

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Kosmický segment . . . . .	1
1.2 Řídící segment . . . . .	2
1.3 Uživatelský segment . . . . .	2
<b>2 Družicový signál</b>	<b>2</b>
<b>3 Výpočet polohy přijímače z nediferencovaných kódových měření</b>	<b>3</b>
<b>4 Dilution of precision</b>	<b>6</b>
<b>5 Zpracování diferencovaných kódových měření</b>	<b>7</b>
5.1 Systematické chyby ovlivňující měření GPS . . . . .	7
5.2 Tvorbá diferencí . . . . .	8
<b>6 Stručný popis formátu RINEX</b>	<b>10</b>
<b>7 Stručný popis souboru přesných efemerid ve formátu SP3</b>	<b>11</b>

# Zpracování kódových měření systému GPS

## 1 Úvod

Systém GPS (Global Positioning System) umožňuje v libovolném okamžiku v libovolném místě na Zemi určit polohu přijímače a čas. Čtyři neznámé parametry – souřadnice přijímače ( $X, Y, Z$ ) a čas  $t$ , jsou určovány ze signálů vysílaných družicemi obíhajícími Zemi po známých oběžných drahách. V každý okamžik musí být přijímán signál minimálně ze 4 družic, aby bylo možno vyřešit všechny neznámé. Celý systém GPS se dělí na tři segmenty:

- kosmický
- kontrolní
- řídicí

### 1.1 Kosmický segment

V části popisující jednotlivé segmenty systému GPS se omezíme na základní zjednodušené informace, další podrobnosti lze nalézt v literatuře.

Kosmický segment tvoří 24 družic. Tři družice jsou rezervní, ale funkcí se od ostatních neliší. Družice se pohybují po 6 kruhových oběžných drahách se sklonem  $55^\circ$  k rovníku ve výšce přibližně 20200 km nad povrchem Země. Doba oběhu činí přibližně 12 hodin. Doposud byly na oběžnou dráhu vynášeny 3 typy družic - Block I, Block II, Block IIR. V současné době již není žádná z družic Block I funkční.

Družice jsou vybaveny urychlovačími raketovými motory, vysílačem, přijímačem, atomovými hodinami (přesným oscilátorem), procesory, slunečními panely, setrvačníky a řadou dalších přístrojů sloužících k navigačním i jiným vojenským účelům.

## 1.2 Řídící segment

Účelem řídicího segmentu je monitorování funkce družic, výpočet a predikce drah, výpočet oprav družicových hodin a jejich synchronizace a předávání těchto údajů družicím. Tento segment se skládá z jedné hlavní řídicí stanice, pěti monitorovacích a tří pozemních řídicích stanic zajišťujících komunikaci s družicemi. Monitorovací stanice jsou vybaveny především přijímači GPS signálu a přesnými atomovými hodinami. Z přijímaných signálů jsou určovány efemeridy a údaje o chodu družicových hodin.

Kromě tohoto řídicího segmentu aktivně ovlivňujícím chování GPS družic, existuje dále *International GPS Service for Geodynamics (IGS)*. Zpracovatelská centra IGS se zabývají zpracováním GPS dat a výpočtem přesných (*precise*) efemerid a parametrů rotace Země. Tyto výsledky jsou se zpožděním přístupné na internetu a používají se pro přesné výpočty v geodézii a geodynamice namísto vysílaných (*broadcast*) efemerid.

## 1.3 Uživatelský segment

Uživatelský segment tvoří všechny přijímače GPS. Dnes již existuje mnoho typů, které lze dělit podle několika hledisek.

- podle počtu přijímaných frekvencí
  - jednofrekvenční
  - dvoufrekvenční
- podle počtu kanálů
  - jednokanálové - všechny družice jsou přijímány na jednom kanálu
  - vícekanálové - pro každou družici je rezervován jeden kanál (modernější konstrukce)
- podle schopnosti využívat kódová měření
  - kódové - jsou schopny generovat PRN kódy a měřit pseudovzdálenost (viz dále)
  - bez kódu - jsou schopny pouze obnovit původní nosnou vlnu a měřit fázi přijímaného signálu

## 2 Družicový signál

Opět se omezíme pouze na stručný popis signálu vysílaného družicemi s odkazem na podrobnou literaturu.

Družice jsou vybaveny přesným oscilátorem. Nominální frekvence oscilátoru je  $f_0 = 10.23$  MHz. Družice vysílá signál na dvou nosných vlnách o frekvencích  $f_1, f_2$ , které jsou odvozeny od frekvence  $f_0$ . Nosné vlny jsou modulovány několika signály (kódy), pomocí kterých je přenášeno čtení hodin družice, informace o drahách družic a další údaje. Kód, který je přenášen signálem, se skládá ze dvou stavů – 0 nebo 1 a do nosné vlny je zanesen tak, že při změně stavu se fáze vysílaného signálu změní o  $180^\circ$ , tzv. *dvoufázová* modulace. Přehled všech složek signálu je uveden v následující tabulce.

Čtení hodin družice je přenášeno pomocí dvou kódů. Oba, jak ukazuje tabulka, jsou produkovány v závislosti na oscilátoru družice - sekvence stavů 0/1 je produkována hardwarovým zařízením, stav udává hodnota jednoho vybraného bitu v paměti palubního počítače. S frekvencí uvedenou v tabulce se mění (nemění) hodnota v daném bitu a tak je generována posloupnost stavů, kterou je následně modulována nosná vlna (s danou frekvencí jsou prováděny logické operace mezi několika bity počítače a výsledná hodnota je ukládána do vybraného bitu). Tato sekvence se nazývá pseudonáhodná PRN (*pseudo random noise*) a liší se pro každý satelit. Kódové přijímače umožňují generovat repliku kódu v závislosti na čtení vlastních hodin. Tuto repliku potom porovnávají s kódem získaným z přijímané vlny a určují časový

Složka	Frekvence (MHz)	
základní frekvence	$f_0$	= 10.23
frekvence nosné vlny L1	$154 \cdot f_0$	= 1575.42 ( $\lambda = 19.0$ cm)
frekvence nosné vlny L2	$120 \cdot f_0$	= 1227.60 ( $\lambda = 24.4$ cm)
P-kód	$f_0$	= 10.23
C/A-kód	$f_0/10$	= 1.023
Navigační zpráva	$f_0/204600$	= $50 \cdot 10^{-6}$

posun mezi nimi. V případě, že chod hodin družice i přijímače je bezchybný, časový posun odpovídá transitnímu času, po který signál překonával vzdálenost mezi družicí a přijímačem. Vynásobením transitního času rychlostí světla získáváme vzdálenost družice–přijímač. Tuto měřenou vzdálenost nazýváme *pseudovzdáleností*.

