Komentarz 1: *IERS 1995 Report, Observatoire de Paris, p. II-19 (1996)*

Komentarz 2: *"The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service (ICRS)", Arias E.F. i in. A&A 303, 604 (1995)*

Rezolucja B3

O ustanowieniu spójnych ram relatywistycznych

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę, że

- Rezolucja A4 IAU (1991) ustanowiła ogólnorelatywistyczne ramy do zdefiniowania systemów odniesienia o środkach w barycentrum Układu Słonecznego oraz w środku mas Ziemi,
- powołana ma mocy Rezolucji C6 IAU (1994) Podgrupa Robocza <<Relatywistyka w Mechanice Nieba i Astrometrii>> stoi na stanowisku, że teoria względności musi być uwzględniana w opracowywaniu wszelkich obserwacji astronomicznych i geodynamicznych, lecz że ramy relatywistyczne określone w Rezolucji A4 IAU (1991) nie są wystarczające dla niektórych zastosowań, i że stosowana obecnie terminologia powinna być zmieniona i dostosowana do terminologii używanej w ramach uogólnionej teorii względności,
- pożądane jest stworzenie spójnego systemu oznaczeń i stosowanie go we wszelkich pracach z dziedziny astronomii, geodezji i metrologii, w których używane są przestrzenno-czasowe systemy odniesienia,

zauważając, że

- prace w tym kierunku są prowadzone również przez wiele różnych innych organizacji: BIPM (organizacja międzyrządowa), IAG (międzynarodowa asocjacja unii naukowych), IERS (służba IAG i IUGG),
- sprawą najwyższej wagi jest, aby wszystkie zainteresowane strony przyjęły spójne definicje i ustalenia w ramach ogólnej teorii względności,
- BIPM zaoferował współpracę z IAU w realizacji tego celu,

zaleca żeby

- powołany został Połączony Komitet BIPM i IAU, którego zadaniem byłoby sformułowanie definicji i ustaleń, pod kątem utworzenia spójnych ram relatywistycznych dla wszelkich działań z wykorzystaniem przestrzenno-czasowych systemów odniesienia i metrologii na wystarczającym poziomie dokładności, utworzenie

spójnego systemu oznaczeń dla wielkości i jednostek oraz przystosowanie przyjętych definicji i ustaleń dla użytkownika do praktycznych zastosowań,

- IUGG była zaproszona to uczestniczenia w Połączonym Komitecie, co zapewniłoby uzgodnienie spójnego systemu ze społecznością naukową,
- organizacje uczestniczące w Połączonym Komitecie podjęły Rezolucje lub Rekomendacje, każda w ramach własnej działalności, w celu stosowania identycznych definicji, ustaleń i oznaczeń opartych na wnioskach Komitetu.

BIPM: Międzynarodowe Biuro Wag i Miar

IAG: Międzynarodowa Asocjacja Geodezji

IERS: Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi

IUGG: Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki

Rezolucja B4

O teorii nutacji niesztymnej Ziemi

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

uznając,

- że Łączna Grupa Robocza Międzynarodowej Unii Astronomicznej i Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IAU-IUGG-WG) <<Teoria Nutacji Niesztymnej Ziemi>> wypełniła swoje zadanie poprzez zidentyfikowanie zjawisk geofizycznych i astronomicznych, jakie muszą jeszcze zostać wymodelowane zanim zostanie przyjęta dokładna teoria nutacji dla niesztymnej Ziemi, i
- że Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS), zgodnie z wytycznymi sformułowanymi w Rekomendacji C1 IAU z 1994 roku, opublikowała w IERS Conventions (1996) tymczasowy model precesyjno-nutacyjny, który pasuje do obserwacji z dokładnością ± 1 mas,

zatwierdza

podane w załączniku wnioski Grupy Roboczej IAU-IUGG WG << Teoria Nutacji Niesztymnej Ziemi>>,

zwraca się z prośbą

do Grupy Roboczej IAU-IUGG WG << Teoria Nutacji Niesztymnej Ziemi>> o przedstawienie szczegółowego raportu na kolejnym Zgromadzeniu Generalnym IUGG (sierpień 1999 r.), podczas którego Grupa Robocza zostanie rozwiązana,

i zachęca

społeczność naukową do poświęcenia w przyszłości uwagi następującym zagadnieniom:

- uzupełnienie nowego szeregu nutacyjnego dla sztywnej Ziemi o dodatkowe wyrazy, niezbędne do utworzenia kompletnej teorii, z dokładnością $\pm 5 \mu\text{as}$, i
- uzupełnienie nowej funkcji przenoszenia niesztymnej Ziemi, dla Ziemi bez narzucania warunku równowagi hydrostatycznej w stanie początkowym, dołączenie zgodnych z obserwacjami niesprężystości płaszcza i okresu swobodnej nutacji jądra, oraz o uwzględnienie lepszego modelu ciekłych i gazowych części planety, łącznie z rozpraszaniem energii.

ZAŁĄCZNIK

Łączna Grupa Robocza << Teoria Nutacji Niesztywnej Ziemi >> określiła problemy związane z przyjętym przez IAU w 1980 roku szeregiem nutacyjnym, poprzez zwrócenie uwagi, że

- (1) występuje różnica w tempie precesji pomiędzy wartością obserwowaną przy użyciu Interferometrii Długich Baz (VLBI) i Laserowych Pomiarów Księżyca (LLR), a przyjętą wartością, wynosząca $-3 \mu\text{s}/\text{rok}$,
- (2) zaobserwowano (przy użyciu VLBI i LLR) zmianę w wartości kąta nachylenia równika do ekliptyki, jaka następuje z prędkością $-0.24 \text{ mas}/\text{rok}$, choć taka zmiana nie jest uwzględniona w teorii precesyjno-nutacyjnej z 1980 roku,
- (3) dodatkowo do wymienionych trendów, obserwuje się regularne różnice peak-to-peak, dochodzące do 20 mas, pomiędzy nutacją zaobserwowaną przy użyciu VLBI i LLR i nutacją przyjętą przez IAU w 1980 roku,
- (4) te różnice odpowiadają amplitudom spektralnym do kilku milisekund łuku, i
- (5) te różnice pomiędzy obserwacjami, a teorią znacznie przekraczają obecnie uzyskiwaną dokładność obserwacji.

