

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ - OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE
KATEDRA VYŠŠÍ GEODÉZIE

název předmětu

VYŠŠÍ GEODÉZIE 21

číslo úlohy

název úlohy

3

GPS - výpočet drah umělých družic Země

školní rok

semestr

skupina

zpracoval

datum

e-mail

2002/03

7

64

Zdeněk Nejedlý

20.10.2003

rsc@email.cz

Zadání:

K dispozici máte soubor GOPE0810.00N (<http://athena.fsv.cvut.cz/VG21/GOPE0810.00N>) vysílaných (*broadcast*) efemerid pro den 21.3.2000 získaných na stanici GOPE (Geodetická observatoř Pecný, Ondřejov).

Příklad 3.1 Pro danou družici jejím PRN kódem spočítejte pomocí *broadcast* efemerid její polohu v časech t_1, t_2 (čas je dán v systému GPS). Polohu vypočtete v systému WGS-84, ve kterém jsou dány i dráhové elementy. Použijte vždy elementy pro nejbližší epochu k okamžiku, v níž má být poloha určena.

kód družice PRN = 27 $t_1 = 40060.000$ (11:07:40)

kód družice PRN = 27 $t_2 = 42852.000$ (11:54:12)

poznámky: čas epochy je udáván ve vteřinách od počátku dne

Příklad 3.2 Pro družici s PRN shodným z prvního příkladu a pro stanoviště na Zemi dané souřadnicemi φ, λ, H_{el} nakreslete graf, znázorňující polohu družice vůči pozorovateli v místním topocentrickém systému (tzv. *sky plot*) v průběhu dne 21.3.2000. Dále spočtete časy, kdy družice v daný den poprvé zajde za obzor resp. se nad ním poprvé objeví. Použijte elipsoidu WGS-84 a efemerid použitých pro čas t_1 v prvním příkladě.

souřadnice stanoviště: $\varphi = 28.00^\circ$ s.š
 $\lambda = 35.00^\circ$ v.d
 $H_{el} = 793.00$ m

Příklad 3.3 Využijte stejného stanoviště pozorovatele jako v předchozím příkladu a stejných efemerid a vytvořte graf zobrazující elevační úhel družice v místě pozorovatele a radiální rychlost družice vůči pozorovateli v průběhu dne 21.3.2000.

Teoretické řešení

1) Nerušený Keplerovský pohyb

Nerušený Keplerovský pohyb je takový pohyb dvou těles, která můžeme nahradit hmotnými body a působí na ně pouze vzájemné gravitační síly. Podle Newtonova gravitačního zákona pak platí vztah (1.01).

$$\ddot{\vec{r}} = -G \frac{M+m}{r^3} \vec{r} \quad (1.01)$$

kde: G je Newtonova gravitační konstanta
 M a m jsou hmotnosti obou těles
 r je průvodič mezi tělesy
 $\ddot{\vec{r}}$ je zrychlení (druhá derivace průvodiče podle času)

Tento vztah je vektorová diferenciální rovnice druhého stupně a funkce $\vec{r}(t)$ je jednoznačně definována pomocí šestice počátečních podmínek a je možné s jeho pomocí dokázat platnost Keplerových zákonů:

- 1 – planety se pohybují po elipsách blízkých kružnicích se Sluncem v ohnisku
- 2 – plošná rychlost (plocha opsaná průvodičem za časovou jednotku) je konstantní
- 3 – poměr druhé mocniny oběžné doby vzhledem ke třetí mocnině hlavní poloosy je konstantní

Tyto zákony platí i pro vztah Země – družice kdy je navíc možné díky malé hmotnosti družice vůči hmotnosti Země nahradit ve vztahu (1.01) hodnotu $G(M+m)$ hodnotou geocentrické gravitační konstanty GM .

Pohyb splňující Keplerovy zákony je možné popsat pomocí Keplerových elementů:

- a ... hlavní poloosa elipsy
- e ... excentricita elipsy
- T_0 ... průchod družice perigeem (průsečík elipsy s hlavní poloosou)
- Ω ... rektascenze výstupného uzlu (výstupný uzel je průsečík dráhy s rovinou rovníku)
- ω ... argument perigea (úhel mezi výstupným uzlem a perigeem)
- i ... sklon dráhy vzhledem k rovině rovníku

První tři elementy se označují jako vnitřní (poloha družice v rovině dráhy), zbylé tři jako vnější (orientace roviny dráhy vůči inerciálnímu rovníkovému systému).

Pokud zvolíme souřadnicový systém s počátkem v ohnisku elipsy s osou x směřující do perigea, můžeme polární (r a v) nebo pravoúhlé (x a y) souřadnice určit následujícím postupem.

Střední úhlová rychlost družice (střední pohyb)

$$n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{GM}{a^3}} \quad (1.02)$$

Střední anomálie (popisuje rovnoměrný pohyb fiktivní družice po kružnici, jde o úhel mezi fiktivní družicí a směrem do perigea)

$$M(t) = n(t - t_0) \quad (1.03)$$

Excentrická anomálie

$$\hat{E}(t) = \hat{M}(t) + e \cdot \sin \hat{E}(t) \quad (1.04)$$

Pravá anomálie (úhel mezi průvodičem a směrem do perigea)

$$v(t) = 2 \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \tg \frac{E(t)}{2} \right) \quad (1.05)$$

Průvodič družice

$$r(t) = a \cdot (1 - e \cdot \cos E(t)) = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v} \quad (1.06)$$

$$\vec{r} = r \begin{bmatrix} \cos v(t) \\ \sin v(t) \\ 0 \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} \cos E(t) - e \\ \sqrt{1 - e^2} \cdot \sin E(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.07)$$

Rychlost družice

$$\dot{\vec{r}} = \frac{n \cdot a^2}{r} \begin{bmatrix} -\sin E(t) \\ \sqrt{1 - e^2} \cdot \cos E(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{GM}{a(1 - e^2)}} \begin{bmatrix} -\sin v \\ \cos v + e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.08)$$

Dále je možné takto získané vektory transformovat do rovníkového systému.

