

Навигационно-пилотажные приборы ПНК



Сроки

Время лекций: Четверг 15.40-17.15 (17.25 - 18.10)

Аудитория: 413ю

Лекция					
Пилотажно-навигационные Приборы ПНК	<i>Д.Т.Н. профессор Окоёмов Барит Николаевич</i>	01	10.02.2011	05	10.03.2011
		02	17.02.2011	06	17.03.2011
		03	24.03.2011	07	24.03.2011
		04	03.03.2011		
Глобальные спутниковые навигационные системы (ГСНС)/ Современные ПНК	<i>Братанов Дмитрий Александрович dm.bratanov@gmail.com</i>	л1	31.03.2011	л5	28.04.2011
		л2	07.04.2011	л6	12.05.2011
		л3	14.04.2011	л7	19.05.2011
		л4	21.04.2011	л8	26.05.2011
		дз	05.05.2011	Зачет	



Лекция 2. Типы погрешностей и методы их компенсации: линейные разности, модели погрешностей

1. RINEX Observation file
2. Navigational message
3. RINEX Navigation message



RINEX file

RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) 3.01 format

- 1. Observation data File
- 2. Navigation message File
- 3. Meteorological data File



Уравнения наблюдений

Уравнения наблюдений фазы (phase observation equation), включая ошибки часов, атмосферные задержки и ошибки измерений, для двух несущих частот:

$$L_{1r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + T_r^s - I_r^s + \lambda_1(N_{1A}^j - \alpha_1^j + \alpha_{1A}) + \varepsilon_{1r}^s$$

$$L_{2r}^s = \underbrace{\rho_r^s}_{\text{Geometric range}} + \underbrace{c\delta t_r - c\delta t^s}_{\text{Clock corections}} + \underbrace{T_r^s}_{\text{Tropo-sphere}} - \underbrace{\frac{f_1^2}{f_2^2} I_r^s}_{\text{iono-sphere}} + \lambda_2(N_{2A}^j - \alpha_2^j + \alpha_{2A}) + \varepsilon_{2r}^s$$

Уравнения наблюдений псевдорасстояний (pseudorange observation equation), включая ошибки часов, атмосферные задержки и ошибки измерений, для двух несущих частот:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + cb_{1r} - cb_1^s + T_r^s + I_r^s + E_{1r}^s$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + cb_{2r} - cb_2^s + T_r^s + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_r^s + E_{2r}^s$$

Примечательны: 1. разные знаки ионосферной компоненты (увеличение фазы, но запаздывание для псевдорасстояний)

2. Геометрия, коррекции часов и тропосферы одинаковы во всех уравнениях



RINEX Observation data File

Номера спутников

snn

**s: satellite system
identifier**

G : GPS
R : GLONASS
S : SBAS payload
E : Galileo
C : Compass

nn:

PRN (GPS, Galileo, Compass)
slot number (GLONASS)
PRN-100 (SBAS Geostationary)

SBAS: Satellite-Based Augmentation System



RINEX Observation data File

Обозначение файлов

ssssdddf.yyt

ssss

4-х значный
идентифика-
тор станции
(приемни-ка)

ddd

День
первой
записи
в году

f

daily file: f = 0 (zero)
hourly files:
a = 1st hour:00h-01h;
b = 2nd hour:01h-02h;
x = 24th hour:23h-24h

yy

two-
digit
year

t: file type

N: GPS navigation message
M: Meteorological data
G: GLONASS navigation message
L: Galileo navigation message
P: Mixed GNSS navigation message
H: SBAS Payload navigation message
B: SBAS broadcast data
(separate documentation)
C: Clock (separate documentation)
S: Summary (used e.g., by IGS, not a



RINEX Observation data File

RINEX Observation data File может содержать следующие

ТИПЫ ДАННЫХ:

- *C/A code* псевдорасстояния на первой частоте $C1$ в метрах
- *P code* псевдорасстояния на двух частотах $P1, P2$, в метрах
- *Измерения фазы на двух частотах, $L1, L2$, в циклах*
- *Доплеровские измерения на двух частотах, $D1, D2$*
- *Отношение шум-сигнал на двух частотах: $S1, S2$.*

Описание RINEX формата:

<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/>



RINEX Observation data File

Пример RINEX Observation File (header)

Markername	Format version	File type	Receiver, antenna	Header keywords
	2.10	OBSERVATION DATA	M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE
	BLANK OR G = GPS, R = GLONASS, T = TRANSIT, M = MIXED			COMMENT
	XXRINEXO V9.9	AIUB	24-MAR-01 14:43	PGM / RUN BY / DATE
	EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE			COMMENT
A 9080				MARKER NAME
9080.1.34				MARKER NUMBER
BILL SMITH		ABC INSTITUTE		OBSERVER / AGENCY
314175		TRIMBLE 4000SSI	F10.2	OBSERVER / AGENCY
234		TRM4800		REC # / TYPE / VERS
				ANT # / TYPE
	4375274.	587466.	4589095.	APPROX POSITION XYZ
	.9030	.0000	.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N
	1	1		WAVELENGTH FACT L1/2
	1	2	6	WAVELENGTH FACT L1/2
	0			RCV CLOCK OFFS APPL
	4	P1	L1	# / TYPES OF OBSERV
		L2	P2	INTERVAL
	18.000			TIME OF FIRST OBS
	2001	3	24	END OF HEADER
		13	10	
			36.0000000	
...				

Coarse marker position wrt marker (H/N/E) Observation types



RINEX Observation data File

Пример RINEX Observation File (data)

