

# Назначение глобальных систем спутникового позиционирования (ГССП) и их предшественники

*ГССП* предназначены для определения пространственных координат (позиционирование) и скорости объектов на поверхности Земли, в околоземном воздушном и космическом пространстве, а также обеспечения пользователей сигналами системного времени, привязанного к международным временным шкалам.

## Предшественники современных ГССП:

- радиодальномерные навигационные системы HIRAN, DEKKA (развивались во время Второй мировой войны для нужд ВВС);
- ГССП 1-го поколения NNSS “Transit” (USA, введена в эксплуатацию в 1964 г., открыта для гражданского использования в 1967 г.), “Цикада” (СССР, введена в эксплуатацию в 1979 г.).

# Современные глобальные системы спутникового позиционирования (ГССП 2-го поколения)



## ГЛОНАСС

(Глобальная Навигационная Система)

Разработка системы начата в середине 1970-х.

Развертывание начато в 1982 г.

Принята в эксплуатацию в 1993 г.

Открыта для гражданского использования в 1995 г.



## GPS или NAVSTAR

(Система Глобального Позиционирования или Навигационная Система определения Времени и Расстояния)

Разработка системы начата в 1973 году.

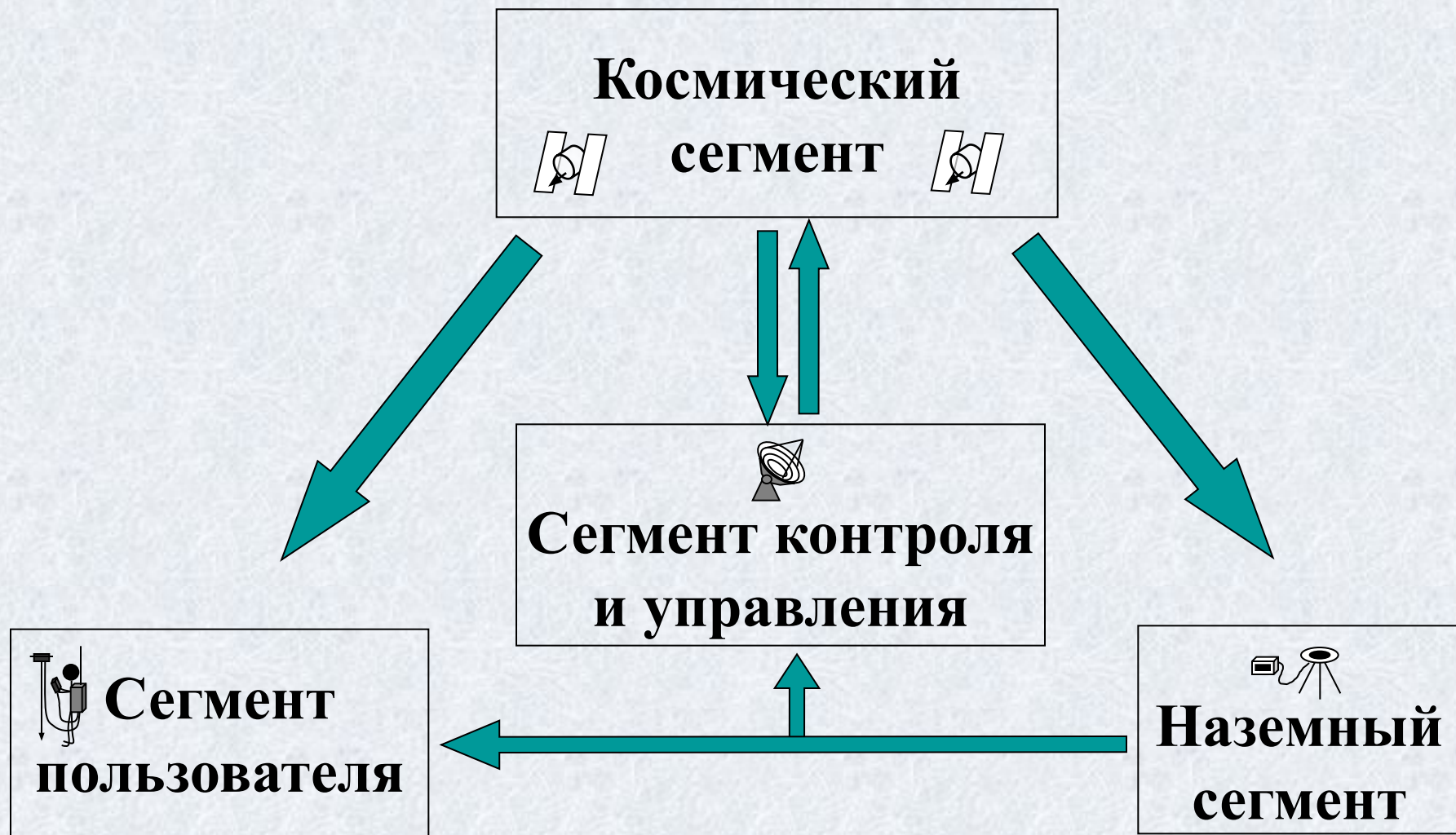
Развертывание начато в 1978 г.

Принята в эксплуатацию в 1995 г.

О текущем состоянии орбитальной группировки GPS и ГЛОНАСС можно узнать на сайтах:

<http://www.glonass-ianc.rsa..ru>

# Общая структура ГССП GPS и ГЛОНАСС



# Космический сегмент систем GPS и ГЛОНАСС

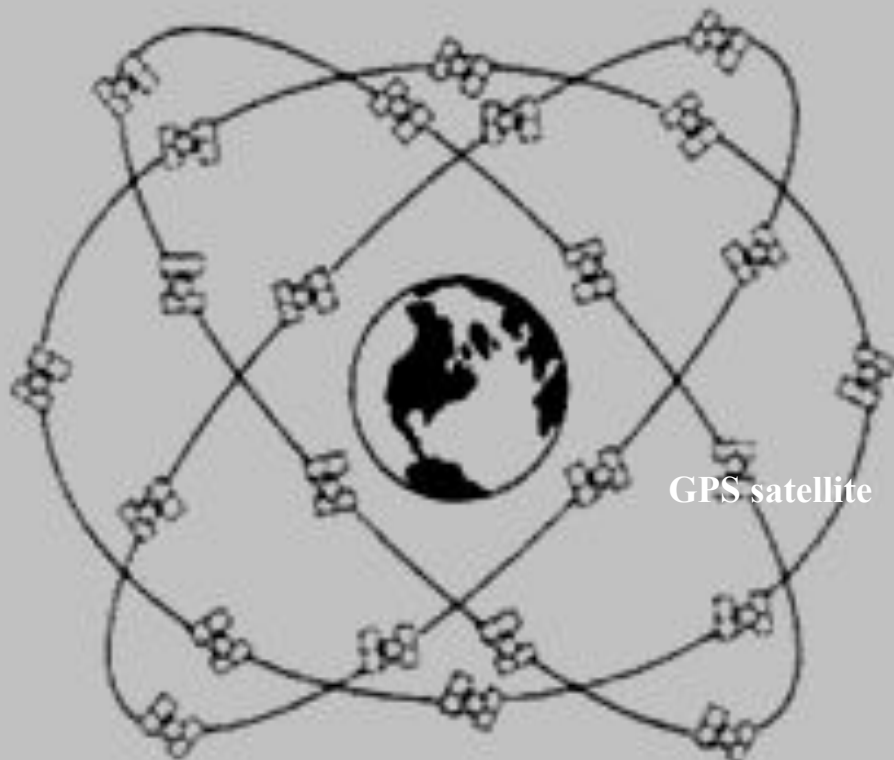
Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Число ИСЗ в системе	24* (3 в запасе)	24* (4 в запасе)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Наклон орбиты	64.8°	55°
Период обращения ИСЗ	11 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup>	11 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>
Высота ИСЗ над поверхностью Земли	19100 км	20150 км
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Срок активного существования	3 года	7.5 лет

\* в настоящее время активны 30 GPS SV's и 17 ГЛОНАСС SV's

# Космический сегмент систем GPS и ГЛОНАСС

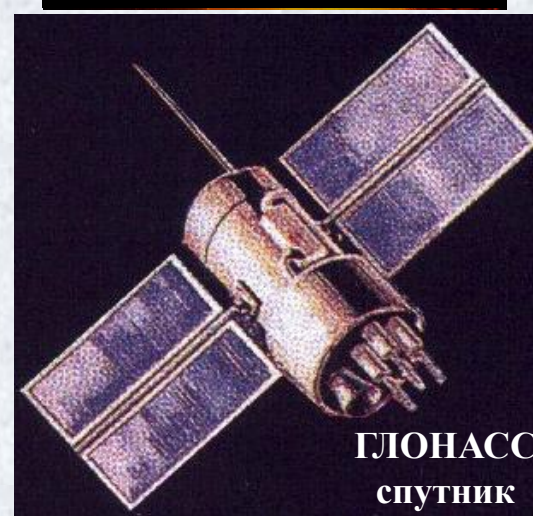
Подсистема космических аппаратов ГЛОНАСС