C/A kód je přenášen pouze na nosné vlně L1, zatímco P-kód je přenášen na obou vlnách. Jedné změně stavu C/A-kódu odpovídá 300 m ve vzdálenosti družice–přijímač, v případě P-kódu 30 m. Z tohoto faktu vyplývá, že přesnost měření pseudovzdálenosti pomocí P-kódu je desetkrát vyšší než přesnost dosažená použitím kódu C/A.

### 3 Výpočet polohy přijímače z nediferencovaných kódových měření

Výpočet polohy přijímače z kódových měření je klasickou aplikací systému GPS a jde o úlohu, která je řešena v každém jednoduchém přijímači sloužícím pro navigační účely. Vstupními daty jsou kódová měření z jednoho nebo více okamžiků a výstupem souřadnice přijímače. Princip výpočtů je popsán v následujících odstavcích.

Kódový přijímač je schopen měřit časový posun mezi okamžikem vyslání a okamžikem příjmu signálu, přesněji je schopen měřit rozdíl časů

$$\Delta t = t_R - t^S, \quad (1)$$

kde  $t_R$  je čtení hodin přijímače v okamžiku příjmu a  $t^S$  je čtení hodin družice v okamžiku vyslání signálu. Označíme

$$\delta_R(T_R) = t_R - T_R \quad (2)$$

$$\delta^S(T^S) = t^S - T^S \quad (3)$$

opravy hodin přijímače a družice v okamžiku příjmu a vyslání signálu. Symboly  $T_R$ ,  $T^S$  značí správný čas. Oprava hodin není konstantní a mění se v čase. Zatímco družicové hodiny jsou kvalitní a jejich chod lze případně vyjádřit polynomickou či jinou funkcí (koeficienty polynomu druhého stupně jsou uvedeny i ve vysílaných efemeridách), hodiny v přijímači kvalitní nejsou, chyba se napravidelně mění a je nutné ji počítat opravu samostatně pro každou epochu měření.

Dosazením vztahů (2), (3) do (1) a dalšími upravami získáváme

$$\Delta t = [T_R + \delta_R(T_R)] - [T^S + \delta^S(T^S)] = \Delta T + \delta_R(T_R) - \delta^S(T^S) \quad , \quad (4)$$

kde  $\Delta T$  je správný transitní čas.

Vynásobíme-li rovnici (4) rychlostí světla  $c$ , dostáváme vztah pro pseudovzdálenost mezi přijímačem  $R$  a družicí  $S$

$$R_R^S = c \cdot \Delta t = c \cdot \Delta T + c \cdot (\delta_R - \delta^S) = \varrho_R^S(T_R, T^S) + c\delta_R(T_R) - c\delta^S(T^S) \quad , \quad (5)$$

kde  $\varrho_R^S(T_R, T^S) = c \cdot \Delta T$  je skutečná vzdálenost mezi přijímačem v okamžiku příjmu signálu  $T_R$  a družicí v okamžiku vyslání signálu  $T^S$ . Veličina  $R_R^S$  se nazývá pseudovzdálenost, neboť je to vzdálenost, do které se promítají chyby hodin družice a přijímače.

Rovnici pro pseudovzdálenost přepíšeme dále do tvaru, ve kterém vystupují souřadnice přijímače. Získáme tak rovnici pozorování pro neznámé souřadnice a opravu hodin přijímače.

$$R_R^S = \sqrt{(X_R - X^S)^2 + (Y_R - Y^S)^2 + (Z_R - Z^S)^2} + c \cdot \delta_R(T_R) - c \cdot \delta^S(T^S). \quad (6)$$

Hodnoty veličin  $(X^S, Y^S, Z^S, \delta^S(T^S))$  získáme z vysílaných nebo přesných efemerid. V rovnici potom vystupují čtyři neznámé, souřadnice přijímače  $(X_i, Y_i, Z_i)$  a oprava hodin  $\delta_R(T_R)$ . Tedy i počet nutných měření je roven 4, pro určení polohy přijímače je nezbytné měřit pseudovzdálenosti minimálně ke 4 družicím.

Uvažujme nyní případ, kdy měření byla prováděna v několika epochách  $i = 1 \dots n$  a v jednotlivých epochách byla k dispozici data z  $m_i$  družic. Zaved' me následující značení:

$i$	... číslo epochy ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),
$T_i$	... čas $i$ -té epochy měření (správné čtení hodin přijímače v okamžiku příjmu signálu),
$t_i$	... čtení hodin přijímače v čase $T_i$ ,
$T_i^k$	... čas vyslání signálu z $k$ -té družice přijatého v okamžiku $T_i$ ( $k = 1, 2, \dots, m_i$ )
$t_i^k$	... čtení hodin družice v čase $T_i^k$ ,
$\delta_p(T_i)$	... chyba hodin přijímače $p$ v okamžiku příjmu signálu v okamžiku $T_i$ $\delta_p(T_i) = t_i - T_i$ ,
$\delta^k(T_i^k)$	... chyba hodin $k$ -té družice v okamžiku vyslání signálu v čase $T_i^k$ , $\delta^k(T_i^k) = t_i^k - T_i^k$ ,
$m_i$	... počet přijímaných satelitů v $i$ -té epoše,
$R_p^k(T_i)$	... měřená pseudovzdálenost mezi přijímačem $p$ a $k$ -tou družicí v čase $T_i$ ( $i$ -tá epocha),
$X_p, Y_p, Z_p$	... souřadnice přijímače (předpokládáme, že přijímač se nepohybuje a souřadnice jsou nezávislé na čase),
$X^k(T_i^k)$	... souřadnice $k$ -té družice v okamžiku vyslání signálu $T_i^k$ ,
$Y^k(T_i^k)$	
$Z^k(T_i^k)$	
$R_p^k(T_i)$	... měřená pseudovzdálenost mezi přijímačem $p$ a $k$ -tou družicí v okamžiku $T_i$ ,
$\varrho_p^k(T_i)$	... geometrická vzdálenost mezi přijímačem $p$ a $k$ -tou družicí v okamžiku $T_i$ .