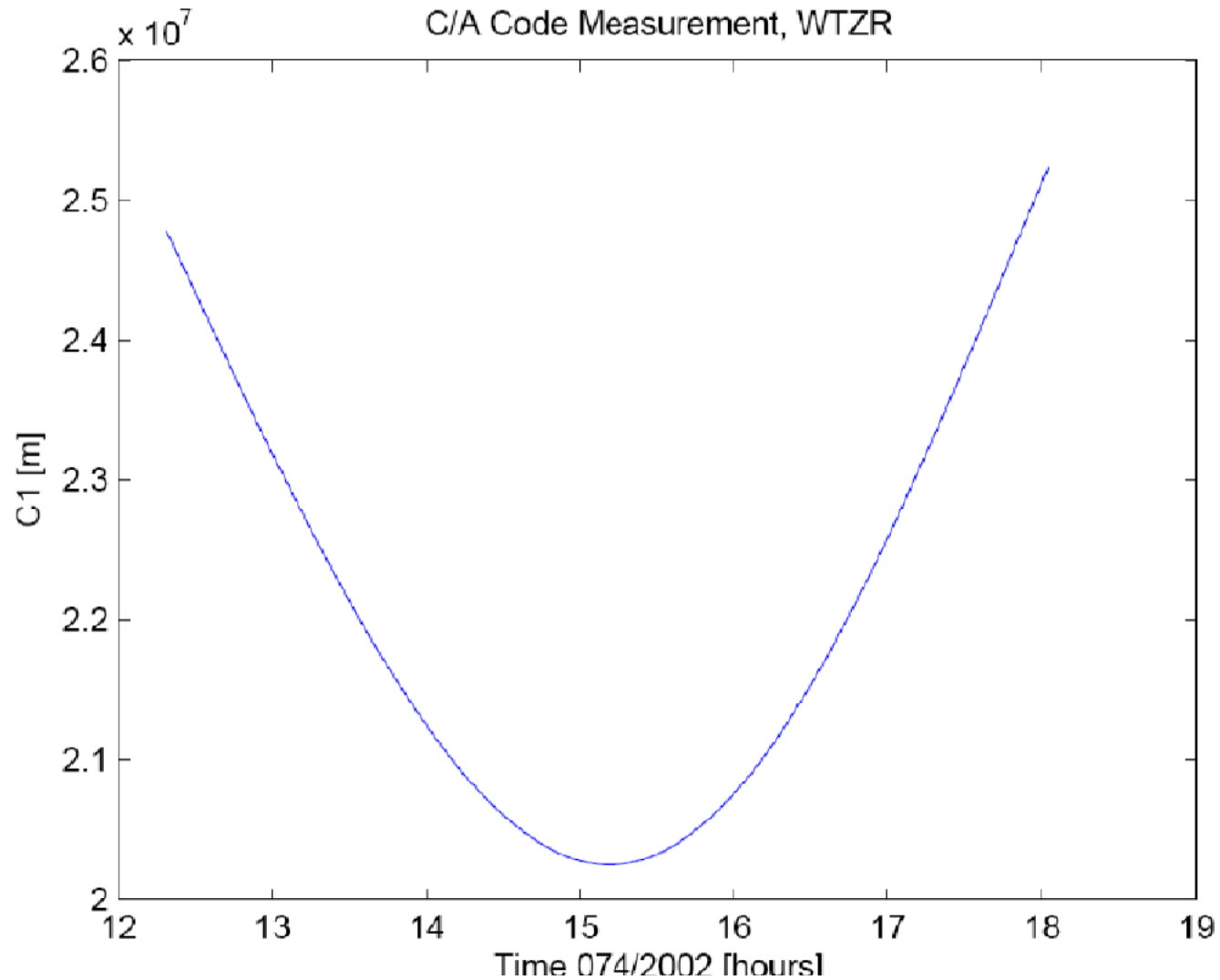
```

Observation epoch                               Satellites in this epoch
***
01  3 24 13 10 36.0000000  0  3G12G09G06      -.123456789
23629347.915      .300  8      -.353      23629364.158      G12
20891534.648     -.120  9      -.358      20891541.292      G09
20607600.189     -.430  9      .394      20607605.848      G06
01  3 24 13 10 54.0000000  0  5G12G09G06R21R22  -.123456789
23619095.450     -53875.632  8      -41981.375      23619112.008
20886075.667     -28688.027  9      -22354.535      20886082.101
20611072.689      18247.789  9      14219.770      20611078.410
21345678.576      12345.567  5
22123456.789      23456.789  5
01  3 24 13 11  0.0000000  2  1
*** FROM NOW ON KINEMATIC DATA! ***      COMMENT
01  3 24 13 11 48.0000000  0  4G16G12G09G06      -.123456789
21110991.756      16119.980  7      12560.510      21110998.441
23588424.398     -215050.557  6      -167571.734      23588439.570
20869878.790     -113803.187  8      -88677.926      20869884.938
20621643.727      73797.462  7      57505.177      20621649.276
3  4
A 9080      P1      L1      SNR      L2      P2      MARKER NAME
9080.1.34      .9030      .0000      .0000      MARKER NUMBER
--> THIS IS THE START OF A NEW SITE <--
01  3 24 13 12  6.0000000  0  4G16G12G06G09      -.123456987

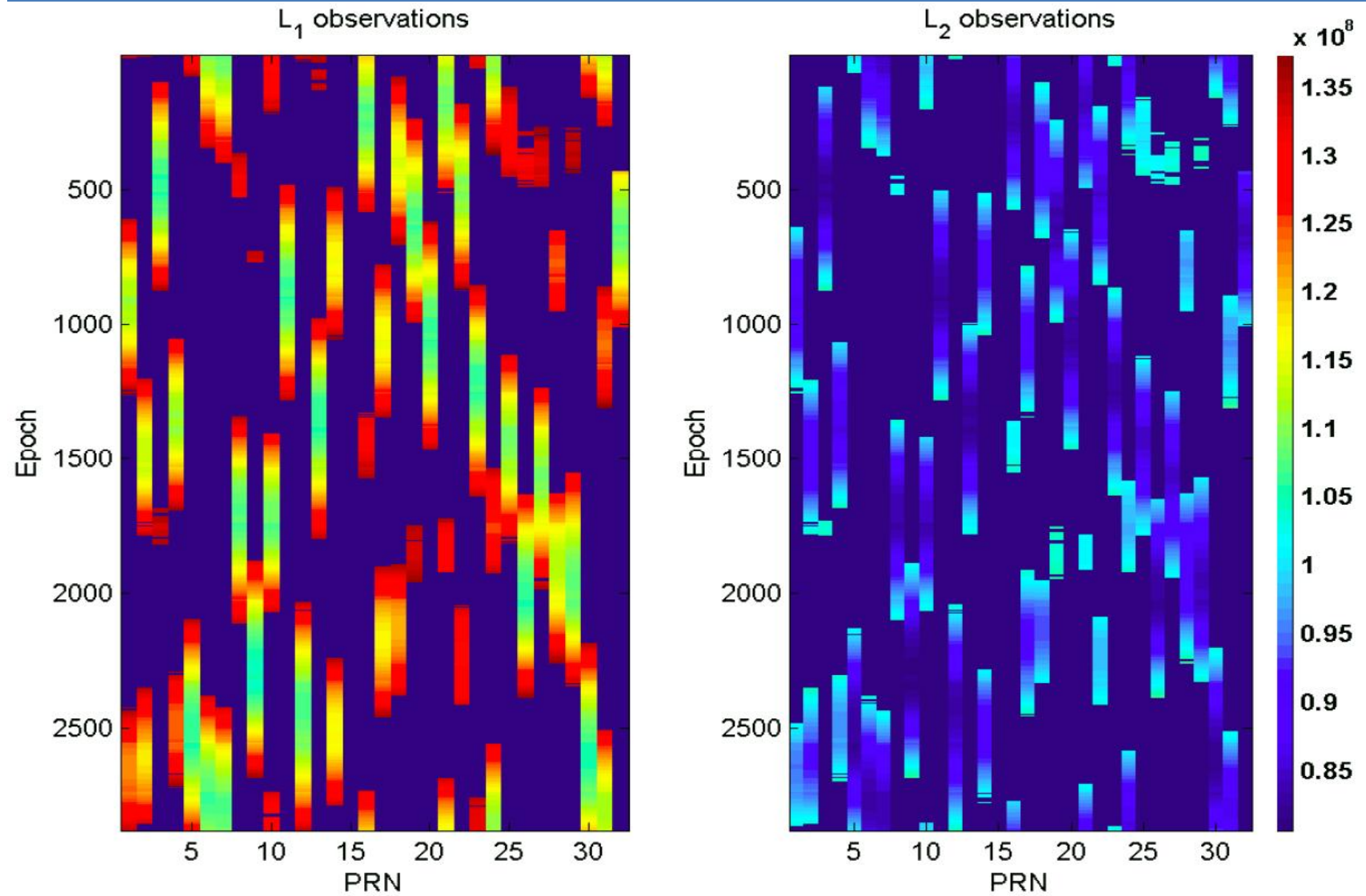
```