Подсистема космических аппаратов GPS

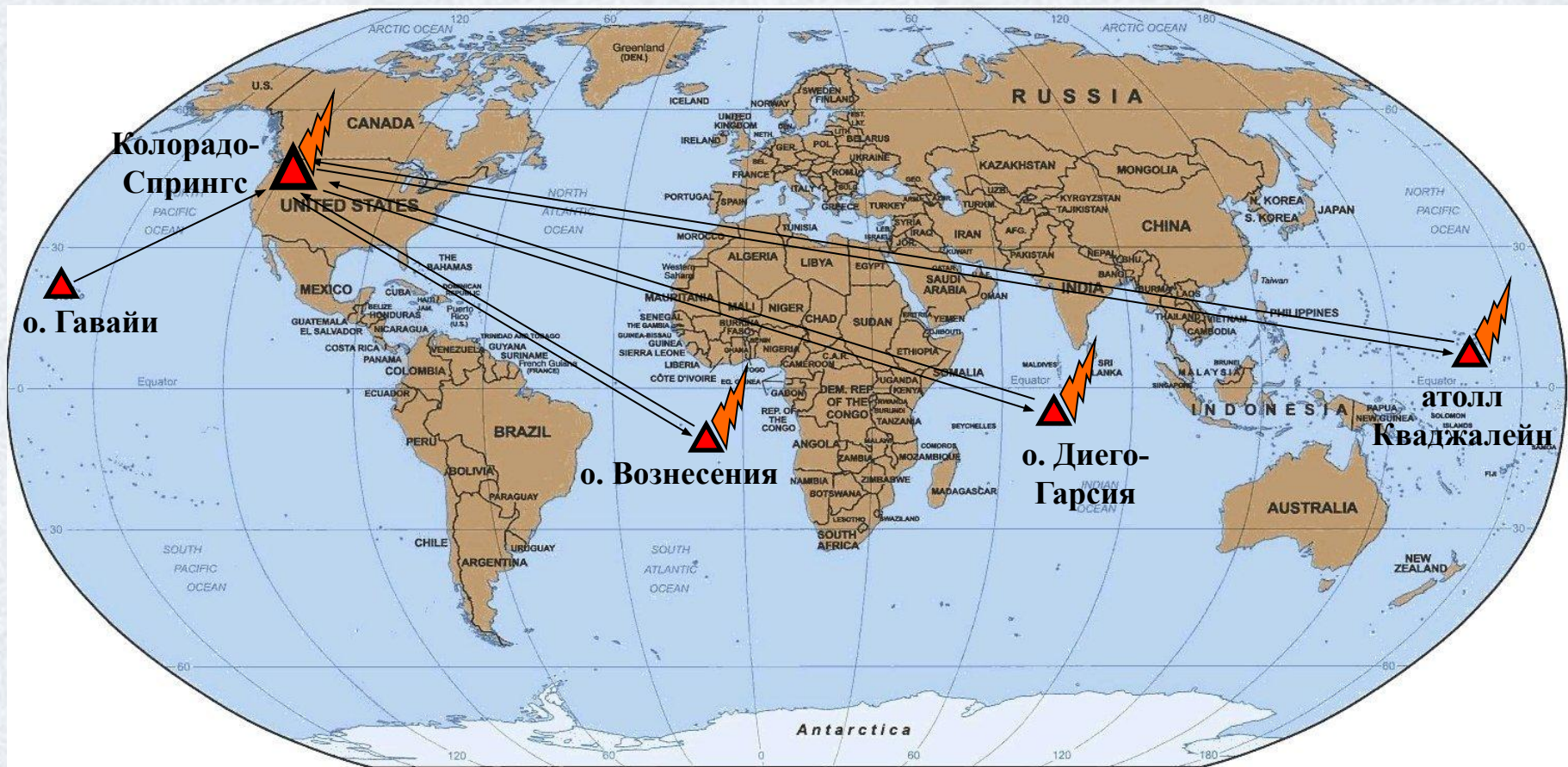




# Космический сегмент систем GPS и ГЛОНАСС



# Сегмент контроля и управления системой GPS





# Сегмент контроля и управления системой ГЛОНАСС



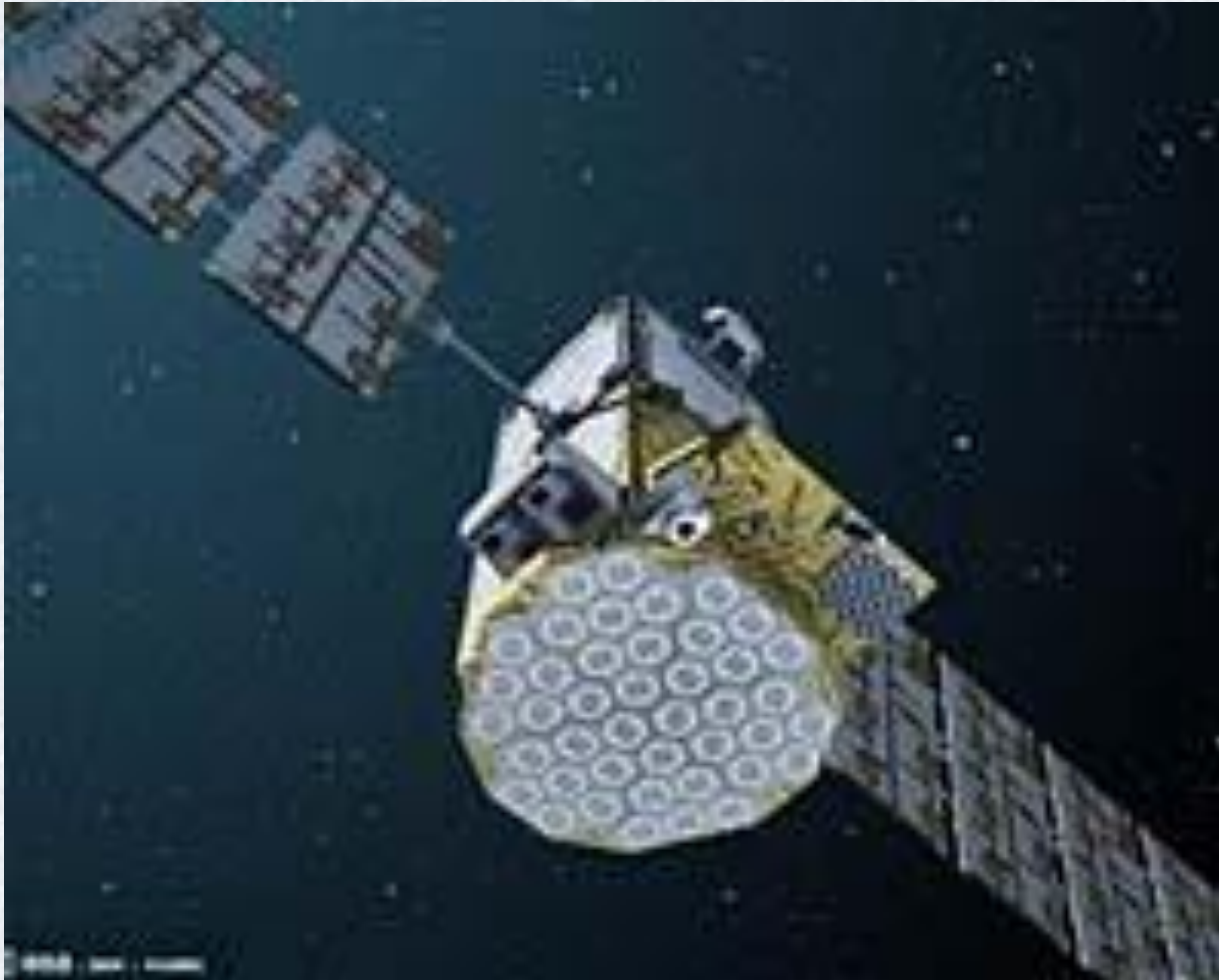


# Европейская глобальная навигационная система GALILEO (планируется к вводу в эксплуатацию в 2013г.)

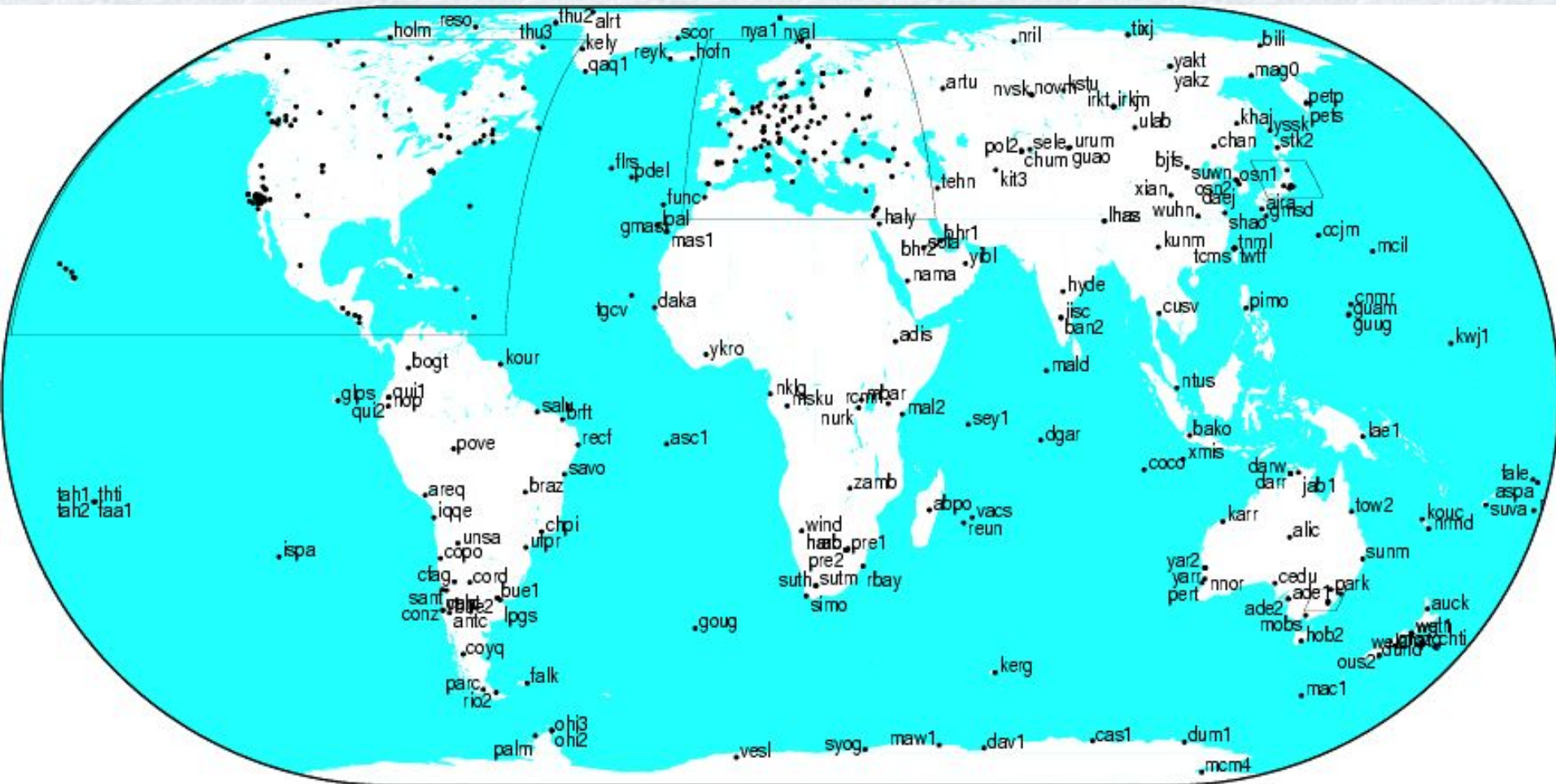
Параметр	Значение	GPS
Число ИСЗ в системе	30	24* (4 в запасе)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Наклон орбиты	54°	55°
Высота ИСЗ над поверхностью Земли	22966 км	20150 км
Система координат	GTRS	WGS-84
Срок активного существования	12 лет	7.5 лет

\* в настоящее время выведены на орбиту 2 SV's

# Общий вид спутника системы GALILEO



# Наземный сегмент (сеть IGS)



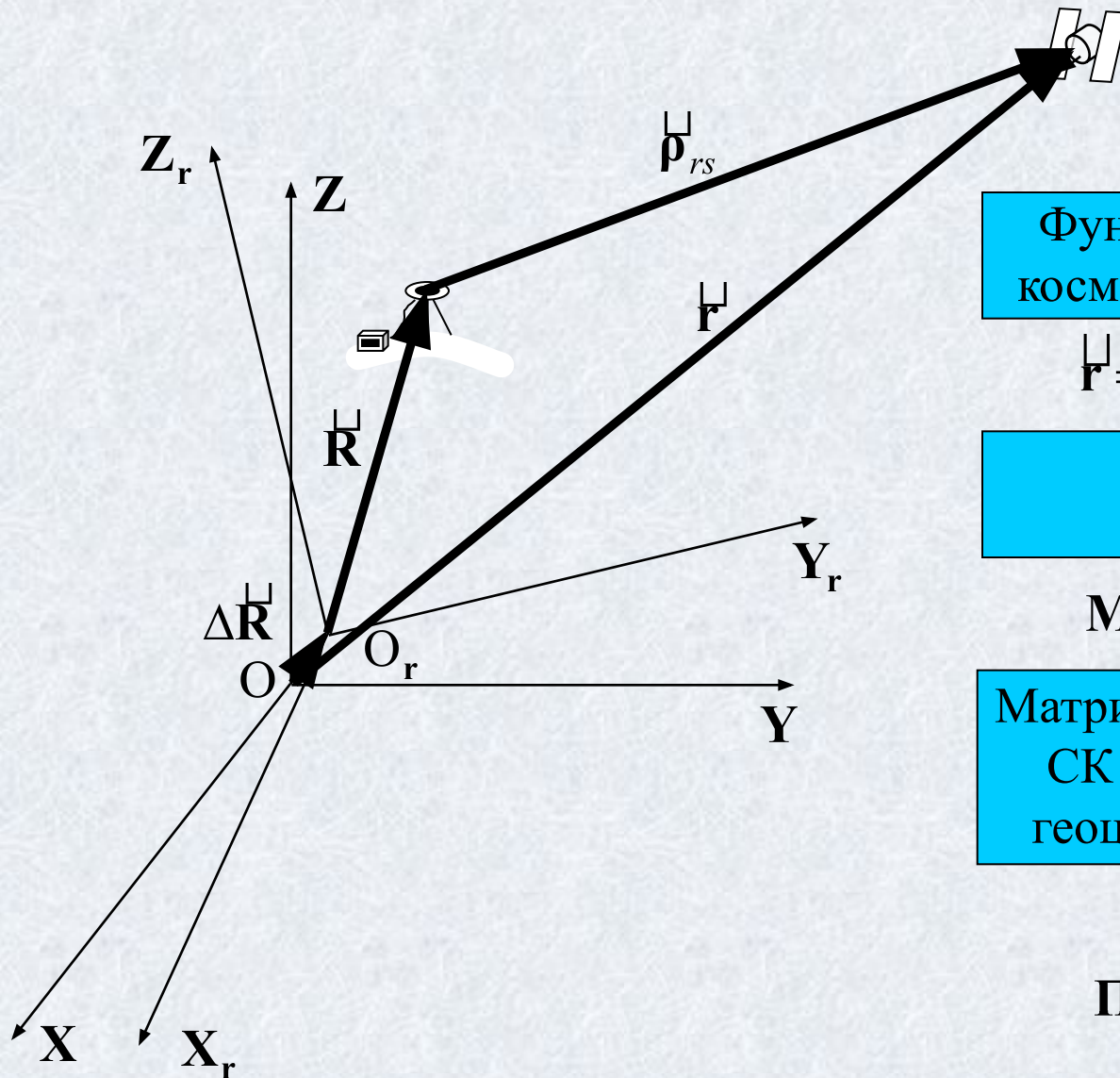








# Принципы определения местоположения при помощи ГССП GPS и ГЛОНАСС



Фундаментальное уравнение  