K dispozici je tedy  $m_1 + m_2 + \dots + m_n$  měřených pseudovzdáleností. Neznámé jsou souřadnice přijímače  $X_p, Y_p, Z_p$  a opravy hodin  $\delta_p(T_1), \delta_p(T_2), \dots, \delta_p(T_n)$ . Celkem  $3 + n$  neznámých. V případě, že počet satelitů observovaných v jedné epoše je větší jak 4, je možné určovat hodnoty neznámých pomocí metody nejmenších čtverců.

S využitím zavedené symboliky má rovnice pozorování pro  $k$ -tou družici a  $i$ -tou epochu v čase  $T_i$  tvar

$$R_p^k(T_i) = \varrho_p^k(T_i) + c \cdot \delta_p(T_i) - c \cdot \delta^k(T_i^k) \quad (7)$$

$$R_p^k(T_i) = \sqrt{(X_p - X^k(T_i^k))^2 + (Y_p - Y^k(T_i^k))^2 + (Z_p - Z^k(T_i^k))^2} + c \cdot \delta_p(T_i) - c \cdot \delta^k(T_i^k) \quad (8)$$

a pro rovnici oprav můžeme potom psát

$$v_p^k = \varrho_{p0}^k + \frac{\partial \varrho}{\partial X} \Big|_{(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})} dX + \frac{\partial \varrho}{\partial Y} \Big|_{(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})} dY + \frac{\partial \varrho}{\partial Z} \Big|_{(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})} dZ + c \cdot \delta_p - R_p^k - c \cdot \delta^k \quad (9)$$

$$v_p^k = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{X_{p0}-X^k}{\varrho_{p0}^k} & \frac{Y_{p0}-Y^k}{\varrho_{p0}^k} & \frac{Z_{p0}-Z^k}{\varrho_{p0}^k} & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}_i^k} \underbrace{\begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ c\delta_p \end{pmatrix}}_{d\mathbf{X}} + \underbrace{(\varrho_{p0}^k - R_p^k - c \cdot \delta^k)}_{\mathbf{l}_i^k} \quad (10)$$

V posledních rovnicích je použita zjednodušená symbolika a předpokládáme, že hodnoty uvedených veličin se vztahují k epoše měření  $T_i$  respektive k okamžiku vyslání signálu z družice  $T_i^k$ .

Pozorný čtenář si jistě všiml, že neznámá oprava hodin přijímače  $\delta_p$  byla nahrazena  $c \cdot \delta_p$ , hodnotou vyjadřující přímo vliv chyby hodin na měřené pseudovzdálenosti. Tento krok byl učiněn, aby se zvýšila stabilita řešení. Řádek matice  $\mathbf{A}$  na místech parciálních derivací podle jednotlivých souřadnic obsahuje hodnoty z intervalu  $(-1; 1)$  a hodnotu 1 na místě derivace podle  $c \cdot \delta_p$ . V případě výpočtu  $\delta_p$  by se v řádku místo hodnoty 1 vyskytovala hodnota rovna rychlosti světla  $c$ , tedy hodnota o 9 řádů vyšší. Tato volba by posléze vedla k numerické nestabilitě normálních rovnic ( $\det(\mathbf{N}) \rightarrow 0$ ).

Rozepišme matici  $\mathbf{A}$  a vektor  $\mathbf{l}$  podrobně. Pro parciální derivace geometrické vzdálenosti  $\varrho$  v  $i$ -té epoše pro  $k$ -tou družici zavedeme následující substitute

$$\begin{aligned} a_p^k(T_i^k) &= \left. \frac{\partial \varrho_p^k(T_i)}{\partial X} \right|_{(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})} = \frac{X_{p0} - X^k(T_i^k)}{\varrho_{p0}^k(T_i)} \\ b_p^k(T_i^k) &= \left. \frac{\partial \varrho_p^k(T_i)}{\partial Y} \right|_{(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})} = \frac{Y_{p0} - Y^k(T_i^k)}{\varrho_{p0}^k(T_i)}, \\ c_p^k(T_i^k) &= \left. \frac{\partial \varrho_p^k(T_i)}{\partial Z} \right|_{(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})} = \frac{Z_{p0} - Z^k(T_i^k)}{\varrho_{p0}^k(T_i)} \end{aligned} \quad (11)$$

kde  $(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})$  jsou přibližné souřadnice přijímače a

$$\varrho_{p0}^k(T_i) = \sqrt{(X_{p0} - X^k(T_i^k))^2 + (Y_{p0} - Y^k(T_i^k))^2 + (Z_{p0} - Z^k(T_i^k))^2}$$

hodnota geometrické vzdálenosti spočtená z těchto souřadnic.