RINEX Observation File

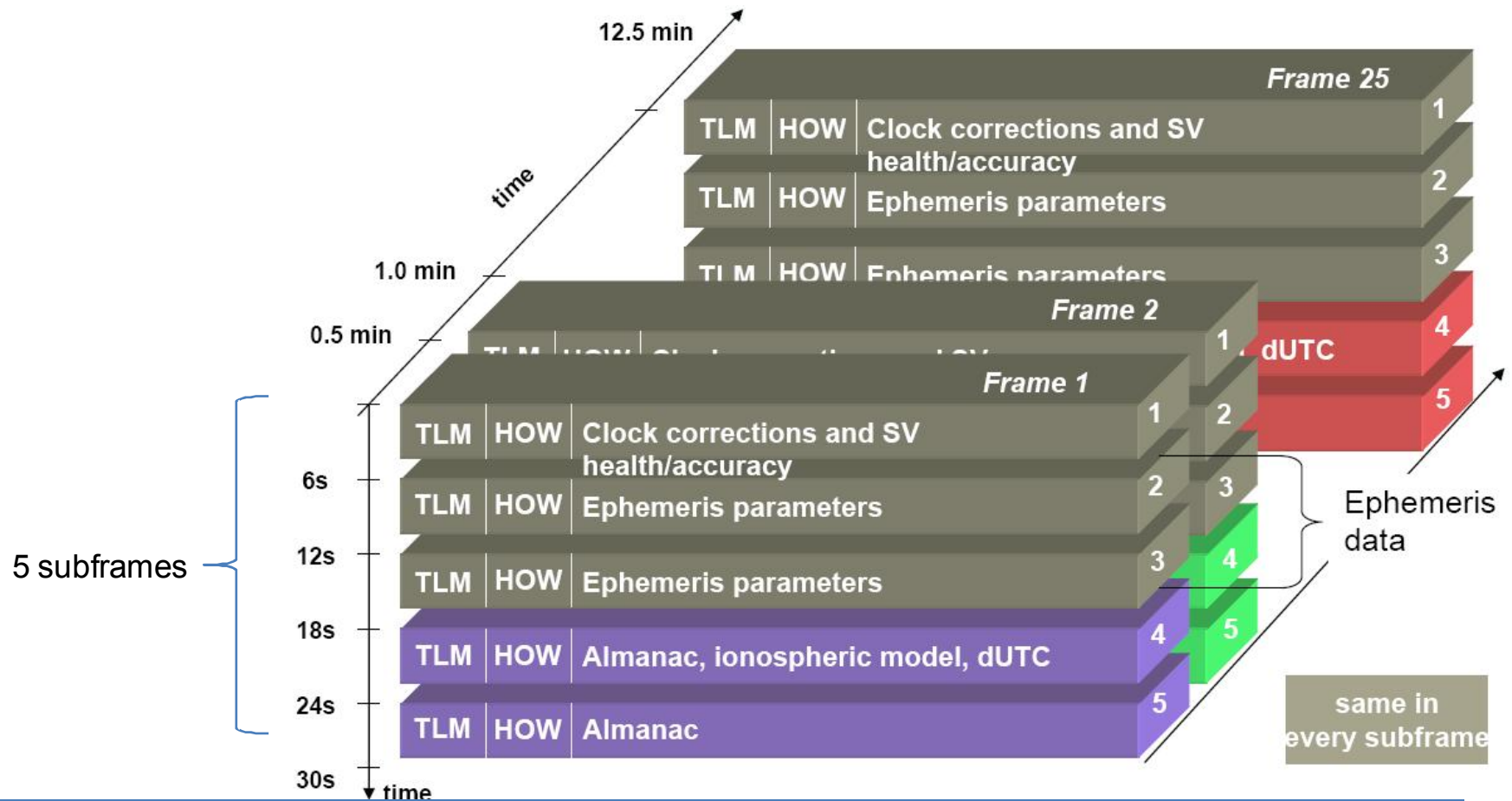


RINEX Observation File ZIMJ



Navigation Message

Навигационная сообщение = состоит 25 *frames* каждая размером 300 бит, разделенных на 5 *subframes* => всего 7500 бит. Информация о ошибках часов и орбитах передается каждые 30 сек. (скорость передачи 50 бит/с)



Navigation Message

TLM содержит телеметрическую информацию, которая доступна привилегированным пользователям.