космической геодезии (ФУКГ)

$$\mathbf{r} = \rho_{rs} + \mathbf{M}\mathbf{R} + \Delta\mathbf{R}. \quad (1)$$

Матрица масштабов  
вдоль осей координат

$$\mathbf{M} = \text{diag}(\mu_X, \mu_Y, \mu_Z).$$

Матрица разворота референционной  
СК (X<sub>r</sub>, Y<sub>r</sub>, Z<sub>r</sub>) относительно  
геоцентрической СК (X, Y, Z)

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} 1 & \varphi & -\gamma \\ -\varphi & 1 & \vartheta \\ \gamma & -\vartheta & 1 \end{pmatrix}.$$



# Принципы определения местоположения при помощи ГССП GPS и ГЛОНАСС

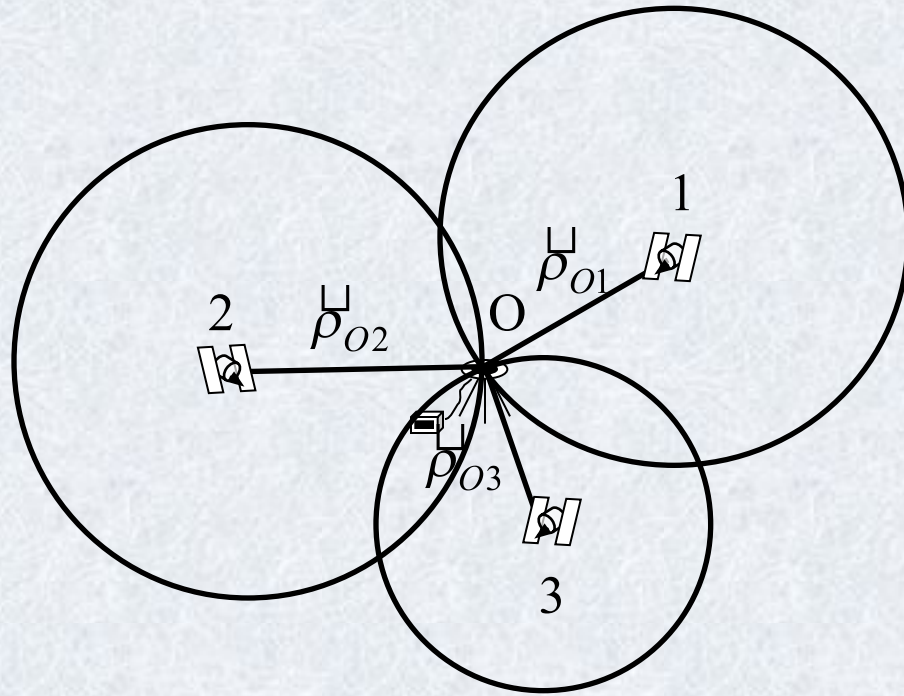
При  $\Pi = M = E$  и  $\Delta R = 0$  уравнение (1) приводится к виду :

$$\underline{\rho}_{rs} = \underline{r} - \underline{R}. \quad (2)$$

Записывая уравнение (2) по модулю для фиксированного момента  $t$  получаем :

$$|\underline{\rho}_{rs}| = \sqrt{(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2 + (Z_s - Z_r)^2}. \quad (3)$$