Grupa Robocza uznała poprawę, jaka została dokonana w modelowaniu tych wielkości, i zaleca, aby w celu określenia bardziej precyzyjnego modelu nutacji, na poziomie milisekundy łuku w amplitudach spektralnych i kilku milisekund łuku w analizie peak-to-peak, stosować modele:

- (1) oparty na nowej funkcji przejścia niesztywnej Ziemi, dla Ziemi bez narzucania warunku równowagi hydrostatycznej w stanie początkowym, z uwzględnieniem niesprężystości płaszcza oraz spłaszczenia granicy jądro-płaszcz dającego zgodny z wartością obserwowaną okres swobodnej nutacji jądra (FCN), a także z uwzględnieniem zgodnego z obserwowaną precesją globalnego spłaszczenia dynamicznego Ziemi, i
- (2) oparty na nowym szeregu nutacyjnym sztywnej Ziemi, uwzględniającym następujące efekty perturbujące:
 1. w efemerydach luni-solarnych: pośrednie efekty planetarne, nierówności Księżyca, nachylenie spowodowane przez J_2 , nachylenie planetarne, zmiany wiekowe amplitud, efekty precesji i nutacji,
 2. w uwzględnianych ciałach perturbujących: obok uwzględnionych efektów Księżyca i Słońca, powinny być dodatkowo uwzględnione bezpośrednie efekty planetarne pochodzące od Wenus, Jowisza, Marsa i Saturna,
 3. aby uwzględniony był potencjał zewnętrzny: efekty J_3 i J_4 dla Księżyca, i
 4. w samej teorii: efekty trójosiowości Ziemi, efekty relatywistyczne i efekty drugiego rzędu.

WG uznaje, że nowa generacja modeli posiada jeszcze pewne niedoskonałości, wśród których zasadniczymi są słabe modelowanie rozpraszania energii w jądrze i pewne efekty oceaniczne i atmosferyczne, i zachęca środowisko naukowe do zajęcia się w przyszłości tymi problemami.

WG uznaje, że mimo niedoskonałości obecnych teoretycznych modeli nutacji, szeregi nutacyjne publikowane w IERS Conventions (1996), zgodnie z Rekomendacją C1 IAU z 1994 roku, stanowią najlepsze, dostępne dla użytkowników, szeregi nutacyjne. Model IERS, oparty na obserwacjach ruchu bieguna niebieskiego, jest popierany przez Grupę Roboczą, która zaleca aby społeczność naukowa kontynuowała obserwacje VLBI i LLR, które umożliwiają dokładne wyznaczanie nutacji, precesji i tempa zmiany nachylenia równika do ekliptyki.

Rezolucja B5

O Międzynarodowym Niebieskim Systemie Odniesienia (<i>ICRS</i>) i Katalogu Hipparcos

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

- (1) że Międzynarodowa Unia Astronomiczna (IAU) przyjęła Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia (*ICRS*), w którym osie mają kierunki ustalone względem odległego tła wyznaczonego poprzez obserwacje źródeł pozagalaktycznych,
- (2) że realizacja *ICRS* jest oparta na obserwacjach wykonywanych z Ziemi, której osie podlegają precesji i nutacji względem *ICRS*,
- (3) że występują znaczące różnice pomiędzy nutacją przyjętą przez IAU w 1980 roku i obserwacjami astronomicznymi,
- (4) że obserwowane jest tempo zmiany nachylenia równika do ekliptyki, które nie jest uwzględnione w teorii precesyjno-nutacyjnej IAU1980,
- (5) że występuje różnica $-3 \mu\text{as/rok}$ w tempie precesji pomiędzy wartościami obserwowanymi i przyjętymi,

zaleca

- (1) żeby Wydział I IAU utworzył nową Grupę Roboczą, która zostałaby zobowiązana do przedstawienia raportu na Zgromadzeniu Generalnym IAU w 2000 roku, i która będzie
 - (a) badała i wyjaśniała wpływ na obliczenia astronomiczne takich zmian, jak przyjęcie Międzynarodowego Niebieskiego Systemu Odniesienia, dostępności Katalogu Hipparcos i oczekiwanych zmian w konwencjonalnym modelu precesyjno-nutacyjnym, i
 - (b) opracowywała zalecenia w aspekcie stosowania odpowiednich algorytmów,
- (2) żeby ta Grupa Robocza przebadala te problemy wspólnie z Międzynarodową Służbą Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) i utrzymała bliską łączność z Grupą Roboczą <<Układy Odniesienia>> IAU, Grupą Roboczą <<Stałe Astronomiczne>> IAU oraz Grupą Roboczą <<Teoria Nutacji Niesztywnej Ziemi>> IAU-IUGG (aż do jej rozwiązania podczas Zgromadzenia Generalnego IUGG w 1999 roku), poprzez wymianę przedstawicieli.

REZOLUCJA B6

O teorii względności w mechanice niebieskiej i w astrometrii

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę, że

- relatywistyczny barycentryczny czterowymiarowy układ współrzędnych dla Układu Słonecznego z jego skalą czasu współrzędnych *TCB* został zdefiniowany w Rezolucji A4 Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU) w 1991 roku,

- relatywistyczny geocentryczny czterowymiarowy układ współrzędnych z jego skalą czasu współrzędnych *TCG* został zdefiniowany w Rezolucji A4 IAU (1991) i Rezolucji 2 Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IUGG) w 1991 roku, i
- sekunda SI i metr SI były zalecone, odpowiednio dla czasu własnego i dla długości własnej, w Rezolucji A4 IAU (1991) jako podstawowe jednostki fizyczne czasoprzestrzeni we wszystkich systemach,

zauważając, że

- praktyczne realizacje barycentrycznego i geocentrycznego układu współrzędnych w wielu zespołach (zob. Standardy Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS), 1992) oparte są na skalach czasu *TDB* i *TT*, zamiast odpowiednio na *TCB* i *TCG*, i wykorzystują współczynniki skalowania $1 - L_B$ i $1 - L_G$ dla współrzędnych przestrzennych i współczynników mas *GM*, odpowiednio w systemach barycentrycznym i geocentrycznym, gdzie L_B i L_G są określone w Rezolucji A4 IAU (1991),
- nawet bardziej złożone współczynniki skalowania są wprowadzone w modelu VLBI (Interferometria Długich Baz) IERS Conventions (1996), i
- stałe astronomiczne i współcześnie używane definicje fundamentalnych koncepcji astronomicznych są oparte na mechanice newtonowskiej z jej absolutną przestrzenią i absolutnym czasem, co prowadzi do niejednoznaczności w uwzględnianiu efektów relatywistycznych,

zaleca żeby

- współrzędne przestrzenne barycentrycznego i geocentrycznego systemu odniesienia, zdefiniowane w Rezolucjach IAU (1991), były używane odpowiednio do niebieskich i ziemskich układów odniesienia, bez żadnych współczynników skalujących,
- końcowe praktyczne realizacje układów współrzędnych przeznaczonych dla astronomii i geodezji były wdrożeniem systemów zdefiniowanych w Rezolucjach IAU-IUGG (1991),
- stosowaniu *TT* dla wygody analizy danych obserwacyjnych nie towarzyszyło skalowanie przestrzennych współrzędnych geocentrycznych,
- algorytmy do określania stałych astronomicznych i definicje fundamentalnych koncepcji astronomicznych były podane wyłącznie w ramach podstawowych systemów, przewidzianych w rezolucjach IAU-IUGG (1991), i
- Grupa Robocza <<Stałe Astronomiczne>> IAU (WGAS) kontynuowała rozważania nad relatywistycznymi aspektami koncepcji, algorytmów i stałych astronomii fundamentalnej.