Potom matice  $\mathbf{A}$  má tvar

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_p^1(T_1^1) & b_p^1(T_1^1) & c_p^1(T_1^1) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_p^2(T_1^2) & b_p^2(T_1^2) & c_p^2(T_1^2) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_p^3(T_1^3) & b_p^3(T_1^3) & c_p^3(T_1^3) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_p^{m_1}(T_1^{m_1}) & b_p^{m_1}(T_1^{m_1}) & c_p^{m_1}(T_1^{m_1}) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \hline a_p^1(T_2^1) & b_p^1(T_2^1) & c_p^1(T_2^1) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ a_p^2(T_2^2) & b_p^2(T_2^2) & c_p^2(T_2^2) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ a_p^3(T_2^3) & b_p^3(T_2^3) & c_p^3(T_2^3) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_p^{m_2}(T_2^{m_2}) & b_p^{m_2}(T_2^{m_2}) & c_p^{m_2}(T_2^{m_2}) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline a_p^1(T_n^1) & b_p^1(T_n^1) & c_p^1(T_n^1) & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_p^2(T_n^2) & b_p^2(T_n^2) & c_p^2(T_n^2) & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_p^3(T_n^3) & b_p^3(T_n^3) & c_p^3(T_n^3) & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_p^{m_n}(T_n^{m_n}) & b_p^{m_n}(T_n^{m_n}) & c_p^{m_n}(T_n^{m_n}) & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

a vektor  $\mathbf{l}$

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} \varrho_{p0}^1(T_1) - R_p^1(T_1) - c \cdot \delta^1(T_1^1) \\ \varrho_{p0}^2(T_1) - R_p^2(T_1) - c \cdot \delta^2(T_1^2) \\ \vdots \\ \varrho_{p0}^{m_1}(T_1) - R_p^{m_1}(T_1) - c \cdot \delta^{m_1}(T_1^{m_1}) \\ \hline \varrho_{p0}^1(T_2) - R_p^1(T_2) - c \cdot \delta^1(T_2^1) \\ \varrho_{p0}^2(T_2) - R_p^2(T_2) - c \cdot \delta^2(T_2^2) \\ \vdots \\ \varrho_{p0}^{m_1}(T_2) - R_p^{m_1}(T_2) - c \cdot \delta^{m_1}(T_2^{m_1}) \\ \hline \vdots \\ \hline \varrho_{p0}^1(T_n) - R_p^1(T_n) - c \cdot \delta^1(T_n^1) \\ \varrho_{p0}^2(T_n) - R_p^2(T_n) - c \cdot \delta^2(T_n^2) \\ \vdots \\ \varrho_{p0}^{m_n}(T_n) - R_p^{m_n}(T_n) - c \cdot \delta^{m_n}(T_n^{m_n}) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Vektor neznámých, přesněji jejich přírůstků, má při této volbě matice  $\mathbf{A}$  tvar

$$\mathbf{dh} = (dX, dY, dZ, c\delta_p(T_1), c\delta_p(T_2), \dots, c\delta_p(T_n)) .$$

Následuje standardní vyrovnání metodou nejmenších čtverců.

V rovnicích se vyskytují souřadnice družice vždy v okamžiku vyslání signálu  $T_i^k$ . Pro určení okamžiku  $T_i^k$  vyjděme z jediného časového údaje, který je k dispozici, čtení hodin přijímače v okamžiku příjmu signálu  $t_i$ . Ze vztahů (3), (4), (5) plyne

$$R_i^k(T_i) = c \cdot \Delta t = c \cdot [t_i - t_i^k] = c \cdot [t_i - (T_i^k + \delta^k(T_i^k))] \quad (14)$$

a tedy

$$T_i^k = t_i - \frac{R_i^k(T_i)}{c} - \delta^k(T_i^k). \quad (15)$$

Chyba hodin družice závisí na čase  $T_i^k$  a proto je nutno řešit poslední rovnici iteračně. Avšak vzhledem k vysoké stabilitě hodin družice a malé hodnotě  $\delta^k$ , stačí do vzorce dosadit hodnotu  $\delta^k$  pro čas vyslání spočtený přibližně podle vzorce  $T_i^k = t_i - \frac{R_i^k(T_i)}{c}$  (tedy pouze jedna iterace). Vztah určující závislost velikosti opravy družicových hodin na čase je dán v přesných i vysílaných efemeridách. Pro výpočet lze použít pseudovzdálenost získanou jak na základě  $C/A$  tak  $P$ -kódu, přesnost je v obou případech dostatečná.

## 4 Dilution of precision

Přesnost určení polohy přijímače je kromě jiného závislá i na konfiguraci a počtu přijímaných družic. Proto byly zavedeny veličiny  $GDOP$  (*Geometric Dilution Of Precision*),  $PDOP$  (*Position DOP*),  $TDOP$  (*Time DOP*) definované pomocí diagonálních prvků matice  $\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  aktuální epochy:

$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}} \quad (16)$$

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}} \quad (17)$$

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}} \quad (18)$$

Hodnoty  $DOP$  jsou tedy bezrozměrná čísla, s rostoucí hodnotou klesá vhodnost konfigurace družic pro určení příslušných parametrů. Sledování velikosti  $DOP$  mělo význam především v době, kdy nebyl dostatečný počet družic a bylo nutno plánovat časy observací. Hodnoty  $DOP$  jsou zobrazovány na většině GPS přijímačů.

Je-li jako rovnice oprav použita rovnice (10), potom kovarianční matice  $\mathbf{Q}_{c\delta}$  obsahuje variance a kovariance příslušné nikoli  $\delta^i$ , ale  $c\delta^i$  a není možno přímo spočítat hodnoty  $DOP$ . Transformaci matice  $\mathbf{Q}_{c\delta}$  na matici  $\mathbf{Q}_\delta$  obsahující variance příslušné  $\delta^i$  provedeme pomocí následující úvahy.

Matici  $\mathbf{A}_\delta$ , jejíž poslední sloupec tvoří derivace podle  $\delta^i$  a jeho prvky nabývají hodnot rychlosti světla  $c$ , můžeme zapsat pomocí matice  $\mathbf{A}_{c\delta}$  složené z řádků z rovnice (10) takto

$$\mathbf{A}_\delta = \mathbf{A}_{c\delta} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & c \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{c\delta} \mathbf{B}. \quad (19)$$

Potom pro hledanou kovarianční matici  $\mathbf{Q}_\delta$  platí:

$$\mathbf{Q}_\delta = \left( \mathbf{A}_\delta^T \mathbf{A}_\delta \right)^{-1} = \left( \mathbf{B}^T \mathbf{A}_{c\delta}^T \mathbf{A}_{c\delta} \mathbf{B} \right)^{-1} \quad (20)$$

Vzhledem k tomu, že matice  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  jsou symetrické a zaměnitelné (tz.  $\mathbf{B}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{B}$ ) můžeme dále psát:

$$\mathbf{Q}_\delta = \mathbf{B}^{-1} \left( \mathbf{A}_{c\delta}^T \mathbf{A}_{c\delta} \right)^{-1} \mathbf{B}^{-1} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{Q}_{c\delta} \mathbf{B}^{-1}. \quad (21)$$

Pomocí tohoto vztahu tedy provedeme transformaci kovarianční matice  $\mathbf{Q}_{c\delta}$ . Výpočet matice  $\mathbf{B}^{-1}$  je triviální a platí  $\mathbf{B}^{-1} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1/c)$ .