## Геометрическая интерпретация (пространственная линейная засечка)



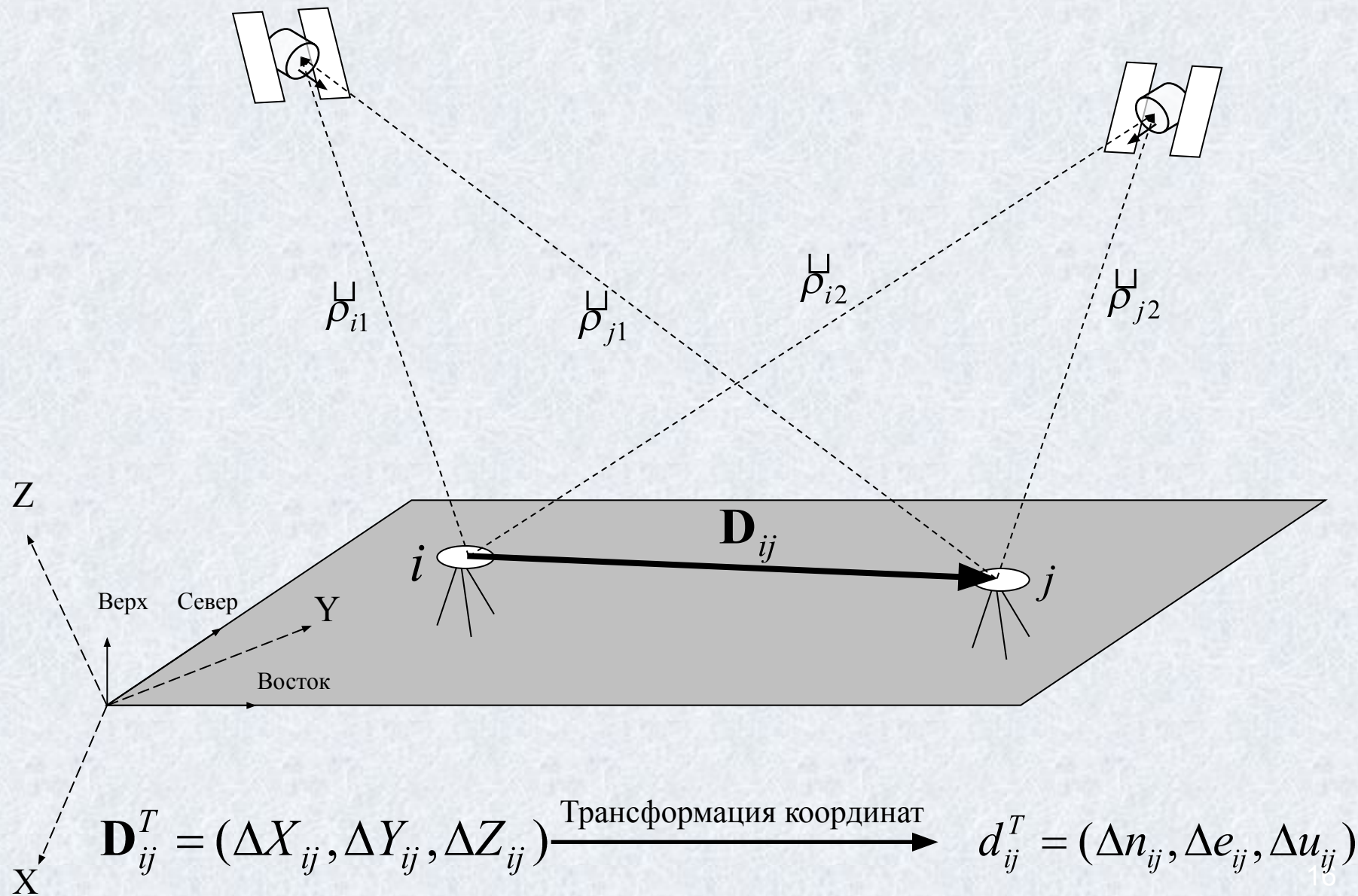
### Абсолютное позиционирование

$$|\underline{\rho}_{O1}| = \sqrt{(X_1 - X_O)^2 + (Y_1 - Y_O)^2};$$

$$|\underline{\rho}_{O2}| = \sqrt{(X_2 - X_O)^2 + (Y_2 - Y_O)^2};$$

$$|\underline{\rho}_{O3}| = \sqrt{(X_3 - X_O)^2 + (Y_3 - Y_O)^2}.$$

# Относительное позиционирование



# Трансформирование разностей геоцентрических координат в локальную ТПСК

Мы измерили базовую линию  $\mathbf{D}_{ij}^T = (\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij})$

Известны геодезическая широта и долгота пункта  $i - B, L$

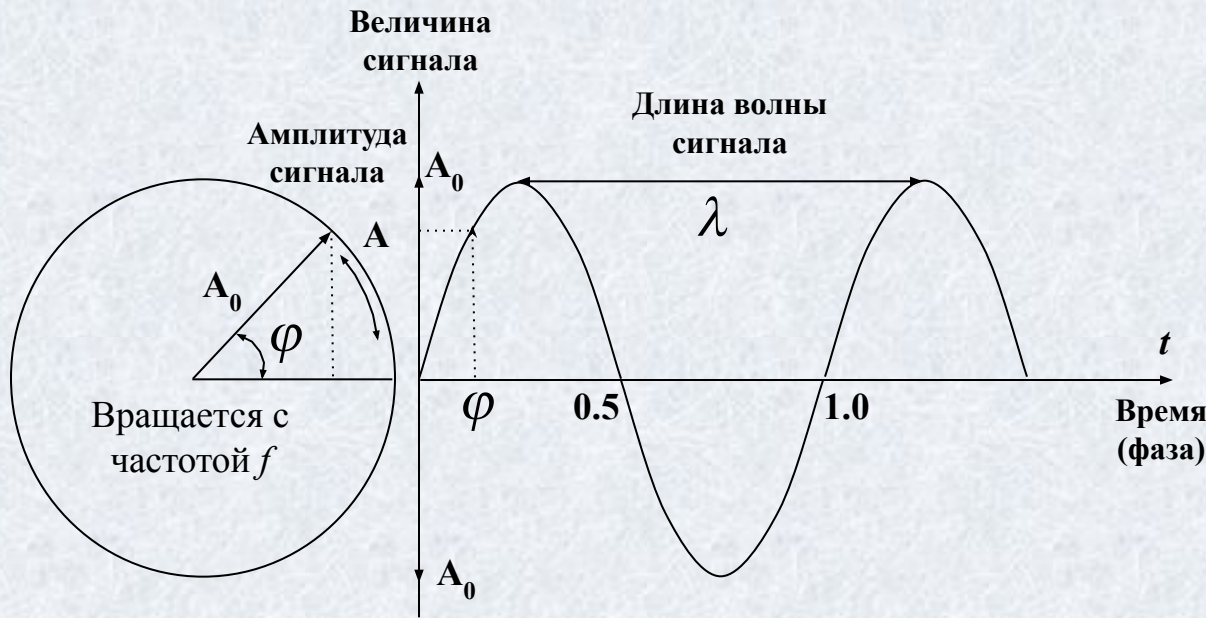
Тогда компоненты этой же базовой линии в ТПСК  $\mathbf{d}_{ij}$  равны

$$\mathbf{d}_{ij} = \begin{pmatrix} \Delta n_{ij} \\ \Delta e_{ij} \\ \Delta u_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin B_i \cos L_i & -\sin B_i \sin L_i & \cos B_i \\ -\sin L_i & \cos L_i & 0 \\ \cos B_i \cos L_i & \cos B_i \sin L_i & \sin B_i \end{pmatrix} \cdot (\mathbf{D}_{ij})$$