Rezolucja B7

Popieranie obserwacji VLBI i LLR

XXIII Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę

- 1) Rezolucję B5,
- 2) Rezolucję B6,

stwierdzając,

- 1) że regularne obserwacje techniką Interferometrii Długich Baz (VLBI) stanowią jedyny środek podtrzymywania Międzynarodowego Niebieskiego Układu Odniesienia (*ICRF*),
- 2) że obserwacje techniką Laserowych Pomiarów Księżyca (LLR) są istotne dla powiązania słonecznego układu odniesienia z *ICRF*, i
- 3) że VLBI i LLR są podstawowymi technikami obserwacyjnymi do wyznaczania precesji i nutacji Ziemi,

zaleca

żeby astronomiczne programy obserwacyjne o wysokiej precyzji były tak zorganizowane, aby

- 1) astronomiczne systemy odniesienia mogły być podtrzymywane z najwyższą możliwą dokładnością na obu półkulach: północnej i południowej,
- 2) obserwacje precesji-nutacji o wysokiej dokładności były udostępniane do porównywania z modelami geofizycznymi i do zastosowań w astronomii i geodezji.

(tłumaczenie z oryginału ang. Jan Kryński)

**Rezolucje XXIV Zgromadzenia Generalnego
Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU)
Manchester, 7–18 sierpnia 2000 r.**

REZOLUCJE B

Rezolucja B1.1

Założenie i utrzymanie układów i systemów odniesienia

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

zauważając,

1. że Rezolucja B2 XXIII Zgromadzenia Generalnego (1997) wyraźnie stwierdza, iż „fundamentalnym układem odniesienia ma być Międzynarodowy Niebieski Układ Odniesienia (*ICRF*) utworzony przez Grupę Roboczą <<Układy Odniesienia>> IAU”,
2. że Rezolucja B2 XXIII Zgromadzenia Generalnego (1997) wyraźnie stwierdza, iż „Katalog Hipparcos ma być podstawową realizacją Międzynarodowego Niebieskiego Systemu Odniesienia (*ICRS*) w zakresie widma optycznego” oraz
3. potrzebę dokładnej definicji systemów odniesienia narzuconą przez bezprecedensową precyzję, i

uznając

1. za ważne kontynuowanie operacyjnych obserwacji techniką interferometrii długich baz (VLBI) w celu utrzymywania *ICRF*,
2. ważność obserwacji VLBI dla operacyjnego wyznaczania parametrów potrzebnych do określenia zmiennej w czasie transformacji pomiędzy Międzynarodowym Niebieskim i Ziemijskim Układami Odniesienia,
3. wzrastające przemieszczenie pomiędzy Układem Hipparcos i *ICRF*, oraz
4. potrzebę utrzymania optycznej realizacji układu odniesienia możliwie bliskiej *ICRF*,

zaleca żeby

1. Wydział I IAU utrzymał Grupę Roboczą do spraw Niebieskich Systemów Odniesienia, utworzoną z członków Wydziału I, w celu konsultowania z Międzynarodową Służbą Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) problemów związanych z utrzymywaniem *ICRS*,
2. IAU uznała Międzynarodową Służbę VLBI (IVS) jako Organizację Służby IAU dla geodezji i astrometrii,
3. oficjalny przedstawiciel IVS był zapraszany do udziału w pracach Grupy Roboczej IAU do spraw Niebieskich Systemów Odniesienia,
4. IAU kontynuowała delegowanie oficjalnego przedstawiciela do Zespołu Kierowniczego IVS,
5. w astrometrycznych i geodezyjnych programach obserwacyjnych VLBI uwzględniać, przy wyborze obserwowanych obiektów (w szczególności na półkuli połu-

- dniowej) i ich rozkładzie, wymagania niezbędne do podtrzymania *ICRF* i powiązania z go układem optycznym Hipparcos, oraz
6. środowisko naukowe kontynuowało priorytetowe naziemne i kosmiczne obserwacje (a) w celu podtrzymania optycznego Układu Hipparcos i układów dla innych zakresów widmowych i (b) dla powiązania tych układów z *ICRF*.

Rezolucja B1.2

Niebieski Układ Odniesienia Hipparcos

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

zauważając,

1. że Rezolucja B2 XXIII Zgromadzenia Generalnego (1997) wyraźnie stwierdza, iż „Katalog Hipparcos ma być podstawową realizacją Międzynarodowego Niebieskiego Systemu Odniesienia (*ICRS*) w zakresie widma optycznego”,
2. potrzebę aby realizacja ta charakteryzowała się najwyższą precyzją,
3. że ruchy własne wielu gwiazd z Katalogu Hipparcos, znanych lub podejrzewanych o przynależność do układów wielokrotnych, są zaburzone przez nie uwzględniony ruch orbitalny,
4. szerokie zastosowanie Katalogu Hipparcos jako odniesienia dla *ICRS* w rozszerzeniu na słabsze gwiazdy,
5. potrzebę uniknięcia niejasności w relacji między Międzynarodowym Niebieskim Układem Odniesienia (*ICRF*) i Układem Hipparcos, oraz
6. wzrastające przesunięcie pomiędzy Układem Hipparcos i *ICRF*,

zaleca, żeby

1. Rezolucja B2 XXIII Zgromadzenia Generalnego IAU (1997) była poprawiona o wyłączenie z optycznej realizacji *ICRS* wszystkich gwiazd oznaczonych w Katalogu Hipparcos symbolami C, G, O, V i X, oraz
2. ten zmodyfikowany Układ Hipparcos został oznaczony jako Niebieski Układ Odniesienia Hipparcos (*HCRF*).