## 5 Zpracování diferencovaných kódových měření

### 5.1 Systematické chyby ovlivňující měření GPS

Tento způsob zpracování dat GPS pomocí diferencovaných měření se také nazývá *relative positioning*, neboť je určována relativní poloha jednoho přijímače vůči druhému. Princip a výhody tohoto způsobu jsou objasněny dále.

Vztah (5) pro pseudovzdálenost rozšíříme o další členy, vyjadřující systematické chyby GPS. V rovnicích nebudeme uvádět z důvodu zjednodušení, pro které okamžiky uváděné veličiny uvažujeme. Obecně měřené pseudovzdálenosti jsou vztaženy k okamžiku příjmu signálu stejně jako oprava hodin přijímače, poloha družice a oprava družicových hodin k okamžiku vyslání signálu. Tedy pro měřenou pseudovzdálenost platí

$$R_R^S = \varrho_R^S + c\delta_R - c\delta^S + I_R^S + \Delta\varrho_R^S + \frac{\varrho_R^S}{\varrho_R^S} \cdot \mathbf{d}\mathbf{r}^S, \quad (22)$$

kde

- $I_R^S$  ... vliv ionosférické refrakce,
- $\Delta\varrho_R^S$  ... vliv troposférické refrakce,
- $\varrho_R^S, \varrho_R^S$  ... vektor přijímač–družice a jeho velikost (tj. geometrická vzdálenost),
- $\mathbf{d}\mathbf{r}^S$  ... chyba v poloze družice (lépe chyba znalosti polohy družice).

Rovnice (22) vyjadřuje několik zdrojů systematických chyb. Nosná vlna postupuje od družice k přijímači atmosférou, která ovlivňuje rychlost šíření vln a tím i transitní čas, měřené pseudovzdálenosti a fázové rozdíly. Atmosféru se z hlediska šíření signálů dělí na dvě části, ionosféru a troposféru. Každá část ovlivňuje signál GPS jiným způsobem.

Kromě toho dosazením souřadnic družice do vztahu pro geometrickou vzdálenost  $\rho$  je do rovnice pozorování zanesena další chyba. Tuto chybu nelze řadit mezi měřické, nicméně výsledné souřadnice ovlivňuje podobným způsobem.

Popíšme stručně jednotlivé chyby s tím, že podrobnější popis lze nalézt v literatuře.

Ionosféra je část atmosféry ve výšce 50 až 1000 km nad povrchem Země. Tato část atmosféry obsahuje volné elektrony a chová se jako *dispersní* médium. Tedy *refrakční index* (a tím i rychlost vlny) závisí na frekvenci signálu a na počtu volných elektronů v atmosféře. Správný tvar rovnice (22) je proto

$$R_{1R}^S = \rho_R^S + c\delta_R - c\delta^S + I_R^S + \Delta\rho_R^S + \frac{\rho_R^S}{\rho_R^S} \cdot \mathbf{dr}^S$$

$$R_{2R}^S = \rho_R^S + c\delta_R - c\delta^S + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_R^S + \Delta\rho_R^S + \frac{\rho_R^S}{\rho_R^S} \cdot \mathbf{dr}^S ,$$

kde  $R_{1R}^S, R_{2R}^S$  značí měřenou pseudovzdálenost na první a druhé frekvenci a  $\frac{f_1^2}{f_2^2} I_R^S$  vliv ionosféry na pseudovzdálenost na  $L2$ . Protože v dalším textu se budeme zabývat diferencovaným měřením, kde se vlivy atmosféry z velké části eliminují, budeme rovnice uvádět ve tvaru pro první nosnou vlnu. Navíc vliv ionosféry je možno vyloučit vhodnou kombinací měření na obou frekvencích.

Troposféra je nižší část atmosféry, která způsobuje stejnou chybu měření na obou nosných vlnách pro kódová i fázová měření. Její vliv se eliminuje diferencováním a nebo se vliv troposféry zavádí jako další neznámá.

Vysílané efemeridy obsahují predikované dráhy družic a souřadnice družice mají proto přesnost v řádu několika metrů. Skalární součin  $\frac{\rho_R^S}{\rho_R^S} \cdot \mathbf{dr}^S$  vyjadřuje vliv chyby v poloze družice na délku průvodiče přijímač–družice.

Kromě uvedených chyb ovlivňují měření GPS další vlivy, zde se jimi nebudeme zabývat, neboť přesahují rozsah tohoto pojednání.

Všechny systematické chyby ovlivňují měřenou pseudovzdálenost a tady i vypočtenou polohu přijímače. Důsledkem toho kvalita výsledných souřadnic spočtených z nediferencovaných měření GPS je mnohem nižší, než by odpovídalo vnitřní přesnosti, se kterou jsou prováděny observace.

V následujících odstavcích bude ukázáno, že diferencováním dat z dvojice přijímačů se vliv podstatně sníží.

## 5.2 Tvorba diferencí

Diference, jak již naznačuje název, jsou počítány jako rozdíl kódových i fázových měření GPS. Diference observací se počítají třemi způsoby jako

- rozdíl observací pořízených různými přijímači ve stejném okamžiku na shodnou družici,
- rozdíl observací pořízených jedním přijímačem v jenom okamžiku na dvě různé družice,
- rozdíl observací získaných jedním přijímačem na stejnou družici ve dvou různých okamžicích.