# Сигналы, излучаемые спутниками GPS и ГЛОНАСС и их назначение

## Немодулированный сигнал (несущая)



$$a = A_0 \sin(\omega t - \varphi_0);$$

$$\lambda = cT;$$

$$T = \frac{1}{f};$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}.$$

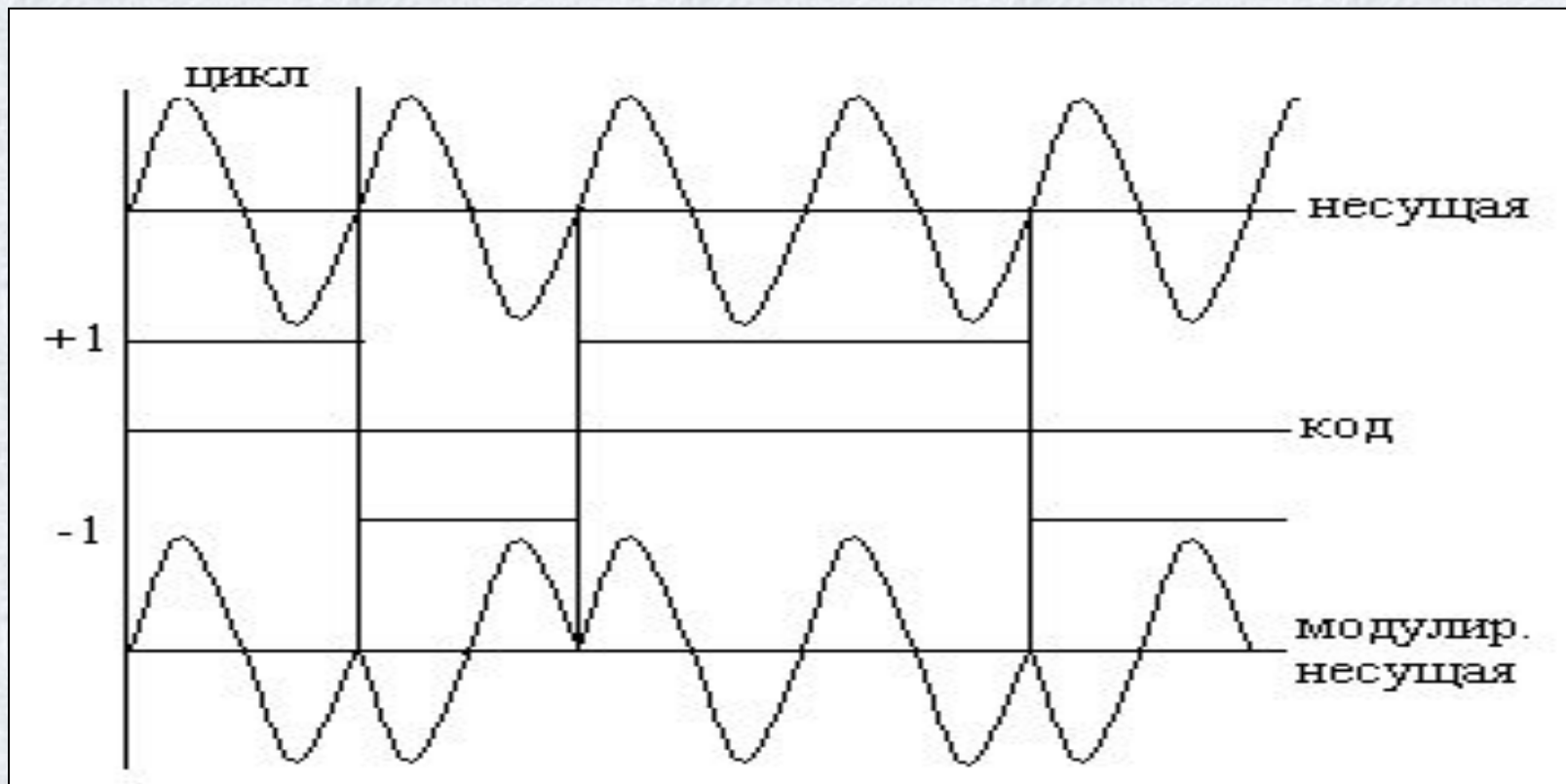
### Назначение несущих сигналов:

1. Служат носителями дальномерных кодов, необходимых для получения расстояний определяемый пункт – спутник (кодовые псевдодальности).
2. Фазы несущих сигналов используются для получения расстояний определяемый пункт – спутник (фазовые псевдодальности) с наивысшей точностью.
3. Используются для передачи потребителям навигационного сообщения (эфемериды, альманах и т.д.).

# Модулирование несущих сигналов в ГССП GPS и ГЛОНАСС

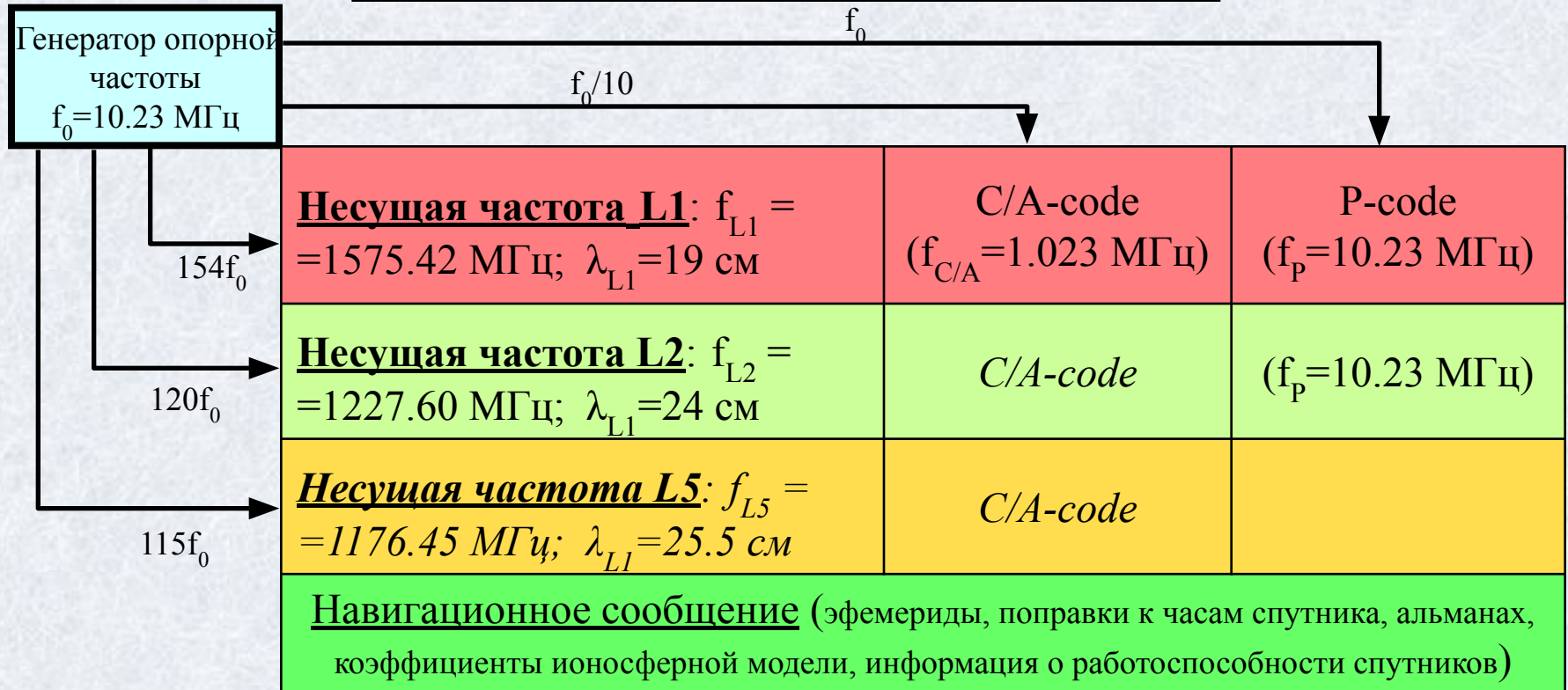
Дальномерные коды и другая необходимая информация, встраиваются в несущие колебания путем *фазовой манипуляции* (разновидность фазовой модуляции)

## Принцип генерации фазоманипулированных сигналов



# Принципы формирования и виды сигналов, излучаемые спутниками GPS

## Упрощенная схема формирования радиосигналов на спутнике GPS



### Дальномерные коды

**C/A-code** – грубый код или код открытого доступа

**P-code** – точный или защищенный код

### Режимы доступа

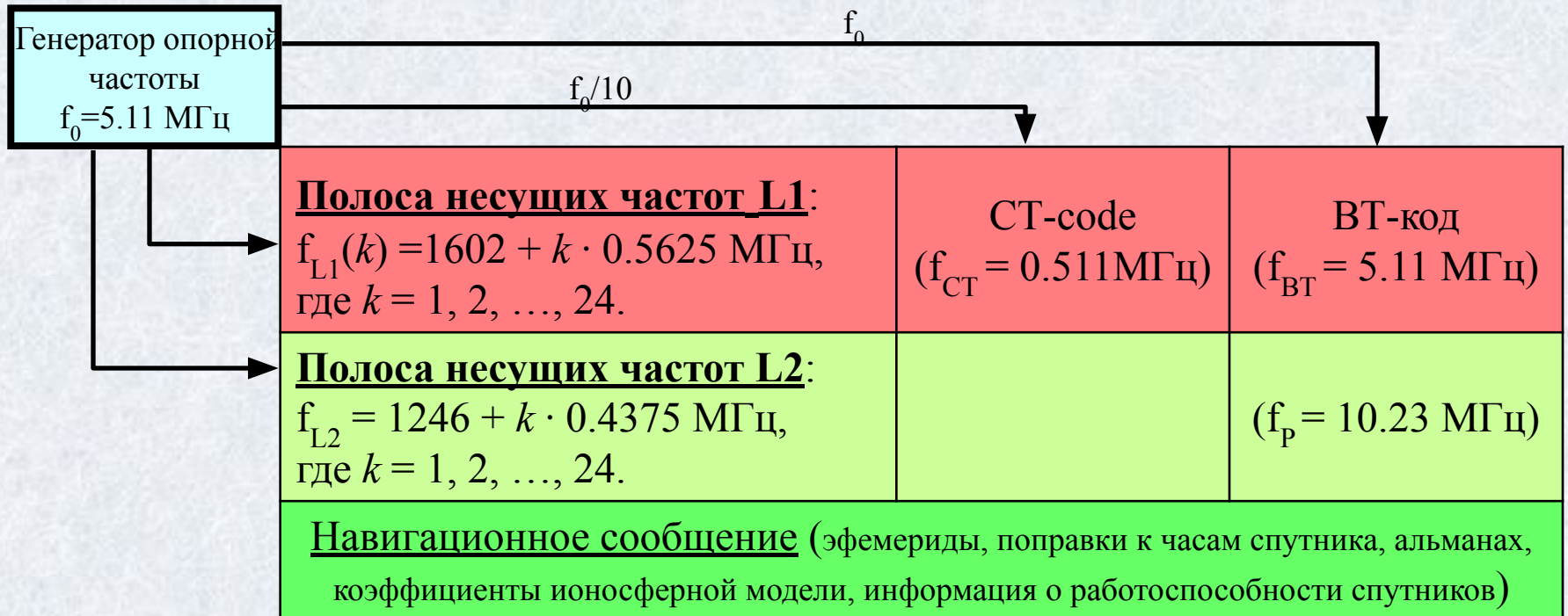
**AS** – режим дополнительного шифрования P-code