Rezolucja B1.3

Definicja Barycentrycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia i Geocentrycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

1. że Rezolucja A4 XXI Zgromadzenia Generalnego (1991) zdefiniowała czasoprzestrzenny układ współrzędnych dla (a) Układu Słonecznego (obecnie nazywany Barycentrycznym Niebieskim Systemem Odniesienia, (*BCRS*)) i (b) Ziemi (obecnie nazywany Geocentrycznym Niebieskim Systemem Odniesienia (*GCRS*)) w ujęciu ogólnej teorii względności,
2. życzenie zapisania tensorów metrycznych w *BCRS* i *GCRS* w zwartej i wzajemnie zgodnej postaci, i

3. fakt, że przeprowadzono istotne prace w zakresie ogólnej teorii względności przy użyciu miary harmonicznej, która okazała się użyteczna i wprowadzająca uproszczenia w wielu rodzajach zastosowań,

zaleca

1. wybór współrzędnych harmonicznycy dla obu systemów odniesienia: barycentrycznego i geocentrycznego,
2. zapis czasowo-czasowej składowej oraz przestrzenno-przestrzennej składowej barycentrycznej metryki $g_{\mu\nu}$ ze współrzędnymi barycentrycznymi (t, \mathbf{x}) (t = czas współrzędnych barycentrycznych (TCB)) z pojedynczym potencjałem skalarnym $w(t, \mathbf{x})$, który jest uogólnionym potencjałem Newtonowskim, i składowej czasowo-przestrzennej z potencjałem wektorowym $w^i(t, \mathbf{x})$; jako warunek brzegowy zakłada się, że oba te potencjały zanikają w odległości dalekiej od Układu Słonecznego, mianowicie

$$\begin{aligned} g_{00} &= -1 + c^{-2}2 w(t, \mathbf{x}) - c^{-4}2 w(t, \mathbf{x})^2 \\ g_{0i} &= -c^{-3}4w^i(t, \mathbf{x}) \\ g_{ij} &= \delta_{ij} [1 + c^{-2}2 w(t, \mathbf{x})] \end{aligned}$$

gdzie

$$\begin{aligned} w(t, \mathbf{x}) &= G \int d^3\mathbf{x}' \frac{\sigma(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} + c^{-2}2G \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int d^3\mathbf{x}' \sigma(t, \mathbf{x}') |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \\ w^i(t, \mathbf{x}) &= G \int d^3\mathbf{x}' \frac{\sigma^i(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \end{aligned}$$

Przez σ i σ^i oznaczono odpowiednio masy grawitacyjne i gęstości.

3. zapis geocentrycznego tensora metrycznego G_{ab} ze współrzędnymi geocentrycznymi (T, \mathbf{X}) (T = czas współrzędnych geocentrycznych (TCG)) w takiej samej postaci jak barycentryczne lecz z potencjałami $W(T, \mathbf{X})$ i $W^a(T, \mathbf{X})$; te geocentryczne potencjały powinny być rozdzielone na dwie części – potencjały W_E i W^a_E pochodzące od oddziaływania grawitacyjnego Ziemi oraz potencjały zewnętrzne W_{ext} i W^a_{ext} wywołane pływami i efektami inercjalnymi; zakłada się, że zewnętrzne składowe metrycznych potencjałów zanikają w środku mas Ziemi i przyjmują postać szeregu potęgowego o dodatnich potęgach \mathbf{X} , mianowicie

$$\begin{aligned} G_{00} &= -1 + c^{-2}2W(T, \mathbf{X}) - c^{-4}2W(T, \mathbf{X})^2 \\ G_{0a} &= -c^{-3}4 W^a(T, \mathbf{X}) \\ G_{ab} &= \delta_{ab} [1 + c^{-2}2W(T, \mathbf{X})] \end{aligned}$$

Potencjały W i W^a powinny być rozdzielone zgodnie z

$$\begin{aligned} W(T, \mathbf{X}) &= W_E(T, \mathbf{X}) + W_{ext}(T, \mathbf{X}) \\ W^a(T, \mathbf{X}) &= W^a_E(T, \mathbf{X}) + W^a_{ext}(T, \mathbf{X}) \end{aligned}$$

potencjały Ziemi W_E i W^a_E są zdefiniowane w ten sam sposób co potencjały w i w^i lecz z argumentami obliczanymi w GRCS z całkami po całej Ziemi.

4. stosowanie, gdy wymaga tego dokładność obliczeń, pełnej postnewtonowskiej transformacji współrzędnych pomiędzy BCRS i GCRS, narzuconej przez formę

odpowiednich tensorów metrycznych, mianowicie, dla kinematycznie nie obracającego się *GCRS* ($T = TCG$, $t = TCB$, $r_E^i \equiv x^i - x_E^i(t)$, z sumowaniem od 1 do 3 względem wzajemnie równych wskaźników),

$$T = t - c^{-2}[A(t) + v_{Ei}^i] + c^{-4}[B(t) + B^i(t)r_E^i + B^{ij}(t)r_E^i r_E^j + C(t, \mathbf{x})] + O(c^{-5})$$

$$\mathbf{X}^a = \delta_{ai} [r_E^i + c^{-2} \left(\frac{1}{2} v_{Ei}^i v_{Ej}^j r_E^j + w_{ext}(\mathbf{x}_E) r_E^i + r_E^i a_{Ej}^j r_E^j - \frac{1}{2} a_{Ei}^i r_E^2 \right)] + O(c^4)$$

gdzie

$$\frac{d}{dt} A(t) = \frac{1}{2} v_E^2 + w_{ext}(\mathbf{x}_E)$$

$$\frac{d}{dt} B(t) = -\frac{1}{8} v_E^4 - \frac{3}{2} v_E^2 w_{ext}(\mathbf{x}_E) + 4 v_{Ei}^i w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2} w_{ext}^2(\mathbf{x}_E)$$

$$B^i(t) = -\frac{1}{2} v_E^2 v_E^i + 4 w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) - 3 v_{Ei}^i w_{ext}^i(\mathbf{x}_E)$$

$$B^{ij}(t) = -v_{Ei}^i \delta_{aj} Q^a + 2 \frac{\partial}{\partial x^j} w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) - v_{Ei}^i \frac{\partial}{\partial x^j} w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2} \delta^{ij} \frac{d}{dt} w_{ext}(\mathbf{x}_E)$$

$$C(t, \mathbf{x}) = -\frac{1}{10} r_E^2 \left(\frac{d}{dt} a_{Ei}^i \cdot r_E^i \right)$$

przy czym x_E^i , v_E^i i a_E^i są składowymi wektorów pozycji barycentrycznej, prędkości i przyspieszenia Ziemi, zaś symbol kropki oznacza całkowitą pochodną względem t , i

$$Q^a = \delta_{ai} \left[\frac{\partial}{\partial x^i} w_{ext}(\mathbf{x}_E) - a_{Ei}^i \right].$$

Potencjały zewnętrzne w_{ext} i w_{ext}^i określone są następująco:

$$w_{ext} = \sum_{A \neq E} w_A, \quad w_{ext}^i = \sum_{A \neq E} w_A^i,$$

gdzie E oznacza Ziemię a w_A i w_A^i są określone poprzez wyrażenia dla w i w^i z całkowaniem wyłącznie po ciele A .