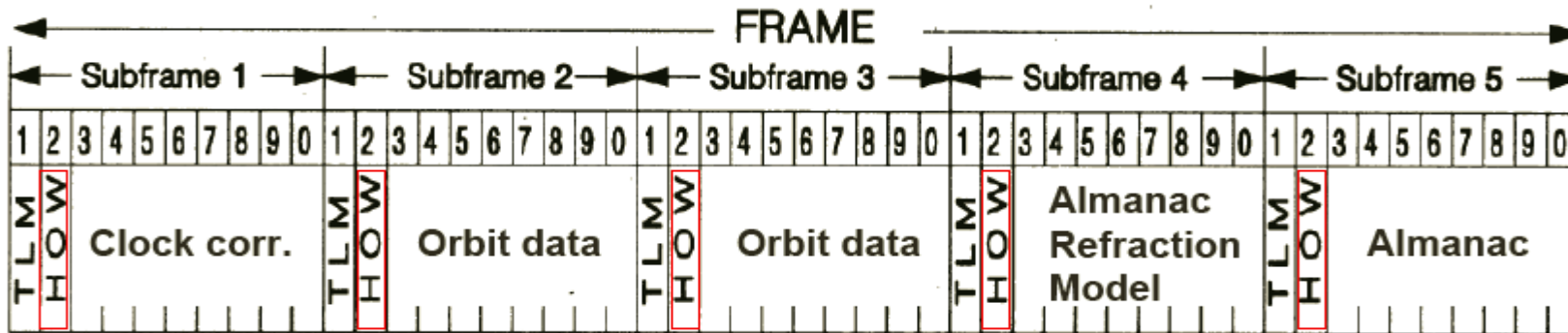
Hand-over-Word(HOW) заголовочное слово передается каждые 6 сек и содержит количество секунд, прошедших с начала GPS недели для текущей эпохи. HOW обеспечивает метку времени сигнала GPS.

Поскольку альманах (*almanac data*) орбит не вмещается в subframes 4 и 5, то эта информация передается в 25 frames с равными по структуре 1, 2, 3 subframes, но с разными 4 и 5 subframes.

Альманах содержит аппроксимацию орбит всех спутников, тогда как subframes 2 и 3 относятся только к передающему спутнику.

Время приема всей информации поэтому $30 \text{ с} \times 25 = 12,5 \text{ мин}$.

После этого времени приемник после холодного старта имеет весь альманах.



Navigation Message

Навигационное сообщение содержит следующую информацию

- *Satellite clock corrections(subframe 1)*: Коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 полинома второй степени относительно the reference epoch t_{oc} .
- *Health status(subframe 1)*: Информация о состоянии спутника и о точности broadcast information.
- *Broadcast ephemerids (subframes 2 and 3)*: Параметры орбиты и ее самые важные изменения (perturbations) для расчета положения спутника в связанной с Землей СК для любой эпохи.
- *Ionosphere model parameters(subframe 4)*: Информация о содержании электронов в ионосфере по простой модели *Klobuchar model*.
- *UT2, Antispoofing*: Разница между временем GPS и всеобщим скоординированным временем UTC (*Universal Time Coordinated*), AS-flag.
- *Almanac data (subframes 4 and 5)*: аппроксимация орбит всех спутников (точность нескольких километров)

Interface Control Document GPS-ICD 200C для большей информации
:<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/default.htm>



Navigation Message

M_0	Mean Anomaly at Reference Time
Δn	Mean Motion Difference From Computed Value
e	Eccentricity
$(A)^{1/2}$	Square Root of the Semi-Major Axis
$(\text{OMEGA})_0$	Longitude of Ascending Node of Orbit Plane at Weekly Epoch
i_0	Inclination Angle at Reference Time
ω	Argument of Perigee
OMEGADOT	Rate of Right Ascension
IDOT	Rate of Inclination Angle
C_{uc}	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Argument of Latitude
C_{us}	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Argument of Latitude
C_{rc}	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Orbit Radius
C_{rs}	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Orbit Radius
C_{ic}	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Angle of Inclination
C_{is}	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Angle of Inclination
t_{oe}	Reference Time Ephemeris (reference paragraph 20.3.4.5)
IODE	Issue of Data (Ephemeris)



Navigation Message

Table 20-IV. Elements of Coordinate Systems (sheet 1 of 3)

$\mu = 3.986005 \times 10^{14} \text{ meters}^3/\text{sec}^2$	WGS 84 value of the earth's universal gravitational parameter for GPS user
$\dot{\Omega}_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$	WGS 84 value of the earth's rotation rate
$A = (\sqrt{A})^2$	Semi-major axis
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}$	Computed mean motion (rad/sec)
$t_k = t - t_{oc}^*$	Time from ephemeris reference epoch
$n = n_0 + \Delta n$	Corrected mean motion
$M_k = M_0 + nt_k$	Mean anomaly
<p>* t is GPS system time at time of transmission, i.e., GPS time corrected for transit time (range/speed of light). Furthermore, t_k shall be the actual total time difference between the time t and the epoch time t_{oc}, and must account for beginning or end of week crossovers. That is, if t_k is greater than 302,400 seconds, subtract 604,800 seconds from t_k. If t_k is less than -302,400 seconds, add 604,800 seconds to t_k.</p>	



Navigation Message

Table 20-IV. Elements of Coordinate Systems (sheet 2 of 3)

$$M_k = E_k - e \sin E_k$$

Kepler's Equation for Eccentric Anomaly
(may be solved by iteration)(radians)

$$v_k = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin v_k}{\cos v_k} \right\}$$

True Anomaly

$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E_k / (1 - e \cos E_k)}{(\cos E_k - e) / (1 - e \cos E_k)} \right\}$$

$$E_k = \cos^{-1} \left\{ \frac{e + \cos v_k}{1 + e \cos v_k} \right\}$$

Eccentric Anomaly

$$\Phi_k = v_k + \omega$$

Argument of Latitude

$$\delta u_k = c_{u2} \sin 2\Phi_k + c_{u3} \cos 2\Phi_k$$

$$\delta r_k = c_{r1} \sin 2\Phi_k + c_{r2} \cos 2\Phi_k$$

$$\delta i_k = c_{i1} \sin 2\Phi_k + c_{i2} \cos 2\Phi_k$$

Argument of Latitude Correction

Radius Correction

Inclination Correction

} Second Harmonic Perturbations

$$u_k = \Phi_k + \delta u_k$$

Corrected Argument of Latitude

$$r_k = A(1 - e \cos E_k) + \delta r_k$$

Corrected Radius

$$i_k = i_0 + \delta i_k + (\text{IDOT}) t_k$$

Corrected Inclination



Navigation Message

Table 20-IV. Elements of Coordinate Systems (sheet 3 of 3)

$\left. \begin{aligned} x_k' &= r_k \cos u_k \\ y_k' &= r_k \sin u_k \end{aligned} \right\}$	Positions in orbital plane.
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{oe}$	Corrected longitude of ascending node.
$\left. \begin{aligned} x_k &= x_k' \cos \Omega_k - y_k' \cos i_k \sin \Omega_k \\ y_k &= x_k' \sin \Omega_k + y_k' \cos i_k \cos \Omega_k \\ z_k &= y_k' \sin i_k \end{aligned} \right\}$	Earth-fixed coordinates.