**SA** – режим селективного доступа (отменен в 2001 г.)



# Принципы формирования и виды сигналов, излучаемые спутниками ГЛОНАСС

## Упрощенная схема формирования радиосигналов на спутнике ГЛОНАСС



## Дальномерные коды

СТ – код стандартной точности (аналог C/A-code);

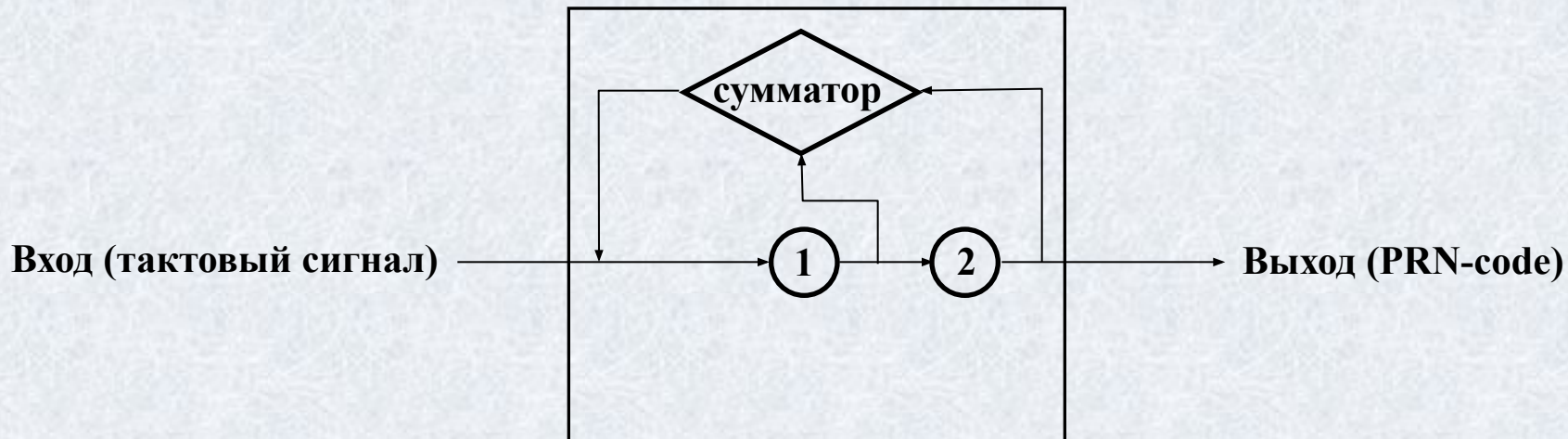
VT – точный код;

## Режимы доступа

ограничения отсутствуют

# Формирование дальномерных кодов (ПСП-последовательностей)

## Простейший сдвиговый регистр обратной связи



## Правила сложения битов информации

$$1 + 1 = 0; \quad 0 + 0 = 0$$

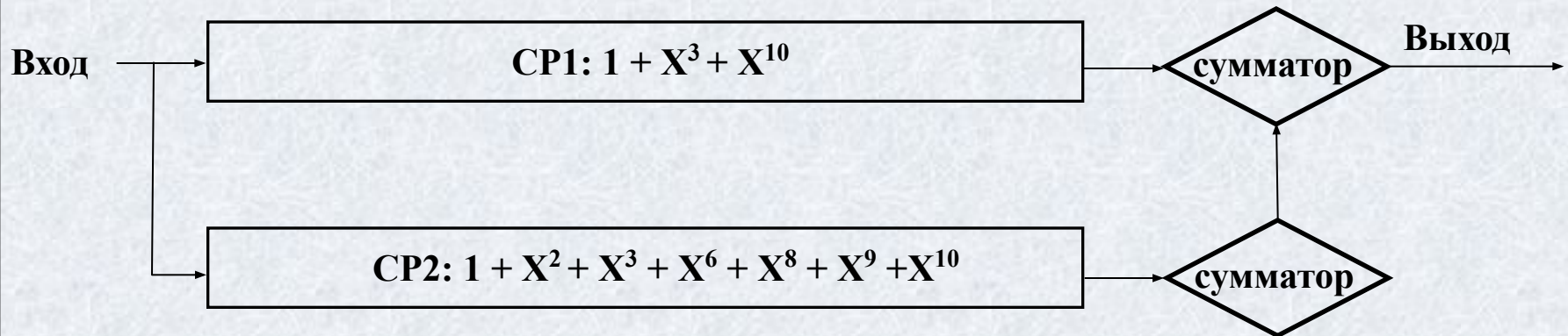
$$1 + 0 = 1; \quad 0 + 1 = 1$$

Образующий полином:  $1 + X^1$

Кол-во символов в ПСП:  $M = 2^k - 1$ , где  $k$  – кол-во разрядов в регистре

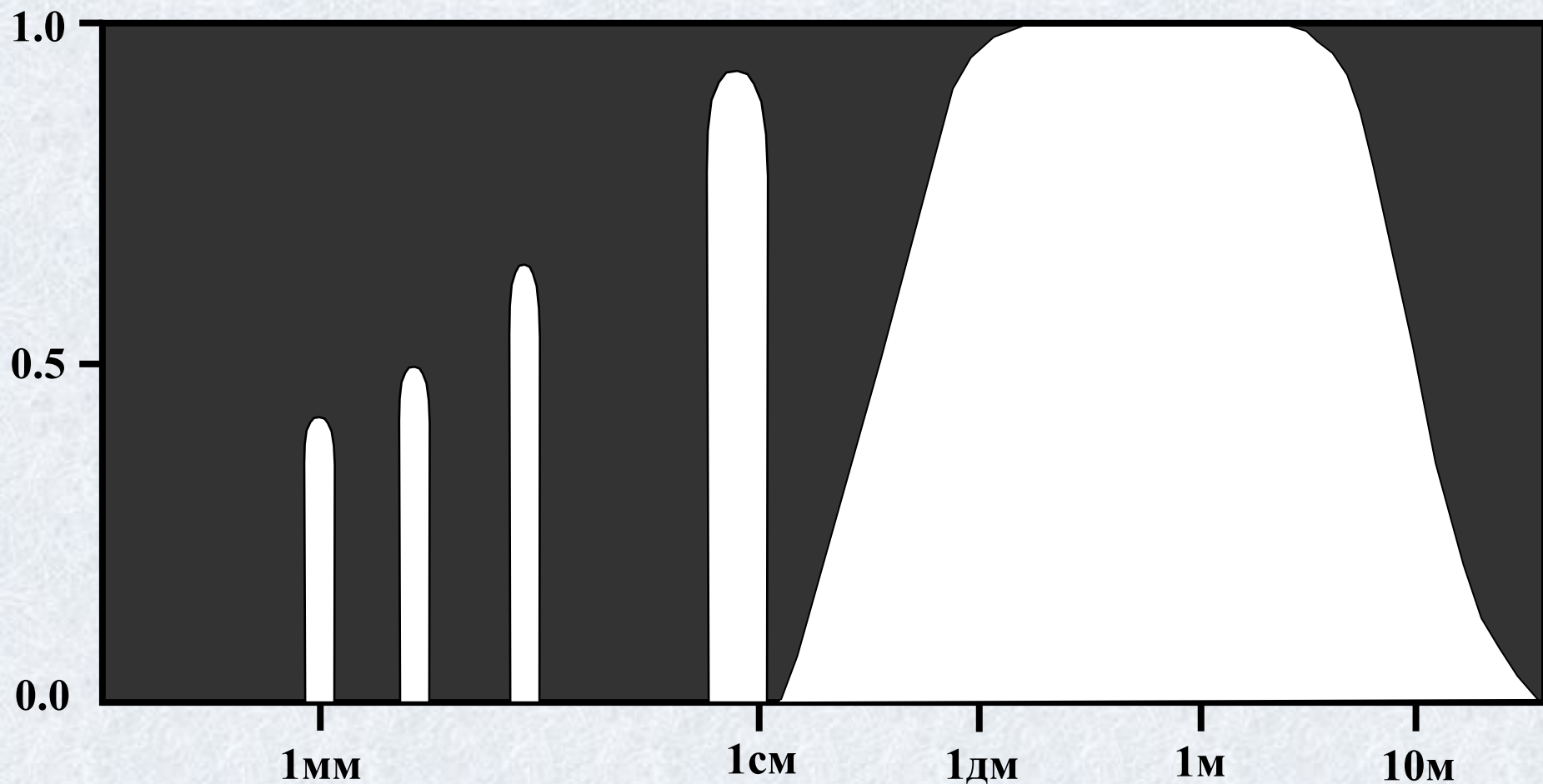
Номер такта	Cell 1	Cell 2	PRN-code
0	1	1	-
1	0	1	1
2	1	0	11
3	1	1	011