Průvodič družice

$$\vec{\rho} = R_z(-\Omega) \cdot R_x(-i) \cdot R_z(-\omega) \cdot \vec{r} \quad (1.09)$$

kde R_i jsou matice rotace podle jednotlivých souřadnicových os

Rychlost družice

$$\dot{\vec{\rho}} = R_z(-\Omega) \cdot R_x(-i) \cdot R_z(-\omega) \cdot \dot{\vec{r}} \quad (1.10)$$

Tuto transformaci je možné upravit použitím argumentu šířky $u = v + \omega$ kdy osa x' směřuje do výstupného uzlu družice. Při zanedbání precese, nutace a pohybu pólu platí pro transformaci do terestrického systému spojeného s rotující Zemí následující vztahy.

Průvodič družice

$$\vec{\rho}' = R_z(-l) R_x(-i) R_z(-\omega) \vec{r} \quad (1.11)$$

Rychlost družice

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\rho}}' &= \frac{d}{dt} R_z(-l) R_x(-i) R_z(-\omega) \vec{r} = \\ &= \omega_E \cdot R_z'(-l) R_x(-i) R_z(-\omega) \vec{r} + R_z(-l) R_x(-i) R_z(-\omega) \dot{\vec{r}} \end{aligned} \quad (1.12)$$

kde ω_E je úhlová rychlost rotace Země

$R_z'(x) = \frac{d}{dx} R_z(x)$ je derivace matice příslušné rotace

2) Rušený pohyb

Protože Země není pravidelné homogenní těleso a na družici působí vnější síly (přitažlivost Slunce, Měsíce a ostatních planet, sluneční vítr a mnohé další) jež jí udělují zrychlení a (tzv. poruchové zrychlení), přejde rovnice (1.01) na tvar

$$\ddot{\vec{r}} = -G \frac{M+m}{r^3} \vec{r} + a \quad (2.01)$$

Pohyb družice pak není rovinný, neprobíhá po elipse a k jeho popisu nestačí šest Keplerových elementů. Družice GPS proto vysílají na nosné vlně údaje o své poloze, tzv. vysílané (*broadcast*) efemeridy které mají přesnost několik metrů což pro běžné aplikace GPS dostačuje. Kromě toho služba IGS (*International GPS Service*) zveřejňuje se zpožděním na internetu přesné (*precise*) efemeridy.

Pro zachycení dat z družic GPS byl vytvořen formát RINEX (*Receiver Independent EXchange format*) který obsahuje všechny potřebné informace k určení polohy v systému WGS-84. Soubor RINEX obsahuje mimo jiné tyto údaje:

t_0 ... čas efemerid

TOE ... počet sekund od začátku GPS týdne (půlnoc mezi sobotou a nedělí)

\sqrt{a} , e , M_0 , ω_0 , i_0 , l_0 ... keplerovské elementy v čase t_0

Δn ... oprava středního pohybu n

\dot{i} ... časová derivace sklonu dráhy

$\dot{\Omega}$... časová derivace rektascenze výstupního uzlu

C_{uc} , C_{us} ... korekční parametry pro argument perigea

C_{rc} , C_{rs} ... korekční parametry pro vzdálenost od geocentra

C_{ic} , C_{is} ... korekční parametry pro sklon dráhy

V množině keplerovských parametrů je čas průchodu perigeem T_0 nahrazen hodnotou střední anomálie M_0 pro čas t_0 a rektascenze výstupního uzlu Ω je nahrazena délkou l v terestrickém systému (úhel mezi osou x systému WGS-84 a směrem do výstupního uzlu) pro začátek GPS týdne.

Výpočet polohy GPS družice pak probíhá podle vztahů uvedených v předchozí části věnující se nerušenému pohybu s tím, že některé hodnoty se vypočtou podle následujících vztahů.

Oprava družicových hodin

$$\Delta t = \delta_c + \frac{d\delta_c}{dt}(t - t_0) + \frac{d^2\delta_c}{dt^2}(t - t_0) \quad (2.02)$$

kde: δ_c , $\frac{d\delta_c}{dt}$ a $\frac{d^2\delta_c}{dt^2}$ jsou oprava družicových hodin a její první a druhá derivace v čase t_0

t_0 je čas získání efemerid

t je čas, pro který se počítá poloha

Střední anomálie

$$M(t) = M_0 + \left(\sqrt{\frac{GM}{a^3}} + \Delta n \right) \cdot (t - t_0) \quad (2.03)$$

Excentrická anomálie

$$\hat{E}(t) = \hat{M}(t) + e \cdot \sin \hat{E}(t) \quad (2.04)$$

Pravá anomálie

$$v(t) = 2 \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \tg \frac{E(t)}{2} \right) \quad (2.05)$$

Délka výstupného uzlu

$$l = l_0 - \omega_E \cdot TOE + (\dot{\Omega} - \omega_E)(t - t_0) \quad (2.06)$$