RINEX Navigation file

Пример Навигационное сообщения RINEX file

```
Navigation data
2.10 N: GPS NAV DATA RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXN V2.10 AIUB 3-SEP-99 15:22 PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF VERSION 2.10 FORMAT Ionosphere model parameters COMMENT
.1676D-07 .2235D-07 -.1192D-06 -.1192D-06 ION ALPHA
.1208D+06 .1310D+06 -.1310D+06 -.1966D+06 ION BETA
.133179128170D-06 .107469588780D-12 552960 1025 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
13 Leap seconds LEAP SECONDS
PRN Date, time (GPS time) END OF HEADER
6 99 9 2 17 51 44.0 -.839701388031D-03 -.165982783074D-10 .000000000000D+00
.910000000000D+02 .934062500000D+02 .116040547840D-08 .162092304801D+00
.484101474285D-05 .626740418375D-02 .652112066746D-05 .515365489006D+04
.409904000000D+06 -.242143869400D-07 .329237003460D+00 -.596046447754D-07
.111541663136D+01 .326593750000D+03 .206958726335D+01 -.638312302555D-08
.307155651409D-09 .000000000000D+00 .102500000000D+04 .000000000000D+00
.000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .910000000000D+02
.406800000000D+06
13 99 9 2 19 0 0.0 .490025617182D-03 .204636307899D-11 .000000000000D+00
.133000000000D+03 -.963125000000D+02 .146970407622D-08 .292961152146D+01
-.498816370964D-05 .200239347760D-02 .928156077862D-05 .515328476143D+04
.414000000000D+06 -.279396772385D-07 .243031939942D+01 -.558793544769D-07
.110192796930D+01 .271187500000D+03 -.232757915425D+01 -.619632953057D-08
-.785747015231D-11 .000000000000D+00 .102500000000D+04 .000000000000D+00
.000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .389000000000D+03
.410400000000D+06
...
```

Header

Data



RINEX Navigation file

Пример Навигационное сообщения RINEX file

```

Navigation data
2.10 N: GPS NAV DATA RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXN V2.10 AIUB 3-SEP-99 15:22 PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF VERSION 2.10 FORMAT Ionosphere model parameters COMMENT
.1676D-07 .2235D-07 -.1192D-06 -.1192D-06 ION ALPHA
.1208D+06 .1310D+06 -.1310D+06 -.1966D+06 ION BETA
.133179128170D-06 .107469588780D-12 552960 1025 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
13 Leap seconds LEAP SECONDS
PRN Date, time (GPS time) END OF HEADER
6 99 9 2 17 51 44.0 -.839701388031D-03 -.165982783074D-10 .000000000000D+00
.910000000000D+02 .934062500000D+02 .116040547840D-08 .162092304801D+00
.484101474285D-05 .626740418375D-02 .652112066746D-05 .515365489006D+04
.409904000000D+06 -.242143869400D-07 .329237003460D+00 -.596046447754D-07
.111541663136D+01 .326593750000D+03 .206958726335D+01 -.638312302555D-08
.307155651409D-09 .000000000000D+00 .102500000000D+04 .000000000000D+00
.000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .910000000000D+02
.406800000000D+06
prn toc a0 a1 a2
IODE Crs Delta n M0
Cuc e Cus sqrt(a)
toe Cic Omega0 Cis
i0 Crc omega Omega dot
i dot Codes on L2 Ch GPS week L2 P data flag
accuracy health TGD IODC
Transm. time
...

```



Уравнения наблюдений

Уравнения наблюдений фазы (phase observation equation), включая ошибки часов, атмосферные задержки и ошибки измерений, для двух несущих частот:

$$L_{1r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + T_r^s - I_r^s + \lambda_1(N_{1A}^j - \alpha_1^j + \alpha_{1A}) + \varepsilon_{1r}^s$$

$$L_{2r}^s = \underbrace{\rho_r^s}_{\text{Geometric range}} + \underbrace{c\delta t_r - c\delta t^s}_{\text{Clock corections}} + \underbrace{T_r^s}_{\text{Tropo-sphere}} - \underbrace{\frac{f_1^2}{f_2^2} I_r^s}_{\text{Iono-sphere}} + \lambda_2(N_{2A}^j - \alpha_2^j + \alpha_{2A}) + \varepsilon_{2r}^s$$

Уравнения наблюдений псевдорасстояний (pseudorange observation equation), включая ошибки часов, атмосферные задержки и ошибки измерений, для двух несущих частот:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + cb_{1r} - cb_1^s + T_r^s + I_r^s + E_{1r}^s$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s + cb_{2r} - cb_2^s + T_r^s + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_r^s + E_{2r}^s$$

Примечательны: 1. разные знаки ионосферной компоненты (увеличение фазы, но запаздывание для псевдорасстояний)