# Формирование C/A-code в GPS





# Пропускание радиоволн атмосферой Земли



# Системы времени, используемые в ГССП GPS и ГЛОНАСС

Системное время GPS и ГЛОНАСС не совпадает с международными шкалами времени TAI (Time Atomic International), UT (Universal Time), UTC (Universal Time Coordinated). Для перехода от системного времени GPS (GPST) и ГЛОНАСС (GLONASST) к UTC необходимо использовать формулы:

$$\text{GPST}=\text{UTC}+n_s,$$

$$\text{GLONASST}=\text{UTC}+3^h 00^s,$$

где  $n_s$  – поправка, вводимая в GPST. Системное время GPS и ГЛОНАСС корректируется в последнюю секунду 31 декабря или 30 июня, или в обе даты, когда расхождение UTC и UT1 (UT, исправленное за смещение мгновенного полюса Земли относительно его среднего положения) превышает 0.9 с.

За рубежом принято идентифицировать информацию, хранящуюся в БД и связанную с ГССП GPS и ГЛОНАСС, в соответствии с номером GPS недели (GPS week) и порядковым номером дня в ней. Счет GPS недель ведется с 6.01.1980 г. Для вычисления GPS week используется формула:

$$\text{GPSweek}=\text{int}[(\text{JD}-2444244.5)/7],$$

$$\text{JD}=\text{int}[365.25y]+\text{int}[30.6001(m+1)]+D+\text{UT}/24+1720981.5,$$

$$y=Y-1 \text{ and } m=M+12 \text{ if } M \leq 2;$$

$$y=Y \text{ and } m=M \text{ if } M > 2;$$

Например, файл точных эфемерид, соответствующий 17.12.2007 г. и хранящийся в БД сети IGS, получит наименование: igs14581.sp3.Z.

# Размещение информации в БД сети IGS

IGS Product Availability - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Back Forward Stop Home Search Favorites Media

Address [http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html) Go

This table indicates the most recent IGS ephemeris found by this server for recent days:

		Day of the Week						
		S	M	T	W	Th	F	S
GPS Week	<a href="#">1458</a>	<a href="#">Ultra06</a>						
	<a href="#">1457</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Ultra18</a>
	<a href="#">1456</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>	<a href="#">Rapid</a>

## IGS Final Orbit available for GPS weeks:

<a href="#">1450</a>	<a href="#">1451</a>	<a href="#">1452</a>	<a href="#">1453</a>	<a href="#">1454</a>	<a href="#">1455</a>				
<a href="#">1440</a>	<a href="#">1441</a>	<a href="#">1442</a>	<a href="#">1443</a>	<a href="#">1444</a>	<a href="#">1445</a>	<a href="#">1446</a>	<a href="#">1447</a>	<a href="#">1448</a>	<a href="#">1449</a>
<a href="#">1430</a>	<a href="#">1431</a>	<a href="#">1432</a>	<a href="#">1433</a>	<a href="#">1434</a>	<a href="#">1435</a>	<a href="#">1436</a>	<a href="#">1437</a>	<a href="#">1438</a>	<a href="#">1439</a>
<a href="#">1420</a>	<a href="#">1421</a>	<a href="#">1422</a>	<a href="#">1423</a>	<a href="#">1424</a>	<a href="#">1425</a>	<a href="#">1426</a>	<a href="#">1427</a>	<a href="#">1428</a>	<a href="#">1429</a>
<a href="#">1410</a>	<a href="#">1411</a>	<a href="#">1412</a>	<a href="#">1413</a>	<a href="#">1414</a>	<a href="#">1415</a>	<a href="#">1416</a>	<a href="#">1417</a>	<a href="#">1418</a>	<a href="#">1419</a>
<a href="#">1400</a>	<a href="#">1401</a>	<a href="#">1402</a>	<a href="#">1403</a>	<a href="#">1404</a>	<a href="#">1405</a>	<a href="#">1406</a>	<a href="#">1407</a>	<a href="#">1408</a>	<a href="#">1409</a>
<a href="#">1390</a>	<a href="#">1391</a>	<a href="#">1392</a>	<a href="#">1393</a>	<a href="#">1394</a>	<a href="#">1395</a>	<a href="#">1396</a>	<a href="#">1397</a>	<a href="#">1398</a>	<a href="#">1399</a>
<a href="#">1380</a>	<a href="#">1381</a>	<a href="#">1382</a>	<a href="#">1383</a>	<a href="#">1384</a>	<a href="#">1385</a>	<a href="#">1386</a>	<a href="#">1387</a>	<a href="#">1388</a>	<a href="#">1389</a>
<a href="#">1370</a>	<a href="#">1371</a>	<a href="#">1372</a>	<a href="#">1373</a>	<a href="#">1374</a>	<a href="#">1375</a>	<a href="#">1376</a>	<a href="#">1377</a>	<a href="#">1378</a>	<a href="#">1379</a>
<a href="#">1360</a>	<a href="#">1361</a>	<a href="#">1362</a>	<a href="#">1363</a>	<a href="#">1364</a>	<a href="#">1365</a>	<a href="#">1366</a>	<a href="#">1367</a>	<a href="#">1368</a>	<a href="#">1369</a>
<a href="#">1350</a>	<a href="#">1351</a>	<a href="#">1352</a>	<a href="#">1353</a>	<a href="#">1354</a>	<a href="#">1355</a>	<a href="#">1356</a>	<a href="#">1357</a>	<a href="#">1358</a>	<a href="#">1359</a>

# Вычисление псевдодальностей в ГССП GPS и ГЛОНАСС

## Основные методы определения псевдодальностей

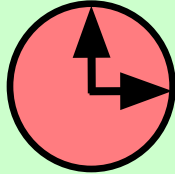
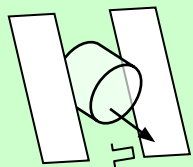
```
graph TD; A[Основные методы определения псевдодальностей] --> B[Кодовый метод]; A --> C[Фазовый метод];
```

**Кодовый метод**  
точность получения  
псевдодальностей 0.3 – 0.6 м.

**Фазовый метод**  
точность получения  
псевдодальностей ~0.002 м.

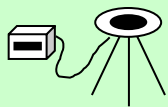


# Кодовый метод



Часы спутника  $t_s$

Излученный спутниковый сигнал (ПСП)



Часы приемника  $t_r$

Теоретически:

$$\rho_{rs} = c\Delta\tau = c [N T_{\Pi} + (m + \phi) T_m]. \quad (4)$$

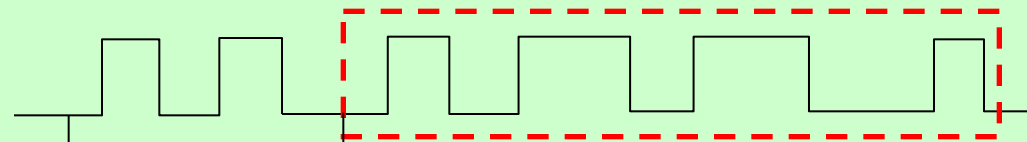
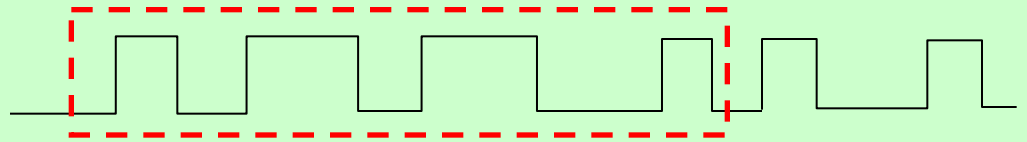
Учитывая, что  $\lambda = cT$ , получаем

$$\rho_{rs} = N\lambda_{\Pi} + (m + \phi) \lambda_m. \quad (5)$$

Практически, в простейшем случае имеем

$$\begin{aligned} P_{rs} &= c(t_r + \delta t_r) - c(t_s + \delta t_s) = \\ &= c(t_r - t_s) + c(\delta t_r - \delta t_s) = \rho_{rs} + c\delta t_r - c\delta t_s. \end{aligned} \quad (6)$$

Принятый спутниковый сигнал



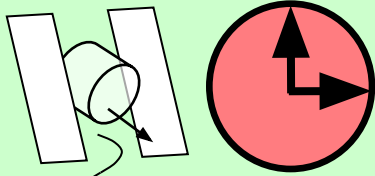
Сигнал, сгенерированный в приемнике

$$\Delta\tau = (T_s - T_r)$$

# Параметры ПСП кодов стандартной точности

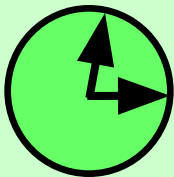
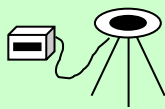
Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Число символов в ПСП $M$	511	1023
Тактовая частота $f_m$	511кГц	1023кГц
Интервалы следования символов в ПСП $T_m$	~2мкс	~2мкс
Длина волны символа ПСП $\lambda_m = c/f_m$	~587м	~293м
Период повторения ПСП $T_{\Pi}$	1мс	1мс
Длина волны всей ПСП $\lambda_{\Pi} = Mc/f_m$	~300км	~300км