Argument šířky

$$u = v(t) + \omega_0 = v(t) + \omega_0 + C_{uc} \cos(2u) + C_{us} \sin(2u) \quad (2.07)$$

Argument perigea

$$\omega = \omega_0 + C_{uc} \cos(2u) + C_{us} \sin(2u) \quad (2.08)$$

Délka průvodiče

$$r(t) = a(1 - e \cdot \cos E(t)) + C_{rc} \cos(2u) + C_{rs} \sin(2u) \quad (2.09)$$

$$\vec{r}(t) = r(t) \begin{bmatrix} \cos u \\ \sin u \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sklon roviny dráhy

$$i = i_0 + \dot{i}(t - t_0) + C_{ic} \cos(2u) + C_{is} \sin(2u) \quad (2.11)$$

Transformace do rovníkového systému pevně spojeného se zemí

$$\vec{\rho}' = R_Z(-l) R_X(-i) \vec{r} \quad (2.12)$$

Transformace do systému WGS-84

$$\vec{\rho}_{WGS-84} = R_Z(-l) R_X(-i) R_Z(-\omega) \vec{r} \quad (2.13)$$

3) Určení azimutu a zenitové vzdálenosti družice pro konstrukci sky-plotu

Určení polohy družice v místním topocentrickém systému

$$\vec{\rho}_D^{TOP} = R_Y(\varphi - 90^\circ) R_Z(\lambda - 180^\circ) (\vec{\rho}_D^{WGS-84} - \vec{\rho}_P^{WGS-84}) = \begin{bmatrix} X_D^{TOP} \\ Y_D^{TOP} \\ Z_D^{TOP} \end{bmatrix} \quad (3.01)$$

kde: index D znamená družici
index P znamená pozorovatele
index TOP znamená topocentrický systém
index $WGS-84$ znamená systém $WGS-84$
 φ a λ jsou zeměpisné souřadnice stanoviště pozorovatele (počátek topocentrického systému)

Určení stanoviště pozorovatele v systému $WGS-84$ (vektor $\vec{\rho}_P^{WGS-84}$)

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ Z &= (N(1 - e^2) + h) \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (3.02)$$

kde: h je elipsoidická (nadmořská) výška bodu
 φ a λ jsou zeměpisné souřadnice bodu
 a je hlavní poloosa elipsoidu
 e^2 je první excentricita elipsoidu

$$N \text{ je příčný poloměr křivosti elipsoidu určený podle vzorce } N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (3.03)$$

Azimut

$$a = \arctg \frac{Y}{X} \quad (3.04)$$

Zenitová vzdálenost

$$z = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (3.05)$$

Východ a západ družice je možné určit podle z -ové souřadnice v topocentrickém systému například metodou půlení intervalu mezi její známou kladnou a zápornou hodnotou.

4) Elevační úhel a radiální rychlost družice

Elevační úhel družice

Elevační úhel je pouze jiný výraz pro úhel výškový, takže platí vztah

$$\varepsilon + z = 90^\circ \quad (4.01)$$

kde: ε je elevační úhel
 z je zenitová vzdálenost

Radiální rychlost družice

Jde o rychlost, jakou se mění vzdálenost mezi pozorovatelem a družicí a platí vztah

$$\dot{\rho}_{PD} = \frac{\vec{\rho}_{PD} \cdot \dot{\vec{\rho}}_D - \vec{\rho}_{PD} \cdot \dot{\vec{\rho}}_P}{\rho_{PD}} \quad (4.02)$$

kde: $\vec{\rho}_{PD}$ je vektor mezi pozorovatelem a družicí
 ρ_{PD} je vzdálenost mezi pozorovatelem a družicí
 $\dot{\vec{\rho}}_D$ je vektor rychlosti družice
 $\dot{\vec{\rho}}_P$ je vektor rychlosti pozorovatele

Jsou-li souřadnice pozorovatele dány v neinerciálním systému rotujícím se Zemí, je vektor rychlosti pozorovatele nulový ($\dot{\vec{\rho}}_P = 0$) a vektor rychlosti družice je dán vztahem (1.12).

Přehled výsledků

Část 3.1 – poloha družice v čase t_1 a t_2

čas t_1

PRN = 27

$t_1 = 40060$ sec (11:07:40.0)

čas $t_0 = 57600$ sec (16:00:00.0)

oprava hodin v čase $t_0 = 0.000013732434$ sec

střední anomálie $M = -3.58056885863$ rad (-205°09'05.34188")

excentrická anomálie $E = -3.57469607313$ rad (-204°48'53.99292")

pravá anomálie $v = 2.71432522670$ rad (+155°31'09.76698")

argument šířky $u = -0.05847143472$ rad (-003°21'00.59915")

délka průvodiče $r = 26896288.653242$ m

argument perigea $\omega = -2.77279666150$ rad (-158°52'10.36615")

sklon roviny dráhy $i = 0.94150467037$ rad (+053°56'39.27841")

délka výstupného uzlu $l = -15.61642533540$ rad (-894°45'18.94608")

poloha ve WGS-84

$X = -26822473.7514$ m

$Y = -1533165.8388$ m

$Z = -1270687.8779$ m

čas t_2

PRN = 27

$t_2 = 42852$ sec (11:54:12.0)