Komentarze do Rezolucji B1.3

Należy rozumieć, że podane wyrażenia na w i w^i dają g_{00} z dokładnością do $O(c^{-5})$, g_{0i} z dokładnością do $O(c^{-5})$ i g_{ij} z dokładnością do $O(c^{-4})$. Gęstości σ i σ^j określone są za pomocą składowych tensora momentu energii materii tworzącej ciała Układu Słonecznego zgodnie z załączoną literaturą. Dokładności G_{ab} wyrażone poprzez c^{-n} odpowiadają dokładnościom odpowiednich $g_{\mu\nu}$.

Potencjały zewnętrzne W_{ext} i W_{ext}^a mogą być zapisane w postaci:

$$W_{ext} = W_{tidal} + W_{iners},$$

$$W_{ext}^a = W_{tidal}^a + W_{iners}^a$$

Potencjał W_{tidal} jest uogólnieniem newtonowskiego wyrażenia na potencjał pływowy. Postnewtonowskie wyrażenia na W_{tidal} i W_{tidal}^a można znaleźć w załączonej literaturze. Potencjały W_{iner} i W_{iner}^a są liniowymi w X^a , składowymi inercjalnymi. Pierwszy z nich jest określony głównie za pomocą wyrażeń wiążących parametry niesferyczności Ziemi z potencjałem zewnętrznym. W kinematycznie nieobracającym się Geocentrycz-

nym Niebieskim Systemie Odniesienia W^a_{iner} opisuje siłę Coriolisa wywołaną głównie przez precesję geodezyjną.

Wreszcie, lokalne potencjały grawitacyjne W_E i W^a_E Ziemi są powiązane z barycentrycznymi potencjałami grawitacyjnymi w_E i w^i_E następująco

$$W_E(T, \mathbf{X}) = w_E(t, \mathbf{x})(1 + c^{-2}2v_E^2) - c^{-2}4v^i_E w^i_E(t, \mathbf{x}) + O(c^{-4}),$$

$$W^a_E(T, \mathbf{X}) = \delta_{ai} [w^i_E(t, \mathbf{x}) - v^i_E w_E(t, \mathbf{x})] + O(c^{-2}).$$

Literatura do Rezolucji B1.3

Brumberg, V.A., Kopeikin, S.M., 1988, *Nuovo Cimento B* **103**, 63.
 Brumberg, V.A., 1991, *Essential Relativistic Celestial Mechanics*, Hilger, Bristol.
 Damour, T., Soffel, M., Xu, C., *Phys. Rev. D* **43**, 3273 (1991); **45**, 1017 (1992); **47**, 3124 (1993); **49**, 618 (1994).
 Klioner, S.A., Voinov, A.V., 1993, *Phys. Rev. D*, **48**, 1451.
 Kopeikin, S.M., 1989, *Celest. Mech.*, **44**, 87.

Rezolucja B1.4

Współczynniki potencjału postnewtonowskiego

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

1. że odpowiednia parametryzacja potencjałów metrycznych (lub momentów multipolowych) na zewnątrz masywnych ciał Układu Słonecznego, w postaci rozwinięć wyrażonych poprzez współczynniki potencjału jest bardzo wygodna w wielu zastosowaniach w mechanice niebieskiej i w astrometrii, oraz
2. że mające znaczenie fizyczne współczynniki potencjału postnewtonowskiego mogą być wprowadzone na podstawie literatury,

zaleca

1. rozwinięcie potencjału postnewtonowskiego Ziemi w Geocentrycznym Niebieskim Systemie Odniesienia (*GCRS*) na zewnątrz Ziemi, w postaci

$$W^E(T, \mathbf{X}) = \frac{GM^E}{R} \left[1 + \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^{+l} \left(\frac{R^E}{R} \right)^l P_{lm}(\cos\theta) (C^E_{lm}(T)\cos m\varphi + S^E_{lm}(T)\sin m\varphi) \right]$$

gdzie C^E_{lm} i S^E_{lm} są, z wystarczającą dokładnością, równoważne postnewtonowskim momentom multipolowym, wprowadzonym przez Damoura i in. (Damour i in., *Phys. Rev. D*, **43**, 3273, 1991), θ i φ są kątami biegunowymi odpowiadającymi przestrzennym współrzędnym X^a w *GCRS*, zaś $R = |\mathbf{X}|$, i

2. wyrażenie na potencjał wektorowy na zewnątrz Ziemi, który jest źródłem dobrze znanego efektu Lense-Thirringa, w funkcji wektora \mathbf{S}_E całkowitego ziemskiego momentu obrotowego w postaci

$$W^a_E(T, \mathbf{X}) = -\frac{G}{2} \frac{(\mathbf{X} \times \mathbf{S}_E)^a}{R^3}$$

Rezolucja B1.5**Rozszerzone relatywistyczne ramy dla transformacji czasu i realizacji czasów współrzędnych w Układzie Słonecznym**

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

1. że Rezolucja A4 XXI Zgromadzenia Generalnego (1991) zdefiniowała czasoprzestrzenne układy współrzędnych dla Układu Słonecznego (Barycentrycznego Systemu Odniesienia) i dla Ziemi (Geocentrycznego Systemu Odniesienia) w ujęciu ogólnej teorii względności,
2. że Rezolucja B1.3, zatytułowana „Definicja Barycentrycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia i Geocentrycznego Niebieskiego Systemu Odniesienia” zmieniła nazwy tych systemów odpowiednio na Barycentryczny Niebieski System Odniesienia (*BCRS*) i Geocentryczny Niebieski System Odniesienia (*GCRS*) oraz określiła ogólne ramy dla wyrażenia ich tensorów metrycznych i zdefiniowania transformacji współrzędnych na pierwszym poziomie postnewtonowskim,
3. że, w oparciu o przewidywane osiągi zegarów atomowych, przyszłe pomiary czasu i częstotliwości będą wymagały praktycznego zastosowania tych ram w *BCRS*, i
4. że prace teoretyczne wymagające takich rozszerzeń zostały już wykonane,

zaleca

aby dla zastosowań dotyczących transformacji czasu i realizacji czasów współrzędnych w Układzie Słonecznym, Rezolucja B1.3 była stosowana następująco:

1. tensor metryczny ma być wyrażony jako

$$g_{00} = -[1 - c^{-2} 2 w_0(t, \mathbf{x}) + w_L(t, \mathbf{x})] - c^{-4} 2 [w_0(t, \mathbf{x})^2 + \Delta(t, \mathbf{x})]$$

$$g_{0i} = -c^{-3} 4 w^i(t, \mathbf{x})$$

$$g_{ij} = \delta_{ij} [1 + c^{-2} 2 w_0(t, \mathbf{x})]$$

gdzie ($t \equiv$ czas współrzędnych barycentrycznych (*TCB*), \mathbf{x}) są współrzędnymi barycentrycznymi, $w_0 = G \sum_A M_A/r_A$, z sumowaniem po wszystkich ciałach niebieskich A Układu Słonecznego, $\mathbf{r}_A = \mathbf{x} - \mathbf{x}_A$ są współrzędnymi środka masy ciała A , $r_A = |\mathbf{r}_A|$, i gdzie w_L zawiera rozwinięcie w funkcji momentów multipolowych (zob. ich definicję w Rezolucji B1.4 zatytułowanej „Współczynniki potencjału postnewtonowskiego”) wymaganych dla każdego ciała. Potencjał wektorowy $w^i(t, \mathbf{x}) = \sum_A w_A^i(t, \mathbf{x})$, i funkcja $\Delta(t, \mathbf{x}) = \sum_A \Delta_A(t, \mathbf{x})$ są podane w Komentarzu 2 do Rezolucji B1.5.

2. zależność między *TCB* i czasem współrzędnych geocentrycznych (*TCG*) może być wyrażona z wystarczającą dokładnością jako

$$TCB - TCG = c^{-2} \left[\int_{t_0}^t \left(\frac{v_E^2}{2} + w_{0ext}(\mathbf{x}_E) \right) dt + v^i_{E^i} \right] - c^{-4} \times$$

$$\times \left[\int_{t_0}^t \left(-\frac{1}{8} v_E^4 - \frac{3}{2} v_E^2 w_{0ext}(\mathbf{x}_E) + 4 v^i_{E^i} w^j_{ext}(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2} w_{0ext}^2(\mathbf{x}_E) \right) dt - \left(3 w_{0ext}(\mathbf{x}_E) + \frac{v_E^2}{2} \right) v^i_{E^i} \right]$$

gdzie v_E jest barycentryczną prędkością Ziemi, a wskaźnik *ext* odnosi się do sumowania po wszystkich ciałach za wyjątkiem Ziemi.

Komentarze do Rezolucji B1.5

1. To sformułowanie prowadzi do niepewności nie przekraczającej 5×10^{-18} w prędkości, a dla wyrazów quasiokresowych nie przekraczającej 5×10^{-18} w prędkości zmian amplitudy i 0.2 ps w fazie amplitudy dla pozycji bardziej odległych od Słońca aniżeli kilka promieni Słońca. Taką samą niepewnością obarczona jest transformacja pomiędzy TCB i TCG dla pozycji oddalonych od Ziemi na odległość do 50 000 km. Niepewności w wartościach wielkości astronomicznych mogą spowodować większe błędy we wzorach.
2. W ramach wspomnianych niepewności wystarczy wyrazić potencjał wektorowy $w_A^i(t, \mathbf{x})$ ciała A jako

$$w_A^i(t, \mathbf{x}) = G \left[\frac{-(\mathbf{r}_A \times \mathbf{S}_A)^i}{2r_A^3} + \frac{M_A v_A^i}{r_A} \right]$$

gdzie \mathbf{S}_A jest całkowitym momentem obrotowym ciała A, zaś v_A^i są składowymi prędkości ciała A w układzie barycentrycznym. Jeśli idzie o funkcję $\Delta_A(t, \mathbf{x})$, wystarczającym jest wyrazić ją jako

$$\Delta_A(t, \mathbf{x}) = \frac{GM_A}{r_A} \left[-2v_A^2 + \sum_{B \neq A} \frac{GM_B}{r_{BA}} + \frac{1}{2} \left(\frac{(r^k_{AV^k_A})^2}{r_A^2} + r^k_{AA} a^k_A \right) \right] + \frac{2Gv^k_A (\mathbf{r}_A \times \mathbf{S}_A)^k}{r_A^3}$$

gdzie $r_{BA} = |\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_A|$ i a^k_A jest przyspieszeniem ciała A w układzie współrzędnych barycentrycznych. We wzorach tych, wyrazy z \mathbf{S}_A są potrzebne tylko dla Jowisza ($S = 6.9 \times 10^{38} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}$) i Saturna ($S = 1.4 \times 10^{38} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}$) w bezpośrednim sąsiedztwie tych planet.

3. Ponieważ obecna Rekomendacja stanowi rozszerzenie rekomendacji IAU z 1991 roku, ważnych na pełnym pierwszym poziomie postnewtonowskim, stałe L_C i L_B , które były wprowadzone w rekomendacjach IAU z 1991 roku, powinny być zdefiniowane jako $\langle \text{TCG}/\text{TCB} \rangle = 1 - L_C$ i $\langle \text{TT}/\text{TCB} \rangle = 1 - L_B$, gdzie TT odnosi się do czasu ziemskiego, a $\langle \rangle$ odnosi się do operacji wystarczająco długiego uśredniania w środku mas Ziemi. Najnowsze oszacowanie L_C to (Irvin, A. and Fukushima, T., 1999, *Aston. Astroph.*, **348**, 642–652)

$$L_C = 1.480\ 826\ 867\ 41 \times 10^{-8} \pm 2 \times 10^{-17}$$

Z Rezolucji B1.9 na temat „Zmiany definicji Czasu Ziemskiego TT” można wnioskować, że $L_B = 1.550\ 519\ 767\ 72 \times 10^{-8} \pm 2 \times 10^{-17}$, co wynika z zależności $1 - L_B = (1 - L_C)(1 - L_G)$. L_G jest zdefiniowane w Rezolucji B1.9.

Z uwagi na niemożliwość jednoznacznego zdefiniowania L_B i L_C , stałe te nie powinny być używane do formułowania transformacji czasu wówczas gdy wymagana jest jego znajomość z dokładnością 1×10^{-16} lub wyższą.