Některým z uvedených postupů jsou počítány tzv. *první (single) diference*. Z jednou diferencovaných měření lze spočítat jiným postupem *druhé (double) diference*. Tak je výrazně eliminován vliv většiny systematických chyb. Z dvojitě diferencovaných měření je možno tvořit *třetí diference* (mezi dvěma epochami), které se používají pro vyhledávání fázových skoků (týká se pouze zpracování fázových měření).



Uvedme nejčastěji používaný postup tvorby dvojitych diferencí kódových měření a jejich zpracování. První diference jsou tvořeny z měření mezi dvěma přijímači. Označme  $k, l$  dvě různé družice a  $i, j$  dva různé přijímače. Rovnice nediferencovaných pozorování pořízených dvěma přijímači na dvě společné družice jsou

$$\begin{aligned} R_i^k &= \varrho_i^k + c \cdot \delta_i - c \cdot \delta^k + I_i^k + \Delta\varrho_i^k + \frac{\varrho_i^k}{\varrho_i^k} \cdot \mathbf{dr}^k \\ R_j^k &= \varrho_j^k + c \cdot \delta_j - c \cdot \delta^k + I_j^k + \Delta\varrho_j^k + \frac{\varrho_j^k}{\varrho_j^k} \cdot \mathbf{dr}^k \\ R_i^l &= \varrho_i^l + c \cdot \delta_i - c \cdot \delta^l + I_i^l + \Delta\varrho_i^l + \frac{\varrho_i^l}{\varrho_i^l} \cdot \mathbf{dr}^l \\ R_j^l &= \varrho_j^l + c \cdot \delta_j - c \cdot \delta^l + I_j^l + \Delta\varrho_j^l + \frac{\varrho_j^l}{\varrho_j^l} \cdot \mathbf{dr}^l \end{aligned} \quad (23)$$

Jednoduché diference vzniknou odečtením první a druhé rovnice a dále třetí a čtvrté, tedy vždy rovnic pro stejnou družici a různý přijímač.

$$\begin{aligned} R_{ij}^k &= (\varrho_i^k - \varrho_j^k) + c \cdot (\delta_i - \delta_j) + (I_i^k - I_j^k) + (\Delta\varrho_i^k - \Delta\varrho_j^k) + \left(\frac{\varrho_i^k}{\varrho_i^k} - \frac{\varrho_j^k}{\varrho_j^k}\right) \cdot \mathbf{dr}^k \\ &= \varrho_{ij}^k + c \cdot \delta_{ij} + I_{ij}^k + \Delta\varrho_{ij}^k + \left(\frac{\varrho_i^k}{\varrho_i^k} - \frac{\varrho_j^k}{\varrho_j^k}\right) \cdot \mathbf{dr}^k \\ R_{ij}^l &= (\varrho_i^l - \varrho_j^l) + c \cdot (\delta_i - \delta_j) + (I_i^l - I_j^l) + (\Delta\varrho_i^l - \Delta\varrho_j^l) + \left(\frac{\varrho_i^l}{\varrho_i^l} - \frac{\varrho_j^l}{\varrho_j^l}\right) \cdot \mathbf{dr}^l \\ &= \varrho_{ij}^l + c \cdot \delta_{ij} + I_{ij}^l + \Delta\varrho_{ij}^l + \left(\frac{\varrho_i^l}{\varrho_i^l} - \frac{\varrho_j^l}{\varrho_j^l}\right) \cdot \mathbf{dr}^l \end{aligned} \quad (24)$$

Je patrné, že vliv chyby hodin družice v první diferenci je již plně eliminován. Navíc vzhledem k tomu, že délka základny je malá v porovnání se vzdáleností přijímač–družice, jednotkové vektory ležící mezi družicí a přijímačem  $i$  respektive  $j$  jsou si takřka rovny a vliv chyby v poloze družice na jednu diferencovanou měření se také podstatnou měrou eliminuje. V literatuře je uváděn přibližný vztah pro přesnost výpočtu délky základny v závislosti na přesnosti, se kterou jsou známy plohy družic

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{dr}{r},$$

kde  $\Delta l$  je chyba v délce základny  $l$  a  $dr$  je chyba v poloze družice o délce topocentrického průvodiče  $r$ . Délka topocentrického průvodiče je pro družice GPS rovna přibližně 20 000 km. Tedy chyba v poloze družice rovna 5 m (přesnost vysílaných efemerid) způsobí pro délku základny 20 km chybu velikosti 5 milimetrů. Přitom při zpracování nediferencovaných měření se chyba v poloze družice na výsledných souřadnicích přijímače projeví celou hodnotou.

Při velmi krátkých základnách (5–10 km) se značně potlačí i vlivy atmosféry. Nosná vlna postupuje k oběma přijímačům stejnou částí atmosféry a měření jsou ovlivněna stejnou měrou, tedy  $I_i^k \doteq I_j^k$ ,  $I_i^l \doteq I_j^l$  a  $\varrho_i^k \doteq \varrho_j^k$ ,  $\varrho_i^l \doteq \varrho_j^l$ . Členy popisující vliv refrakce vymizí. Pro delší základny se parametry popisující stav atmosféry zavádějí jako další neznámá do vyrovnání.