čas $t_0 = 57600$ sec (16:00:00.0)

oprava hodin v čase $t_0 = 0.000013732434$ sec

střední anomálie $M = -3.58056885863$ rad (-205°09'05.34188")

excentrická anomálie $E = -3.57469607313$ rad (-204°48'53.99292")

pravá anomálie $v = 2.71432522670$ rad (+155°31'09.76698")

argument šířky $u = -0.05847143472$ rad (-003°21'00.59915")

délka průvodiče $r = 26896288.653242$ m

argument perigea $\omega = -2.77279666150$ rad (-158°52'10.36615")

sklon roviny dráhy $i = 0.94150467037$ rad (+053°56'39.14595")

délka výstupného uzlu $l = -15.61642533540$ rad (-906°25'18.29997")

poloha ve WGS-84

$X = -25835278.9599$ m

$Y = -2380997.6205$ m

$Z = 7218967.8959$ m

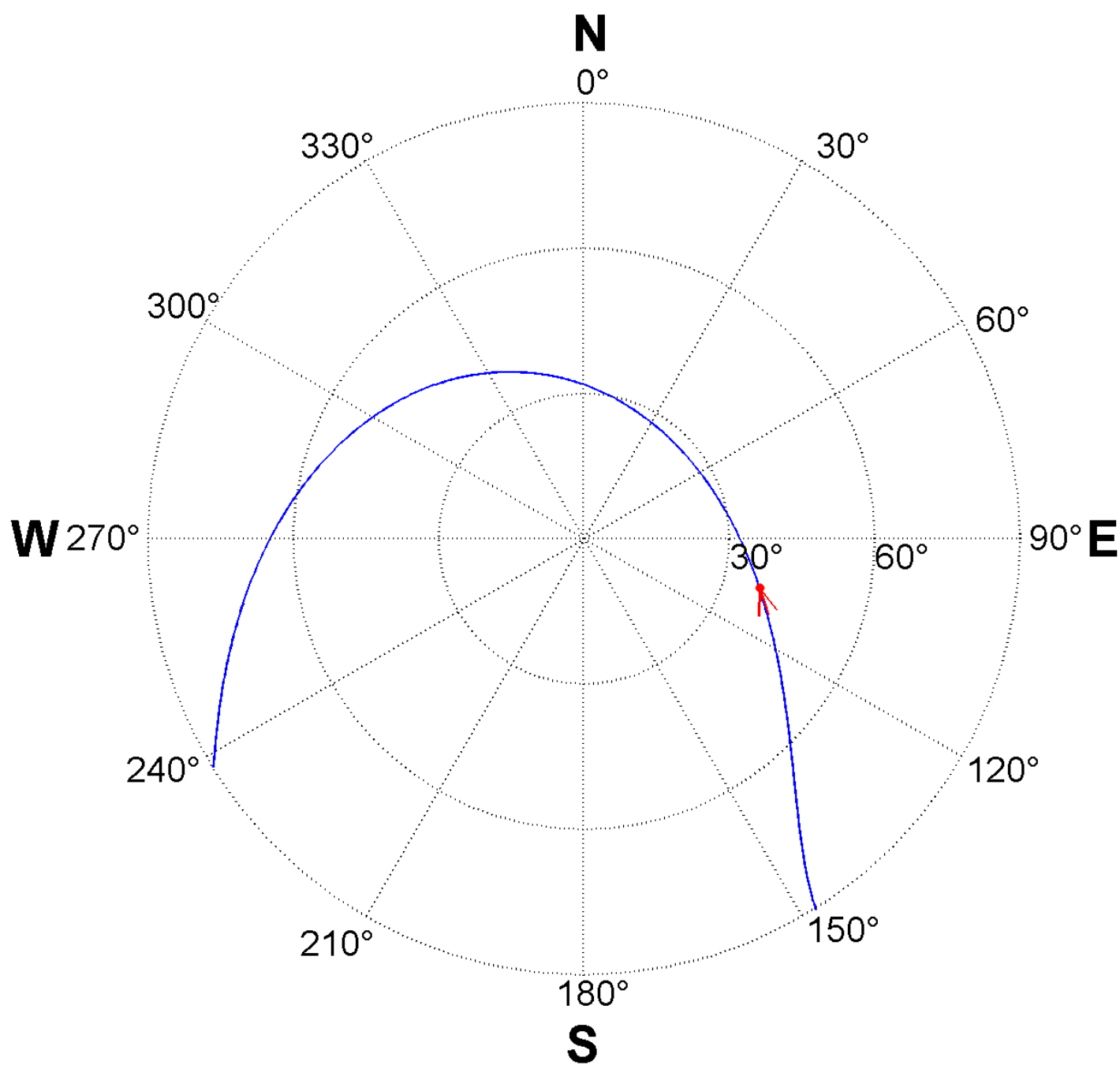
Část 3.2 – poloha družice vůči pozorovateli v místním topocentrickém systému v průběhu dne 21.3.2000