4. Jeżeli TCB – TCG jest obliczone przy użyciu efemeryd planetarnych, wyrażonych raczej w funkcji czasu jako argumentu (oznaczony T_{eph}), który jest bliski Barycentrycznemu Czasowi Dynamicznemu (TDB), aniżeli czasu TCB, pierwszą całkę podaną w Rekomendacji 2 (powyżej) można obliczyć jako

$$\int_{t_0}^t \left(\frac{v_E^2}{2} + w_{0ext}(\mathbf{x}_E) \right) dt = \left[\int_{T_{eph0}}^{T_{eph}} \left(\frac{v_E^2}{2} + w_{0ext}(\mathbf{x}_E) \right) dt \right] / (1 - L_B)$$

Rezolucja B1.6

Model precesji-nutacji IAU 2000

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

uznając, że

1. Łączna Grupa Robocza (IAU-IUGG WG) Międzynarodowej Unii Astronomicznej i Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki, do spraw „Teorii Nutacji Niesztywnej Ziemi” wykonała powierzone jej następujące zadania
 - a. określenie dla sztywnej Ziemi nowych szeregów nutacyjnych o wysokiej precyzji, takich jak (1) SMART97 (Bretagnion i in., 1998, *Astron. Astroph.* **329**, 329–338); (2) REN2000 (Souchay i in., *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* **135**, 111–131); (3) RDAN97 (Roosbeek i Dehant, 1999, *Celest. Mech.* **70**, 215–253),
 - b. uzupełnienie i porównanie nowych funkcji przenoszenia niesztywnej Ziemi, dla Ziemi bez narzucania warunku równowagi hydrostatycznej w stanie początkowym, z uwzględnieniem, zgodnie z obserwacjami, niesprężystości płaszcza i okresu swobodnej nutacji jądra,
 - c. zwrócenie uwagi, że istniejące modele oparte na całkowaniu numerycznym nie są dostatecznie rozwinięte aby włączyć w nie rozpraszanie energii w jądrze, i
 - d. zwrócenie uwagi na wymagające modelowania efekty innych zjawisk geofizycznych i astronomicznych, takich jak pływy oceaniczne i atmosferyczne, które wymagają dalszych badań,
2. zgodnie z Rekomendacją C1 IAU z 1994 roku, Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) opublikuje w IERS Conventions (2000) model precesyjno-nutacyjny, który jest zgodny z obserwacjami z błędem średnim średniej ważonej na poziomie 0.2 milisekund łuku (mas),
3. dostępne są pół-analityczne teorie geofizyczne nutacji wymuszonej, uwzględniające niektóre lub wszystkie z następujących efektów: niesprężystość i sprzężenia elektromagnetyczne na granicach jądro-płaszcz i jądro wewnętrzne-jądro zewnętrzne, roczny pływ atmosferyczny, nutację geodezyjną i efekty pływów morskich,
4. poprawki z tytułu pływów morskich są niezbędne we wszystkich częstotliwościach nutacyjnych, i
5. istnieją również modele empiryczne oparte na formule rezonansowej bez dodatkowych poprawek,

aprobuje

wnioski IAU-IUGG WG <<Teorii Nutacji Niesztywnej Ziemi>> opublikowane przez Dehant i in., 1999, *Celest. Mech.* **72**(4), 245–310, a także obecne porównania między różnymi wariantami, i

zaleca

aby, począwszy od 1 stycznia 2003 roku, model precesji IAU1976 i teoria nutacji IAU1980 zostały zastąpione przez model precesyjno-nutacyjny IAU2000A (MHB2000, oparty na funkcji przenoszenia Mathewsa, Herringa i Buffeta z 2000 roku, złożonych do opublikowania w *Journal of Geophysical Research*) w przypadku użytkowników wymagających modelu na poziomie dokładności 0.2 mas, lub przez

jego skróconą wersję IAU2000B w przypadku użytkowników wymagających modelu na poziomie dokładności 1 mas, wraz ze związanymi z nimi wartościami tempa precesji i nachylenia ekliptyki oraz ze związanym z nimi przemieszczeniem bieguna niebieskiego na epokę J2000.0, opublikowane w IERS Conventions 2000, i

zachęca

1. do kontynuowania prac teoretycznych nad rozwijaniem szeregów nutacyjnych nieszytywnej Ziemi,
2. do kontynuowania obserwacji VLBI w celu zwiększenia dokładności szeregów nutacyjnych i modelu nutacji oraz do monitorowania nieprzewidywalnej swobodnej nutacji jądra, i
3. do rozwijania nowych, zgodnych z modelem IAU2000A form przedstawienia precesji.

Rezolucja B1.7

Definicja Pośredniego Bieguna Niebieskiego

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

zauważając

potrzebę dokładnego zdefiniowania systemów odniesienia wynikającą z bezprecedensowej precyzji obserwacji, i

uznając

1. potrzebę wyraźnego określenia osi, względem której zdefiniowany jest Kąt Obrotu Ziemi, i
2. że Niebieski Biegun Efemerydalny (*CEP*) nie uwzględnia zmian dobowych i zmian o wyższej częstotliwości w orientacji Ziemi,

zaleca

1. aby biegunem, którego ruch jest określony w Geocentrycznym Niebieskim Systemie Odniesienia (*GCRS*, zob. Rezolucja B1.3) poprzez ruch średniej osi Tisseranda Ziemi, zawierający okresy dłuższe niż dwa dni, był Pośredni Biegun Niebieski (*CIP*),
2. aby kierunek *CIP* na epokę J2000.0 był przesunięty względem kierunku bieguna *GCRS* w sposób zgodny z modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000A (zob. Rezolucja B1.6),
3. aby ruch *CIP* w *GCRS* był realizowany poprzez model precesyjno-nutacyjny IAU2000A dla okresów dłuższych niż dwa dni, z dodatkowym uwzględnieniem zależnej od czasu poprawki udostępnianej przez Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) i wyznaczanej w oparciu o obserwacje astronomiczno-geodezyjne,
4. aby ruch *CIP* w Międzynarodowym Ziemijskim Systemie Odniesienia (*ITRS*) był określany przez IERS na podstawie odpowiednich obserwacji astronomiczno-geodezyjnych oraz przy użyciu modeli zawierających zmiany o wysokiej częstotliwości,
5. aby poprawki o najwyższej precyzji do modeli opisujących ruch *CIP* w *ITRS* mogły być określone przy użyciu procedur opracowanych przez IERS, i
6. aby *CIP* został wdrożony 1 stycznia 2003 roku.

Komentarz do Rezolucji B1.7

Wyrazy nutacji wymuszonej o okresach krótszych od dwóch dni są zawarte w modelu ruchu CIP w ITRS.