Druhé diference vzniknou dalším odečtením prvních diferencí.

$$R_{ij}^{kl} = \varrho_{ij}^{kl} + I_{ij}^{kl} + \Delta\varrho_{ij}^{kl} \quad (25)$$

V druhých diferencích se eliminoval i vliv hodin přijímače a pro krátké základny lze s odkazem na předcházející odstavec psát

$$R_{ij}^{kl} = \varrho_{ij}^{kl} = (\varrho_i^k - \varrho_j^k) - (\varrho_i^l - \varrho_j^l). \quad (26)$$

V rovnici pozorování pro dvojitou diferenci (26) vystupují na pravé straně známé souřadnice družic a neznámé souřadnic obou přijímačů. Tedy může se zdát, bude-li k dispozici více 6 a více dvojitych diferencí, má úloha řešení. Avšak tato úloha je v této podobě takřka singulární. Použijeme-li pro parciální

derivace pseudovzdáleností značení zavedené v (11), bude mít řádek matice **A** oprav pro dvojitě diferencované měření tvar

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{ij}^{kl} &= \left( a_i^k - a_i^l; \quad b_i^k - b_i^l; \quad c_i^k - c_i^l; \quad -a_j^k + a_j^l; \quad -b_j^k + b_j^l; \quad -c_j^k + c_j^l \right) \\ &= \left( a_i^{kl} \quad b_i^{kl} \quad c_i^{kl} \quad -a_j^{kl} \quad -b_j^{kl} \quad -c_j^{kl} \right), \end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned} a_i^{kl} &= \frac{X_{i0} - X^k}{\varrho_{i0}^k} - \frac{X_{i0} - X^l}{\varrho_{i0}^l} \\ a_j^{kl} &= \frac{X_{j0} - X^k}{\varrho_{j0}^k} - \frac{X_{j0} - X^l}{\varrho_{j0}^l}. \end{aligned}$$

Podobně i pro derivace podle ostatních souřadnic.

Vzhledem k malé délce základny (a tedy malému rozdílu  $X_{i0} - X_{j0}$ ) vzhledem ke geometrické vzdálenosti k družici  $\varrho_j^k, \varrho_j^l$  jsou si parciální derivace  $a_i^{kl}$  a  $-a_j^{kl}$  prakticky rovny až na znaménko. Stejně tak i pro ostatní členy. Sloupce matice **A** jsou potom lineárně závislé a soustava rovnic je singulární. Proto je nutno počítat pouze souřadnice jednoho přijímače, zatímco souřadnice druhého jsou fixovány na zvolených apriorních souřadnicích. Úloha se tak redukuje na výpočet souřadnic vektoru mezi oběma stanicemi, přičemž vliv většiny systematických chyb je podstatnou měrou eliminován. Počet neznámých souřadnic je 3, stejně jako počet nutných měření (dvojitých diferencí). To koresponduje s nutným počtem měření pro nediferencovaná data - ze 4 měřených pseudovzdáleností měřených oběma přijímači, lze vytvořit právě 3 nezávislé dvojitě diference.

## 6 Stručný popis formátu RINEX

Ve formátu RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) jsou uchovávána, kromě jiného, data z GPS přijímačů. Formát RINEX byl vyvinut, aby bylo možno ukládat a následně zpracovávat data z různých typů přijímačů a různými software. Soubory v tomto formátu jsou ASCII, maximalní délka řádku je 80 znaků. Soubor je striktně formátovaný, záleží tedy na poloze na znaku řádce. Soubor lze rozdělit na dvě základní části - hlavičku a vlastní tělo s daty. V hlavičce jsou zapsány obecné údaje o obsahu souboru a končí řádkem END OF HEADER. Následuje tělo souboru. Zde je uveden příklad takového souboru včetně stručného popisu.

```

0          1          2          3          4          5          6          7          8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

1:          2          OBSERVATION DATA      GPS          RINEX VERSION / TYPE
2: GEOTRACER GPS Decoder Ver. 2.2          24-Jun-1999, 00:25 PGM / RUN BY / DATE
3: WETTZELL-1202                                MARKER NAME
4: 14201M010                                MARKER NUMBER
5: Automatic          BKG-Wetzell          OBSERVER / AGENCY
6: 322          AOA SNR-8000 ACT          3.3.32.2 REC # / TYPE / VERS
7: 400          AOAD/M_T          ANT # / TYPE
8: 4075582.4460      931854.7645      4801569.1074      APPROX POSITION XYZ
9:          0.0715          -0.0000          0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
10:          1          1          0          WAVELENGTH FACT L1/2
11:          4          C1          P2          L1          L2          # / TYPES OF OBSERV
12:          30          INTERVAL
13: 1999          6          23          0          0          0.000000      TIME OF FIRST OBS
14: 1999          6          23          23          59          30.000000      TIME OF LAST OBS
15:          END OF HEADER

```

```

16: 99 6 23 0 0 0.0000000 0 8G02G05G07G08G09G21G23G26
17: 22958623.93508 22958626.34708 -10345175.45408 -8061147.78008
18: 23608576.68307 23608581.18207 -7429583.14707 -5789271.57007
19: 22031495.36209 22031497.48709 -16236161.67509 -12651537.78509
20: 23760251.41306 23760253.73506 -6312777.48306 -4919037.86906
21: 20740748.11509 20740749.59309 -22186198.31309 -17287920.97909
22: 24563613.24906 24563618.04706 -4804189.47206 -3743524.26506
23: 23116977.01607 23116979.83007 -13077053.39507 -10189898.15007
24: 20825415.58609 20825417.45709 -20610026.28609 -16059734.62909
25: 99 6 23 0 0 30.0000000 0 8G02G05G07G08G09G21G23G26
.
.
.

99 6 23 0 3 30.0000000 0 8G02G05G07G08G09G21G23G26
23061514.10408 23061516.74608 -9804485.61608 -7639831.45108
23472365.94407 23472369.60207 -8145372.58507 -6347028.69807
22003002.07309 22003004.36809 -16385893.53609 -12768211.77009
23627008.84906 23627012.99606 -7012963.68306 -5464636.66106
20679573.41609 20679574.66809 -22507673.97409 -17538421.38709
24491922.59806 24491926.83906 -5180923.51506 -4037082.98606
23132486.21408 23132488.88008 -12995551.70608 -10126390.14508
20899383.43209 20899385.48609 -20221320.98609 -15756847.47909

```

Řádky 1–15 jsou řádky hlavičky. Od 61. pozice na řádku je uveden popis údajů, které řádka obsahuje. Význam jednotlivých řádek lze intuitivně pochopit. Zde jde o soubor ze stanice WETTZELL-1202, jejíž unikátní označení je 14201M010. Stanice je vybavena přijímačem AOA SNR-8000 ACT a anténou AOAD/M.T. Přibližné souřadnice v systému WGS-84 jsou uvedeny na řádce APPROX POSITION XYZ. Důležitý je řádek s označením # / TYPES OF OBSERV, popisující kolik a jaké typy observací jsou v souboru ukládány. V tomto případě přijímač měřil – *C/A*-kód na nosné vlně L1 (C1), *P*-kód na nosné vlně L2 (P2) a prováděl fázová měření na obou frekvencích (L1, L2). V tomto pořadí jsou ukládána data v těle souboru.