čas [sec]	X [m]	Y [m]	Z [m]	azimut [°]	zenit [°]
0 (00:00:00)	-3563914.539	12694049.355	17105272.110	105°40'56.4"	37°37'31.0"
900 (00:15:00)	-1075768.427	11823196.195	17793915.767	95°11'56.1"	33°42'39.9"
1800 (00:30:00)	1325744.514	10724995.512	18280241.368	82°57'11.8"	30°35'24.2"
2700 (00:45:00)	3588231.799	9397088.823	18579687.311	69°06'03.2"	28°25'50.5"
3600 (01:00:00)	5661780.117	7844947.484	18709935.585	54°10'53.8"	27°20'34.3"
4500 (01:15:00)	7500127.492	6081881.880	18689870.782	39°02'19.4"	27°19'23.5"
5400 (01:30:00)	9061790.748	4128774.802	18538544.112	24°29'42.6"	28°14'33.5"
6300 (01:45:00)	10311120.102	2013543.804	18274183.152	11°02'58.6"	29°53'41.0"
7200 (02:00:00)	11219252.300	-229654.235	17913286.645	358°49'38.4"	32°03'52.9"
8100 (02:15:00)	11764933.920	-2561454.650	17469841.026	347°43'02.2"	34°34'31.2"
9000 (02:30:00)	11935187.416	-4938522.488	16954691.486	337°31'16.6"	37°18'04.3"
9900 (02:45:00)	11725794.286	-7314957.774	16375095.227	328°02'33.5"	40°09'50.2"
10800 (03:00:00)	11141572.620	-9643822.775	15734478.171	319°07'17.3"	43°07'20.6"
11700 (03:15:00)	10196430.326	-11878738.918	15032408.749	310°38'31.3"	46°09'42.6"
12600 (03:30:00)	8913180.537	-13975495.752	14264793.736	302°31'42.9"	49°17'07.8"
13500 (03:45:00)	7323112.280	-15893610.770	13424291.565	294°44'17.8"	52°30'26.7"
14400 (04:00:00)	5465317.108	-17597777.609	12500928.538	287°15'11.4"	55°50'48.5"
15300 (04:15:00)	3385781.087	-19059141.371	11482893.215	280°04'23.8"	59°19'24.9"
16200 (04:30:00)	1136260.808	-20256343.968	10357474.635	273°12'38.1"	62°57'17.6"
17100 (04:45:00)	-1227028.378	-21176289.627	9112101.356	266°41'01.6"	66°45'09.9"
18000 (05:00:00)	-3644874.601	-21814590.957	7735431.392	260°30'51.8"	70°43'21.7"
18900 (05:15:00)	-6056636.724	-22175669.034	6218438.356	254°43'26.0"	74°51'47.6"
19800 (05:30:00)	-8401864.682	-22272496.257	4555437.200	249°19'55.2"	79°09'58.9"
20700 (05:45:00)	-10621916.802	-22125987.459	2744994.025	244°21'21.4"	83°37'06.4"
21600 (06:00:00)	-12661516.521	-21764061.994	790668.763	239°48'38.7"	88°12'05.1"
22500 (06:15:00)	-14470192.518	-21220416.080	-1298453.097	235°42'35.8"	92°53'38.6"
23400 (06:30:00)	-16003550.985	-20533059.449	-3507473.467	232°04'01.2"	97°40'24.0"
24300 (06:45:00)	-17224336.248	-19742682.325	-5815660.919	228°53'49.9"	102°30'54.1"
25200 (07:00:00)	-18103245.930	-18890926.994	-8196704.397	226°13'11.1"	107°23'39.7"
26100 (07:15:00)	-18619478.428	-18018642.335	-10619235.733	224°03'37.7"	112°17'09.2"
27000 (07:30:00)	-18761003.023	-17164199.297	-13047602.000	222°27'18.0"	117°09'47.6"
27900 (07:45:00)	-18524555.451	-16361940.768	-15442856.720	221°27'10.0"	121°59'52.1"
28800 (08:00:00)	-17915373.499	-15640830.919	-17763928.981	221°07'20.1"	126°45'27.1"
29700 (08:15:00)	-16946697.421	-15023357.741	-19968921.969	221°33'25.9"	131°24'14.4"
30600 (08:30:00)	-15639068.180	-14524729.026	-22016487.617	222°53'03.4"	135°53'20.8"
31500 (08:45:00)	-14019462.414	-14152387.362	-23867222.058	225°16'13.2"	140°09'00.0"
32400 (09:00:00)	-12120306.453	-13905854.803	-25485027.110	228°55'28.8"	144°06'08.2"
33300 (09:15:00)	-9978412.813	-13776903.539	-26838385.937	234°05'05.0"	147°37'56.3"
34200 (09:30:00)	-7633881.553	-13750035.785	-27901505.857	240°57'41.1"	150°35'30.0"
35100 (09:45:00)	-5129006.022	-13803244.722	-28655287.567	249°36'57.4"	152°48'08.3"
36000 (10:00:00)	-2507218.302	-13909018.968	-29088087.472	259°46'54.1"	154°05'09.7"
36900 (10:15:00)	187895.640	-14035545.904	-29196247.766	270°46'01.1"	154°19'22.6"
37800 (10:30:00)	2913486.925	-14148064.148	-28984377.258	281°38'10.2"	153°30'35.0"
38700 (10:45:00)	5628222.850	-14210312.580	-28465374.155	291°36'24.6"	151°46'00.1"
39600 (11:00:00)	8292942.214	-14186022.298	-27660190.054	300°18'35.8"	149°17'11.8"
40500 (11:15:00)	10871180.861	-14040398.563	-26597341.961	307°44'59.5"	146°16'18.6"
41400 (11:30:00)	13329566.850	-13741541.954	-25312186.178	314°07'41.3"	142°53'55.2"
42300 (11:45:00)	15638089.522	-13261761.335	-23845974.333	319°42'02.3"	139°18'32.5"
43200 (12:00:00)	17770250.960	-12578735.699	-22244717.579	324°42'25.5"	135°36'56.6"
44100 (12:15:00)	19703111.848	-11676487.238	-20557890.072	329°20'53.2"	131°54'40.4"
45000 (12:30:00)	21417246.524	-10546134.043	-18837007.239	333°47'01.5"	128°16'30.9"
45900 (12:45:00)	22896624.096	-9186397.465	-17134118.040	338°08'19.5"	124°46'49.6"
46800 (13:00:00)	24128433.805	-7603846.324	-15500253.394	342°30'29.7"	121°29'45.1"