2. Геометрия, коррекции часов и тропосферы одинаковы во всех уравнениях



Разности и линейные комбинации

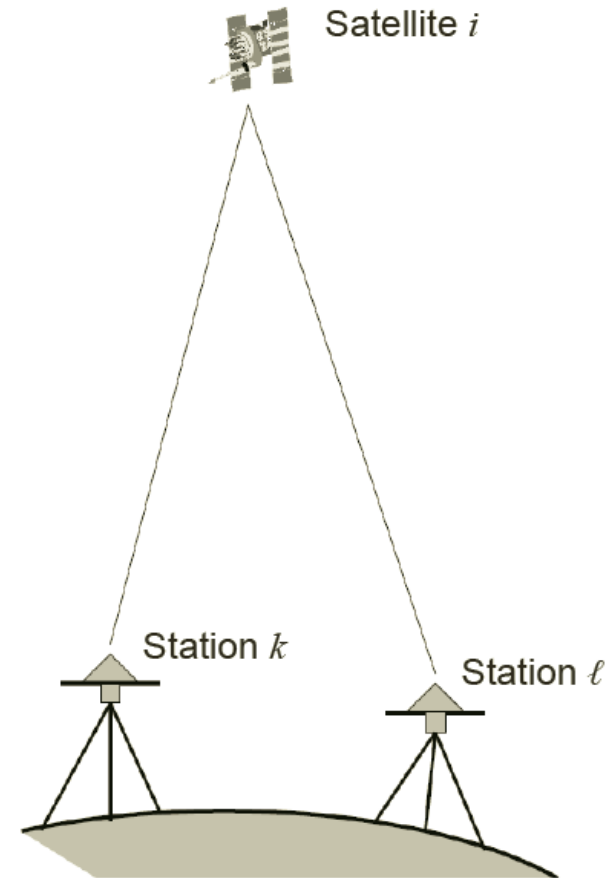
Формирование **разностей** между наблюдениями позволяет уменьшить или устранить некоторые ошибки

Единичные разности (**single differences**) получены путем вычитания измерений i -го спутника на двух концах базы (**baseline**), образованной приемниками k и l :

$$\begin{aligned}\Delta L_{kl}^i &= L_k^i - L_l^i \\ &= \rho_k^i - \rho_l^i + c\delta t_k - c\delta t_l + \\ &\quad + T_k^i - T_l^i - I_k^i + I_l^i + \\ &\quad + \lambda(N_k^i - N_l^i + \alpha_k - \alpha_l) + \varepsilon_k^i - \varepsilon_l^i\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta L_{kl}^i &= \Delta\rho_{kl}^i + c\Delta\delta t_{kl} + \Delta T_{kl}^i - \Delta I_{kl}^i + \\ &\quad + \lambda(\Delta N_{kl}^i + \Delta\alpha_{kl}) + \Delta\varepsilon_{kl}^i\end{aligned}$$

Формирование единичной разности полностью устраняет ошибки коррекции часов спутника



Единичные разности

The assumption is that the receiver measure at the same epoch. In fact, all GPS receivers on the globe measure *within 1 ms at the same time*.

- The satellite clock correction is *not eliminated perfectly*.
- The two reasons for this are that
 - the two receivers may not measure at exactly the same epoch, and
 - even if the receiver measure synchronously the light travel time from the satellite may be different.
- In case of SA the variations of the satellite clock may be some 300 ns (corresponding to 100 m) in some 5 minutes.
- If the receivers measure within 1 ms the effect of SA on short baselines is reduced to
- The effect of SA on long baselines is usually not considered. Since SA is permanently switched off modeling of the effect is no longer necessary.



Единичные разности

Единичная разность содержит только разности ошибок орбит, ионосферные и тропосферные коррекции.

Влияние этих ошибок практически полностью устраняется при малых базах, поскольку пути сигналов от спутника к двум приемникам проходят через близкие атмосферные области.

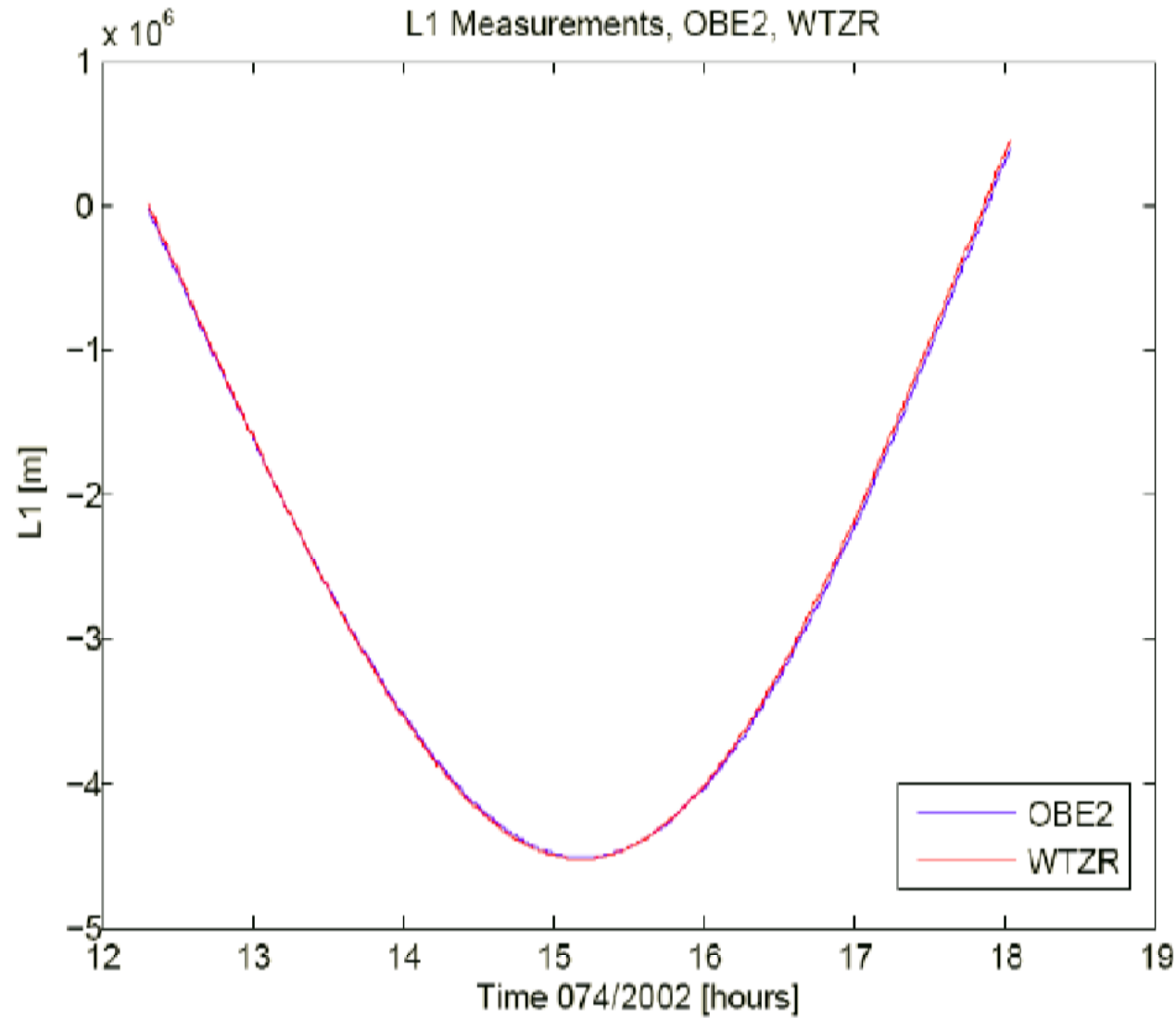
Не устраняются ошибки обусловленные геометрией антенны (напр. multipath эффект).