Średnia oś Tisseranda Ziemi odpowiada osi średniej powierzchni geograficznej, oznaczonej jako oś B w pracy Seidelmana, 1982, Celest. Mech. 27, 79–106.

W wyniku tej rezolucji Niebieski Biegun Efemerydalny staje się zbędny.

Rezolucja B1.8

**Definicja i zastosowanie Niebieskiego i Ziemskiego
Efemerydalnego Punktu Początkowego**

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

uznając

1. potrzebę definicji systemu odniesienia, odpowiedniej dla współczesnej realizacji konwencjonalnych systemów odniesienia i zgodnej z precyzją obserwacji,
2. potrzebę ścisłej definicji obrotu Ziemi względem gwiazd, i
3. za pożądane opisanie ruchu obrotowego Ziemi niezależnie od jej ruchu orbitalnego, i

zauważając.

że wykorzystanie pojęcia „Nieobrcającego się Punktu Początkowego” (Non-Rotating Origin, Guinot, 1979) na ruchomym równiku spełnia powyższe warunki i umożliwia zdefiniowanie *UTI*, niewrażliwego na zmiany w modelach precesji i nutacji na poziomie mikrosekundy łuku,

zaleca

1. stosowanie „Nieobrcającego się Punktu Początkowego” w Geocentrycznym Niebieskim Systemie Odniesienia (*GCRS*) i desygnowanie tego punktu jako Niebieskiego Efemerydalnego Punktu Początkowego (*CEO*) na równiku Pośredniego Bieguna Niebieskiego (*CIP*),
2. stosowanie „Nieobrcającego się Punktu Początkowego” w Międzynarodowym Ziemskim Systemie Odniesienia (*ITRS*) i desygnowanie tego punktu jako Ziemskiego Efemerydalnego Punktu Początkowego (*TEO*) na równiku *CIP*,
3. aby *UTI* był liniowo proporcjonalny do Kąta Obrotu Ziemi (*ERA*), zdefiniowanego jako kąt pomierzony w płaszczyźnie równika *CIP* pomiędzy wektorami jednostkowymi skierowanymi do *CEO* i *TEO*,
4. aby transformacja pomiędzy *ITRS* i *GCRS* była określona poprzez pozycję *CIP* w *GCRS*, pozycję *CIP* w *ITRS* i Kąt Obrotu Ziemi (*ERA*),
5. aby Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi (*IERS*) podjęła starania mające na celu wdrożenie tych zaleceń z dniem 1 stycznia 2003 roku, i
6. aby *IERS* nadal zapewniał użytkownikom dane i algorytmy do konwencjonalnych transformacji.

Komentarze do Rezolucji B1.8

Położenie CEO może być obliczone na podstawie modelu IAU2000A precesji i nutacji CIP oraz na podstawie obecnych wartości przemieszczenia CIP względem bieguna ICRF na epokę J2000.0 przy użyciu wzorów opracowanych przez Capitaine i in. (2000).

Położenie TEO jedynie w nieznacznym stopniu zależy od ruchu bieguna i może być ekstrapolowane zgodnie z wynikami opracowania Capitaine i in. (2000), przy użyciu danych IERS.

Liniowa zależność pomiędzy Kątem Obrotu Ziemi θ i UT1 powinna zapewnić ciągłość w fazie i zmienności UT1 z wartością otrzymaną za pomocą konwencjonalnej zależności między średnim czasem gwiazdowym Greenwich (GMST) a UT1. Zależność ta określona jest następująco

$$\theta(UT1) = 2\pi [0.779\,057\,273\,2640 + 1.002\,737\,811\,911\,354\,48 \times \\ \times (\text{Juliańska data UT1} - 2\,451\,545.0)]$$

Literatura do Rezolucji B1.8

Guinot, B., 1979, in D.D. McCarthy and J.D. Pilkington (eds.), *Time and the Earth's Rotation*, D. Reidel Publ., 7–18.

Capitaine, N., Guinot, B., McCarthy, D.D., 2000, *Astron. Astrophys.*, **335**, 398–405.

Rezolucja B1.9

Zmiana definicji Czasu Ziemskiego TT

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

1. że Rezolucja A4 IAU (1991) w swojej Rekomendacji 4 zawiera definicję Czasu Ziemskiego (TT), i
2. że zawilość oraz zmiany w czasie, nieodłączne definicji i realizacji geoidy, stanowią źródło niepewności w definicji i realizacji TT, co może w najbliższej przyszłości stać się zasadniczym źródłem niepewności w realizacji TT w oparciu o zegary atomowe,

zaleca

aby skala czasu TT różniła się od TCG o stałą zmianę: $dTT/dTCG = 1 - L_G$, gdzie $L_G = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10}$ jest stałą definiującą.

Komentarz do Rezolucji B1.9

Wielkość L_G była zdefiniowana w Rekomendacji 4 Rezolucji A4 IAU (1991) jako równa U_G/c^2 , gdzie U_G jest potencjałem siły ciężkości Ziemi na geoidzie. L_G jest obecnie stosowane jako stała definiująca.

Rezolucja B2

Czas Uniwersalny Koordynowany

XXIV Zgromadzenie Generalne Międzynarodowej Unii Astronomicznej

biorąc pod uwagę,

1. że definicja Czasu Uniwersalnego Koordynowanego (*UTC*) uzależniona jest od obserwacji astronomicznych skali czasu *UT1* aby wprowadzać sekundy przestępne,
2. że niemożność przewidzenia momentu wprowadzania sekund przestępnych ma wpływ na współczesne systemy telekomunikacyjne i nawigacyjne, i
3. że obserwacje astronomiczne dostarczają dokładnej oceny wiekowego opóźnienia w prędkości obrotowej Ziemi,

zaleca

1. aby IAU powołała grupę roboczą, która przedstawiłaby Wydziałowi I IAU na Zgromadzeniu Generalnym w 2003 roku propozycję redefinicji *UTC*,
2. aby w tych badaniach znalazła się odpowiedź na pytanie czy jest potrzeba stosowania sekund przestępnych, rozważenie możliwości wprowadzania sekund przestępnych w uprzednio określonych interwałach, i ocena limitów tolerancji dla różnic *UT1 – UTC*, i
3. aby te badania były prowadzone we współpracy z odpowiednimi grupami Międzynarodowej Unii Nauk Radiowych (URSI), Międzynarodowej Unii Telekomunikacji (ITU-R), Międzynarodowego Biura Wag i Miar (BIPM), Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi (IERS) i stosownych agencji nawigacyjnych.

(tłumaczenie z oryginału ang. Jan Kryński)