47700 (13:15:00)	25102873.414	-5812867.735	-13983875.151	346°57'44.2"	118°29'19.7"
48600 (13:30:00)	25812919.318	-3835362.289	-12629371.305	351°32'55.1"	115°49'29.2"
49500 (13:45:00)	26254096.216	-1700169.543	-11475643.628	356°17'41.3"	113°33'58.1"
50400 (14:00:00)	26424262.708	557761.778	-10554833.218	1°12'33.2"	111°46'09.2"
51300 (14:15:00)	26323427.026	2898435.987	-9891227.681	6°17'00.4"	110°28'50.4"
52200 (14:30:00)	25953604.322	5278073.774	-9500390.525	11°29'42.9"	109°44'00.4"
53100 (14:45:00)	25318723.656	7650537.368	-9388548.707	16°48'47.5"	109°32'34.8"
54000 (15:00:00)	24424589.012	9968870.791	-9552268.146	22°12'10.0"	109°54'18.0"
54900 (15:15:00)	23278894.616	12186902.035	-9978439.129	27°37'58.2"	110°47'40.3"
55800 (15:30:00)	21891290.525	14260848.916	-10644584.166	33°04'54.5"	112°10'01.6"
56700 (15:45:00)	20273490.257	16150867.127	-11519489.891	38°32'33.2"	113°57'40.5"
57600 (16:00:00)	18439408.230	17822477.984	-12564152.502	44°01'31.1"	116°06'06.0"
58500 (16:15:00)	16405311.351	19247815.032	-13733013.325	49°33'30.1"	118°30'08.6"
59400 (16:30:00)	14189966.383	20406633.200	-14975447.995	55°11'12.4"	121°04'09.1"
60300 (16:45:00)	11814763.065	21287031.932	-16237460.126	60°58'07.6"	123°42'04.2"
61200 (17:00:00)	9303792.434	21885854.310	-17463519.181	66°58'09.8"	126°17'28.5"
62100 (17:15:00)	6683860.681	22208737.686	-18598473.167	73°15'01.8"	128°43'35.3"
63000 (17:30:00)	3984420.983	22269806.795	-19589460.835	79°51'22.3"	130°53'20.5"
63900 (17:45:00)	1237409.247	22091017.268	-20387745.710	86°47'38.3"	132°39'32.8"
64800 (18:00:00)	-1523025.814	21701174.622	-20950396.118	94°00'52.3"	133°55'16.4"
65700 (18:15:00)	-4260902.522	21134670.206	-21241741.363	101°23'54.4"	134°34'26.8"
66600 (18:30:00)	-6938894.449	20429990.013	-21234544.315	108°45'34.8"	134°32'33.9"
67500 (18:45:00)	-9518919.649	19628063.763	-20910844.072	115°52'18.3"	133°47'18.3"
68400 (19:00:00)	-11962818.030	18770529.365	-20262438.467	122°30'36.5"	132°18'44.3"
69300 (19:15:00)	-14233099.124	17897991.316	-19290993.634	128°29'34.5"	130°09'03.7"
70200 (19:30:00)	-16293738.650	17048350.662	-18007785.672	133°42'12.5"	127°21'56.5"
71100 (19:45:00)	-18110999.466	16255278.987	-16433096.337	138°05'27.1"	124°01'46.2"
72000 (20:00:00)	-19654250.952	15546900.099	-14595299.684	141°39'19.1"	120°13'02.2"
72900 (20:15:00)	-20896760.532	14944731.364	-12529688.847	144°25'43.7"	115°59'56.3"
73800 (20:30:00)	-21816431.778	14462922.931	-10277101.183	146°27'29.2"	111°26'11.2"
74700 (20:45:00)	-22396465.278	14107818.334	-7882405.506	147°47'33.5"	106°34'59.3"
75600 (21:00:00)	-22625920.929	13877845.099	-5392917.229	148°28'36.1"	101°29'05.5"
76500 (21:15:00)	-22500163.407	13763729.738	-2856806.052	148°32'42.6"	96°10'53.9"
77400 (21:30:00)	-22021176.031	13749018.688	-321556.963	148°01'16.4"	90°42'34.7"
78300 (21:45:00)	-21197731.870	13810875.564	2167460.904	146°54'52.9"	85°06'12.2"
79200 (22:00:00)	-20045414.743	13921116.116	4568270.810	145°13'15.0"	79°23'52.2"
80100 (22:15:00)	-18586486.392	14047435.343	6843372.612	142°55'06.5"	73°37'50.4"
81000 (22:30:00)	-16849599.712	14154776.578	8960606.398	139°58'03.1"	67°50'40.0"
81900 (22:45:00)	-14869361.292	14206789.678	10893777.103	136°18'19.4"	62°05'20.7"
82800 (23:00:00)	-12685749.718	14167324.688	12623031.101	131°50'31.2"	56°25'28.4"
83700 (23:15:00)	-10343399.044	14001908.283	14134984.839	126°27'13.6"	50°55'26.6"
84600 (23:30:00)	-7890759.623	13679152.592	15422613.852	119°58'41.9"	45°40'40.0"
85500 (23:45:00)	-5379151.042	13172049.580	16484918.056	112°12'50.2"	40°47'50.5"
86400 (24:00:00)	-2861724.335	12459108.729	17326385.734	102°56'09.1"	36°25'12.7"

první západ družice = 21947.21 sec (06:05:47.2) pod azimutem 238°10'31.21"
první východ družice = 77515.01 sec (21:31:55.0) pod azimutem 147°54'44.06"