Шум единичных разностей измерений возрастает в $\sqrt{2}$ раза относительно оригинальных измерений.

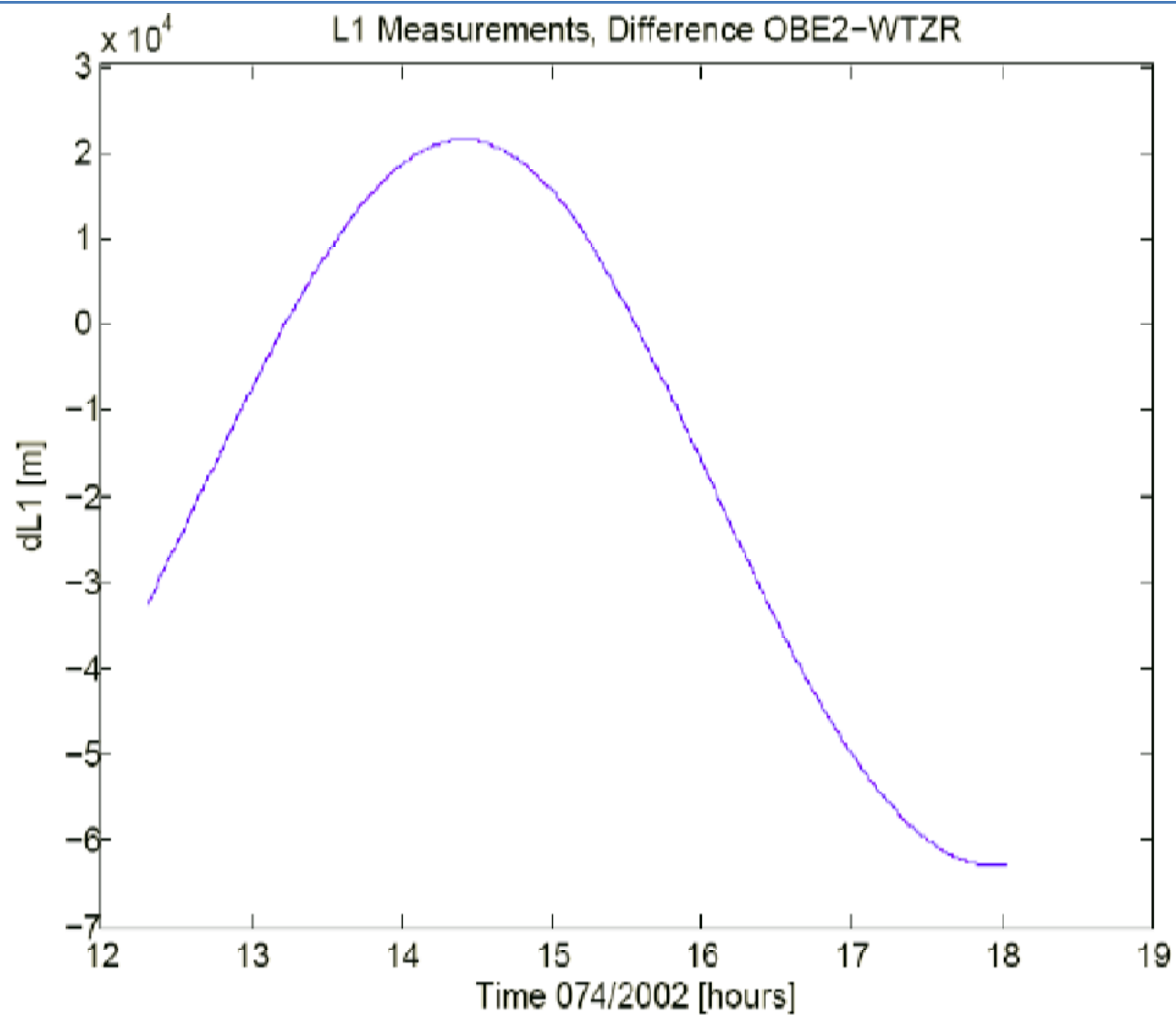
$$\sigma(\Delta\varepsilon_{kl}^i) = \sqrt{\sigma^2(\varepsilon_k^i) + \sigma^2(\varepsilon_l^i)} \cong \sqrt{2\sigma^2(\varepsilon_k^i)} = \sqrt{2}\sigma(\varepsilon_k^i)$$



Единичные разности



Единичные разности



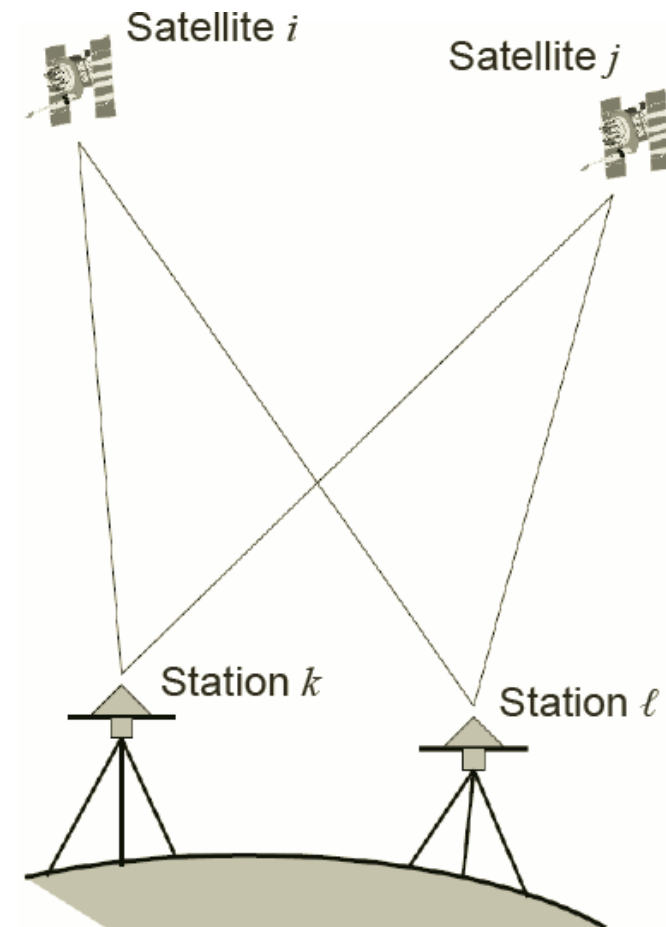
Двойные разности

Двойные разности (*double differences*) получены путем вычитания двух единичных разностей измерений