Tělo souboru začíná řádkem 16. Na tomto řádku je uvedeno datum observace (26.3.1999) a čtení hodin přijímače v okamžiku příjmu signálu (*0h 0min 0.00s*). Čas je uváděn v systému GPS, k tomuto času jsou vztaženy i efemeridy družic. Dále na 29. pozici na řádku je celé číslo popisující stav. Stav 0 znamená, že následují měřená data. V pozicích 30–33 je uveden počet observovaných družic (zde 8) a hned následuje jejich označení písmenem a číslem. Označení G není povinné a značí, že jde o družici systému GPS (narozdíl od ruského systému GLONASS). V pořadí, v jakém jsou uvedena označení družic, jsou dále uváděny observace na jednotlivé družice. Řádky 17–24 obsahují vlastní měřená data. Řádka 17 přísluší družici s označením G02 a data jsou uložena v pořadí C1, P2, L1, L2, které odpovídá pořadí uvedeném v hlavičce. Data z observace na družici G05 jsou na řádce 18 atd. Hodnoty jsou uloženy ve sloupcích 1–14, 17–30, 33–46, 49–62, ... Pseudovzdálenosti jsou ukládány v metrech, fázová měření v cyklech. Na pozicích 15, 31, 47, ... jsou uloženy hodnoty LLI (*Loss of Lock Indicator*), které dále popisují observovaná data podobně jako hodnoty ve sloupcích 16, 32, 48, ... popisující sílu signálu.

## 7 Stručný popis souboru přesných efemerid ve formátu SP3

Ve formátu SP3 jsou ukládány přesné efemeridy družic, vypočtené zpracovatelskými centry IGS. V souboru jsou uloženy v pravidelných intervalech polohy družic a opravy družicových hodin. Souřadnice jsou v systému pevně spojeném se Zemí (ITRF96) a opravy hodin jsou vztaženy k atomovému času GPS.

```

0          1          2          3          4          5          6
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

1: #aP1999 6 23 0 0 0.00000000 96 ORBIT ITR96 HLM IGS
2: ## 1015 259200.00000000 900.00000000 51352 0.00000000000000
3: + 27 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 13 14 15 16 17 18 19
4: + 21 22 23 24 25 26 27 29 30 31 0 0 0 0 0 0 0
5: + 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6: + 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7: + 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
8: ++ 4 4 5 5 4 4 4 4 5 4 5 5 4 4 4 4 5
9: ++ 5 4 5 4 4 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0
10: ++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
11: ++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
12: ++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
13: %c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
14: %c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
15: %f 0.00000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000
16: %f 0.00000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000
17: %i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
18: %i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
19: /* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
20: /* cod emr esa gfz jpl ngs sio
21: /* REFERENCED TO GPS CLOCK AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
22: /* CLK ANT Z-OFFSET (M): II/IIA 1.023; IIR 0.000
23: * 1999 6 23 0 0 0.0000
24: P 1 -22328.077318 -14336.176641 -1443.033731 88.741041
25: P 2 685.577796 17149.392288 20660.801211 -75.911633
26: P 3 -23235.148702 -12632.227810 2291.932820 15.318736
.
.
.
P 30 17331.408852 -17315.250018 -10416.675640 -22.446820
P 31 -22506.277866 -2738.703541 13867.059112 20.681373
* 1999 6 23 0 15 0.0000
P 1 -22201.602196 -14565.351441 1405.111070 88.537826
P 2 -1278.456936 18206.887692 19629.723201 -75.943920
.
.
.

```

V tomto formátu hlavička souboru končí řádkou začínající hvězdičkou \* 1999 6 23 0 0 0.0000, kde začíná první epocha s polohami družic. V první řádce souboru je uveden datum a čas první epochy (23.6.1999 0h 0min 0.00s), počet epoch v souboru (96), název souřadného systému (ITR96) a další méně podstatné informace. Druhá řádka obsahuje informace týkající se první epochy obsažené v souboru. Nejprve číslo GPS týdne (1015), GPS sekundu první epochy (259200.00) (počítáno od půlnoci mezi sobotou a nedělí, což je také počátek nového GPS týdne), interval mezi epochami v sekundách (900), modifikované juliánské datum první epochy (51352) a zlomek dne (0.00000). Na řádcích začínajících znakem plus (+) jsou uvedeny PRN čísla družic a v řádcích začínajících dvěma znaky plus (++) jsou ve stejném pořadí uvedeny kódy, popisující přesnost učení dráhy jednotlivých družic. Řádky 13–18 jsou rezervovány pro budoucí modifikaci formátu. Řádky 19–22 jsou řádky komentáře.

Na řádce 23 začínají data první epochy. Je zde uveden datum a čas epochy v systému GPS a na následujících řádcích jsou uvedeny polohy ( $X^i, Y^i, Z^i$ ) a opravy hodin  $\delta^i$  jednotlivých družic. Souřadnice jsou uvedeny v kilometrech, opravy hodin v mikrosekundách.

## Reference

- [Hofmann-Wellenhof et al., 1992] Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, J. Collins: Global Positioning System, Theory and Practice, Springer-Verlag, Wien, New York, 1992
- [Mervart, 1994] Mervart, L.: Globální polohový systém, ČVUT, Praha, 1994
- [Mervart et al., 1997] Mervart, L., M. Cimbálník: Vyšší geodézie II, ČVUT, Praha, 1997
- [Rothacher, Mervart 96] Rothacher, M., Mervart, L., Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical University of Berne, Bern 1996
- [Teunissen et al., 98] Teunissen, J. G., Kleusberg, A., GPS for Geodesy, Springer-Verlag, Berlin 1998