Sky-plot – grafické znázornění polohy družice PRN 27 v průběhu dne 21.3.2000 vůči pozorovateli na místě o souřadnicích $\varphi = 28^\circ$ sš, $\lambda = 35^\circ$ vd a $H = 793$ m

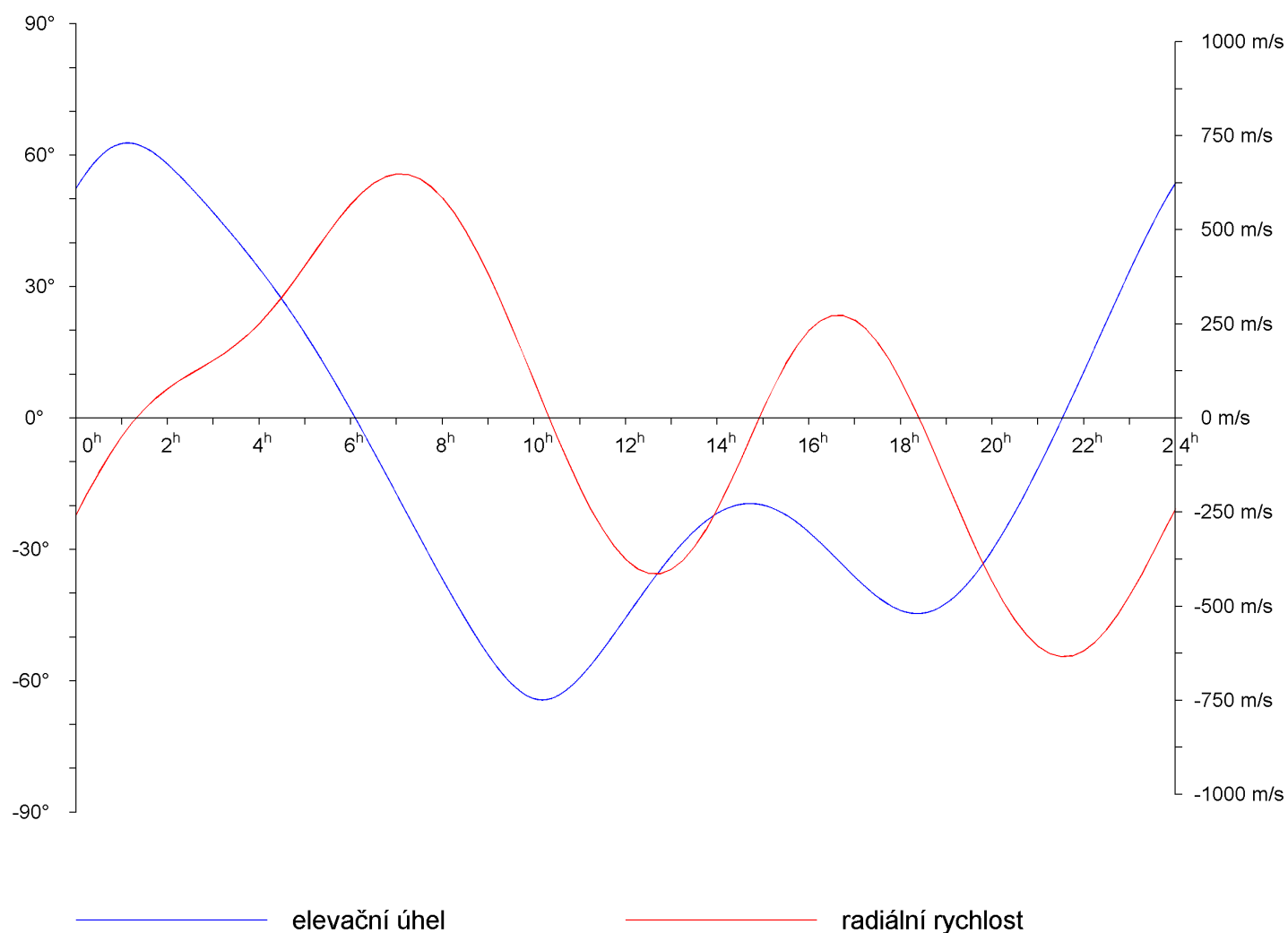


Část 3.3 – elevační úhel a radiální rychlost družice PRN 27 v průběhu dne 21.3.2000