$$\begin{aligned}\nabla \Delta L_{kl}^{ij} &= \Delta L_{kl}^i - \Delta L_{kl}^j \\ &= \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \\ &\quad + \lambda \nabla \Delta N_{kl}^{ij} + \nabla \Delta \varepsilon_{kl}^{ij}\end{aligned}$$

Ошибки часов приемника полностью устранены

Компонент неопределенности (ambiguity term) является целым числом у двойных разностей



Двойные разности

Компонент неопределенности (*ambiguity term*) является целым числом у двойных разностей

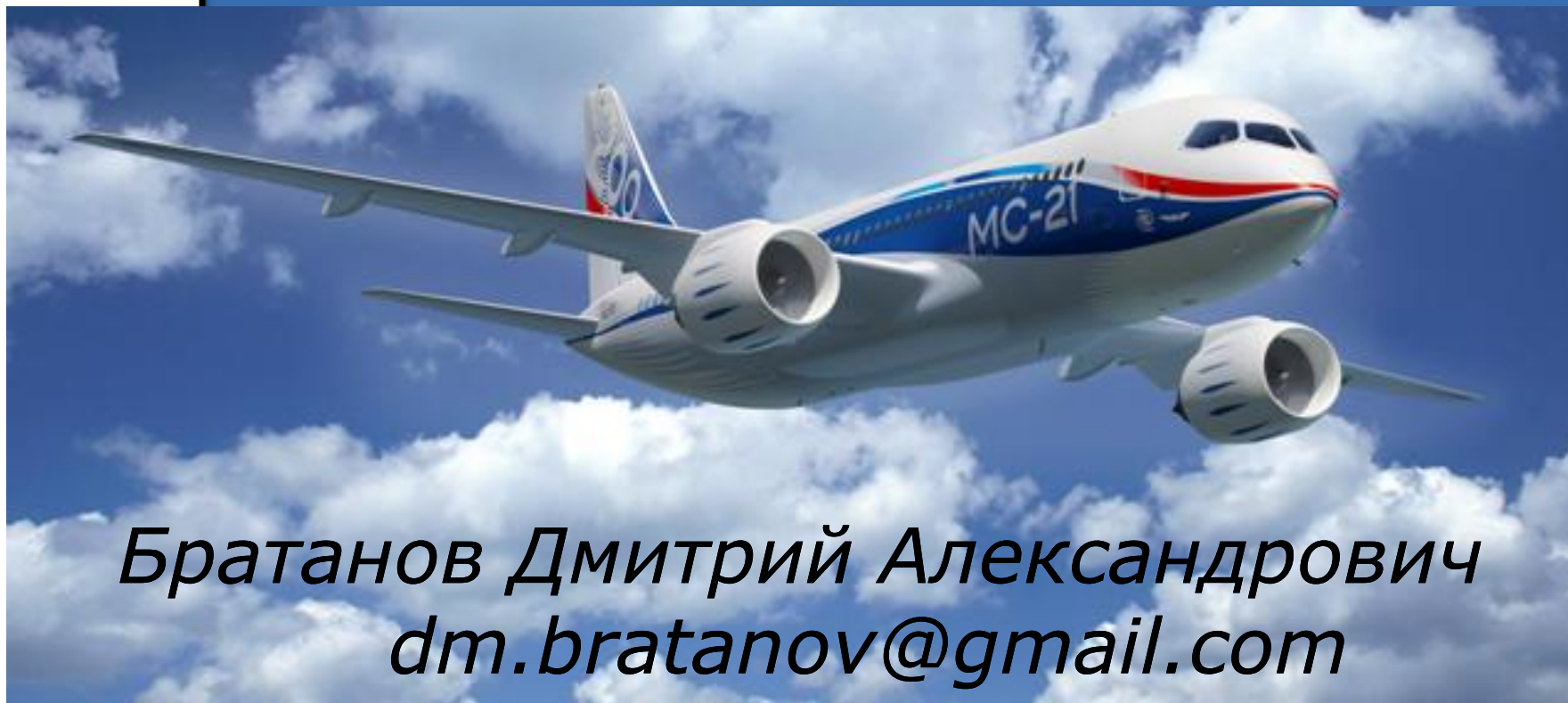
$$\begin{aligned}\nabla\Delta b_{AB}^{jk} &= b_A^j - b_B^j - b_A^k + b_B^k = +\lambda(N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) \\ &\quad - \lambda(N_B^j - \alpha^j + \alpha_B) \\ &\quad - \lambda(N_A^k - \alpha^k + \alpha_A) \\ &\quad + \lambda(N_B^k - \alpha^k + \alpha_B) \\ &= \lambda(N_A^j - N_B^j - N_A^k + N_B^k) = \lambda\nabla\Delta N_{AB}^{jk}\end{aligned}$$

На практике компонент неопределенности фазовых измерений (phase ambiguity term) может быть выделен как целое число только в двойных разностях

$$\begin{aligned}\sigma(\nabla\Delta\varepsilon_{kl}^{\bar{ij}}) &= \sqrt{\sigma^2(\varepsilon_k^i) + \sigma^2(\varepsilon_l^i) + \sigma^2(\varepsilon_k^j) + \sigma^2(\varepsilon_l^j)} \\ &\cong \sqrt{4\sigma^2(\varepsilon_k^i)} = 2\sigma(\varepsilon_k^i)\end{aligned}$$



Вибрационно-пилотажные приборы ПНК



Братанов Дмитрий Александрович
dm.bratanov@gmail.com