čas [sec]	elevační úhel [°]	radiální rychlost [m/s]
0 (00:00:00)	52°22'29.0"	-258.201
900 (00:15:00)	56°17'20.1"	-200.230
1800 (00:30:00)	59°24'35.8"	-145.356
2700 (00:45:00)	61°34'09.5"	-94.838
3600 (01:00:00)	62°39'25.7"	-49.531
4500 (01:15:00)	62°40'36.5"	-9.857
5400 (01:30:00)	61°45'26.5"	24.197
6300 (01:45:00)	60°06'19.0"	53.041
7200 (02:00:00)	57°56'07.1"	77.430
8100 (02:15:00)	55°25'28.8"	98.380
9000 (02:30:00)	52°41'55.7"	117.092
9900 (02:45:00)	49°50'09.8"	134.860
10800 (03:00:00)	46°52'39.4"	152.978
11700 (03:15:00)	43°50'17.4"	172.658
12600 (03:30:00)	40°42'52.2"	194.940
13500 (03:45:00)	37°29'33.3"	220.623
14400 (04:00:00)	34°09'11.5"	250.194
15300 (04:15:00)	30°40'35.1"	283.784
16200 (04:30:00)	27°02'42.4"	321.141
17100 (04:45:00)	23°14'50.1"	361.629
18000 (05:00:00)	19°16'38.3"	404.262
18900 (05:15:00)	15°08'12.4"	447.758
19800 (05:30:00)	10°50'01.1"	490.623
20700 (05:45:00)	6°22'53.6"	531.246
21600 (06:00:00)	1°47'54.9"	568.004
22500 (06:15:00)	-2°53'38.6"	599.357
23400 (06:30:00)	-7°40'24.0"	623.932
24300 (06:45:00)	-12°30'54.1"	640.588
25200 (07:00:00)	-17°23'39.7"	648.452
26100 (07:15:00)	-22°17'09.2"	646.948
27000 (07:30:00)	-27°09'47.6"	635.789
27900 (07:45:00)	-31°59'52.1"	614.973
28800 (08:00:00)	-36°45'27.1"	584.757
29700 (08:15:00)	-41°24'14.4"	545.630
30600 (08:30:00)	-45°53'20.8"	498.285
31500 (08:45:00)	-50°09'00.0"	443.587
32400 (09:00:00)	-54°06'08.2"	382.543
33300 (09:15:00)	-57°37'56.3"	316.281
34200 (09:30:00)	-60°35'30.0"	246.024
35100 (09:45:00)	-62°48'08.3"	173.067
36000 (10:00:00)	-64°05'09.7"	98.765
36900 (10:15:00)	-64°19'22.6"	24.511
37800 (10:30:00)	-63°30'35.0"	-48.275
38700 (10:45:00)	-61°46'00.1"	-118.164
39600 (11:00:00)	-59°17'11.8"	-183.730
40500 (11:15:00)	-56°16'18.6"	-243.572
41400 (11:30:00)	-52°53'55.2"	-296.332
42300 (11:45:00)	-49°18'32.5"	-340.722
43200 (12:00:00)	-45°36'56.6"	-375.561
44100 (12:15:00)	-41°54'40.4"	-399.812
45000 (12:30:00)	-38°16'30.9"	-412.631
45900 (12:45:00)	-34°46'49.6"	-413.430

46800 (13:00:00)	-31°29'45.1"	-401.936
47700 (13:15:00)	-28°29'19.7"	-378.255
48600 (13:30:00)	-25°49'29.2"	-342.938
49500 (13:45:00)	-23°33'58.1"	-297.016
50400 (14:00:00)	-21°46'09.2"	-242.018
51300 (14:15:00)	-20°28'50.4"	-179.952
52200 (14:30:00)	-19°44'00.4"	-113.233
53100 (14:45:00)	-19°32'34.8"	-44.575
54000 (15:00:00)	-19°54'18.0"	23.160
54900 (15:15:00)	-20°47'40.3"	87.132
55800 (15:30:00)	-22°10'01.6"	144.694
56700 (15:45:00)	-23°57'40.5"	193.534
57600 (16:00:00)	-26°06'06.0"	231.797
58500 (16:15:00)	-28°30'08.6"	258.142
59400 (16:30:00)	-31°04'09.1"	271.771
60300 (16:45:00)	-33°42'04.2"	272.407
61200 (17:00:00)	-36°17'28.5"	260.255
62100 (17:15:00)	-38°43'35.3"	235.933
63000 (17:30:00)	-40°53'20.5"	200.407
63900 (17:45:00)	-42°39'32.8"	154.921
64800 (18:00:00)	-43°55'16.4"	100.924
65700 (18:15:00)	-44°34'26.8"	40.019
66600 (18:30:00)	-44°32'33.9"	-26.095
67500 (18:45:00)	-43°47'18.3"	-95.670
68400 (19:00:00)	-42°18'44.3"	-166.944
69300 (19:15:00)	-40°09'03.7"	-238.176
70200 (19:30:00)	-37°21'56.5"	-307.678
71100 (19:45:00)	-34°01'46.2"	-373.836
72000 (20:00:00)	-30°13'02.2"	-435.135
72900 (20:15:00)	-25°59'56.3"	-490.182
73800 (20:30:00)	-21°26'11.2"	-537.724
74700 (20:45:00)	-16°34'59.3"	-576.670
75600 (21:00:00)	-11°29'05.5"	-606.116
76500 (21:15:00)	-6°10'53.9"	-625.366
77400 (21:30:00)	0°42'34.7"	-633.959
78300 (21:45:00)	4°53'47.8"	-631.700
79200 (22:00:00)	10°36'07.8"	-618.685
80100 (22:15:00)	16°22'09.6"	-595.324
81000 (22:30:00)	22°09'20.0"	-562.359
81900 (22:45:00)	27°54'39.3"	-520.863
82800 (23:00:00)	33°34'31.6"	-472.223
83700 (23:15:00)	39°04'33.4"	-418.091
84600 (23:30:00)	44°19'20.0"	-360.314
85500 (23:45:00)	49°12'09.5"	-300.831
86400 (24:00:00)	53°34'47.3"	-241.560

Grafické vyjádření elevačního úhlu a radiální rychlosti družice PRN 27 v průběhu dne 21.3.2000



Závěr:

Veškeré výpočty byly provedeny v programu Matlab.

Exapolis, dne 3.12.2003

Zdeněk Nejedlý

Zdeněk Nejedlý