# Фазовый метод



Часы спутника  $t_s$

Излученный спутниковый сигнал (несущая)



Часы приемника  $t_r$

Теоретически:

$$\Delta\varphi = \varphi_r - \varphi_s = \omega(t_r - t_s) = \omega\Delta\tau = 2\pi f\Delta\tau = \frac{2\pi}{\lambda} c\Delta\tau. \quad (7)$$

Учитывая что  $\rho_{rs} = c\Delta\tau$ , получаем из (7)

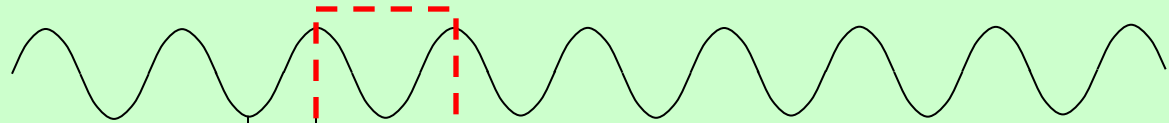
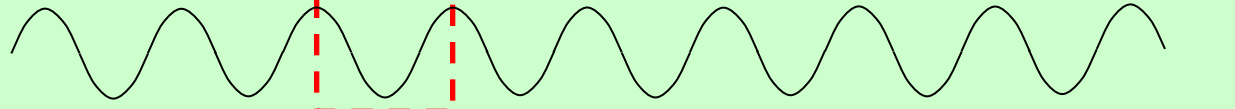
$$\rho_{rs} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda = (N + \Phi)\lambda = N\lambda + \Phi\lambda = N\lambda + dP. \quad (8)$$

Практически, в простейшем случае имеем

$$\frac{\Delta\varphi + \delta\varphi_r + \delta\varphi_s}{2\pi} \lambda = \rho_{rs} + \frac{\delta\varphi_r}{2\pi} \lambda + \frac{\delta\varphi_s}{2\pi} \lambda;$$

$$P_{rs} = N\lambda + dP = \rho_{rs} + \delta P_r + \delta P_s. \quad (9)$$

Принятый спутниковый сигнал



$$\Delta\tau = (T_s - T_r)$$

Сигнал, сгенерированный в приемнике

# Источники ошибок, оказывающие влияние на результаты позиционирования при помощи ГССП GPS и ГЛОНАСС

**Случайные («белый шум»)  
влияние минимизируется путем  
осреднения результатов измерений**

**Систематические («смещения»)  
неустранимы путем осреднения  
результатов измерений**

1. Ошибки, связанные с погрешностями исходных данных, главенствующая роль в которых принадлежит неточностям эфемерид спутников, определяющих их положение в пространстве в любой момент времени.

2. Ошибки, обусловленные влиянием внешней среды на распространение дальномерного сигнала. К ним относятся ионосферные и тропосферные задержки, отражение радиоволн от окружающих предметов (многолучевость или многопутность), препятствия на пути сигнала, релятивистские эффекты.

3. Нестабильность работы опорного генератора спутника. Задержки сигнала в аппаратуре спутника и приемника, неточность знания положения фазового центра антенны приемника.

4. Геометрический фактор – влияние геометрии взаимного расположения наблюдаемых спутников на результаты позиционирования.

Существуют и другие ошибки, не относящиеся ни к одной из перечисленных групп, например, ошибки трансформирования результатов позиционирования из системы координат WGS-84 в ПЗ-90 и т.д.

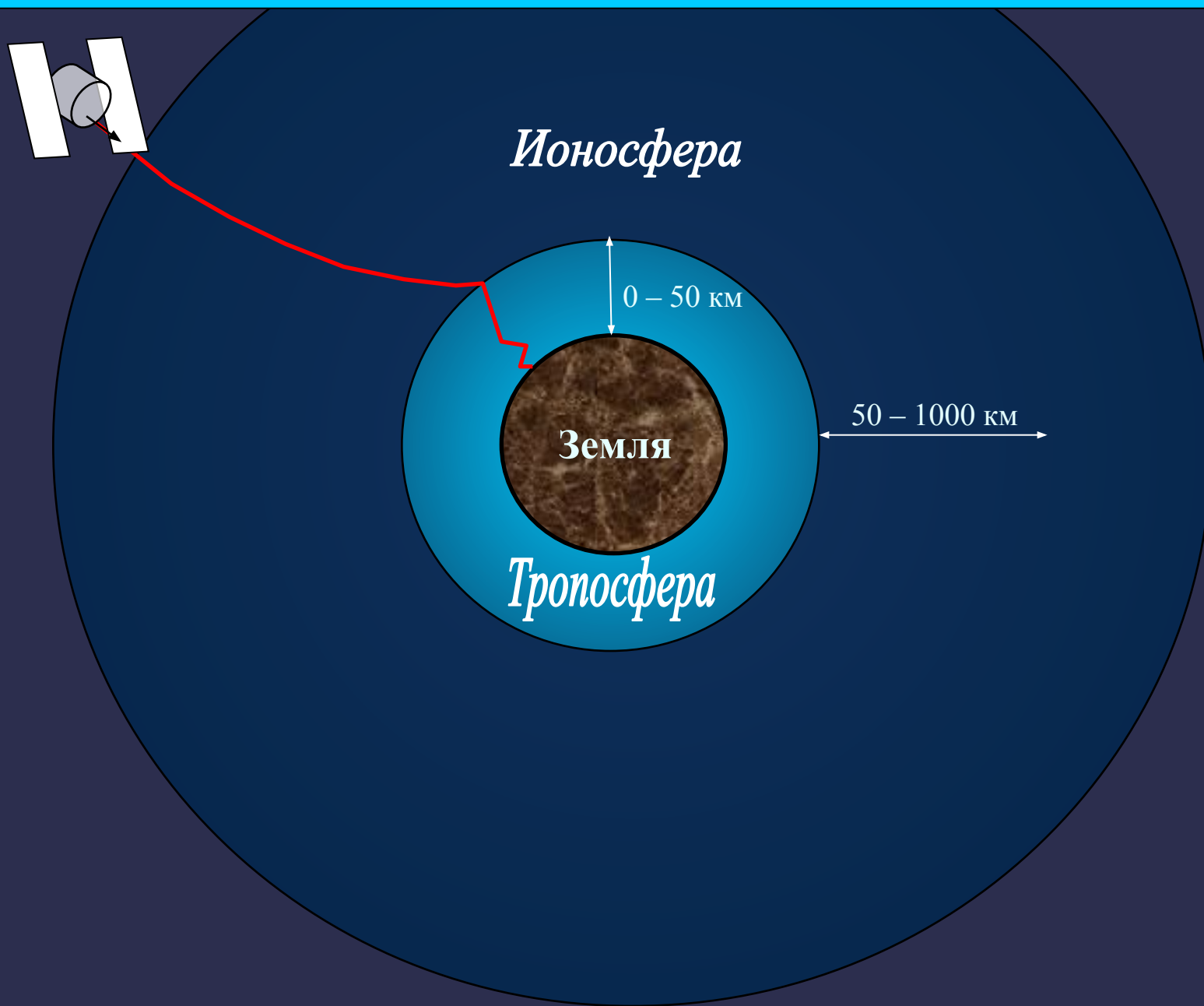


# Влияние ошибок эфемерид спутников GPS и ГЛОНАСС на точность позиционирования

$$\delta b = \frac{b(\text{км})}{25000(\text{км})} \Delta R$$

$\Delta R(\text{м})$	$b(\text{км})$	$\delta b$ (мм)
2.50	10	1
2.50	100	10
2.50	1000	100
0.25	100	1
0.25	1000	10
0.05	100	-
0.05	1000	0.5

# Атмосферная рефракция



# Влияние ионосферы на результаты GPS и ГЛОНАСС измерений

Искажение псевдодальности, обусловленное влиянием ионосферы

$$\delta P_{Iono} = \pm \frac{1}{\cos z'} \frac{40.3}{f^2} TVEC = \pm \frac{k}{f^2}. \quad (10)$$

$\delta P_{Iono}$  может принимать значения от 0.15 до 50 м. При отсутствии учета ионосферной рефракции базовые линии оказываются преуменьшенными на величину  $0.08 TVEC$  [ppm].

## Моделирование ионосферной рефракции (модель Джона Клобушара)

$$\delta t_{Iono} = A_1 + A_2 \cos \frac{2\pi(t - A_3)}{A_4}. \quad (11)$$

$A_1 = 5\text{ns}$ ,  $A_2$  – амплитуда,  $A_3$  – фаза,  $A_4$  – период функции  $\delta t_{Iono}$ .



# Важнейшие линейные комбинации GPS/ГЛОНАСС измерений и «уничтожение» эффекта ТЕС

Пусть измерены дробные части разности фаз спутникового сигнала  $\phi_{L_1}, \phi_{L_2}$  на частотах  $L_1$  и  $L_2$ , тогда их линейной комбинацией называется величина

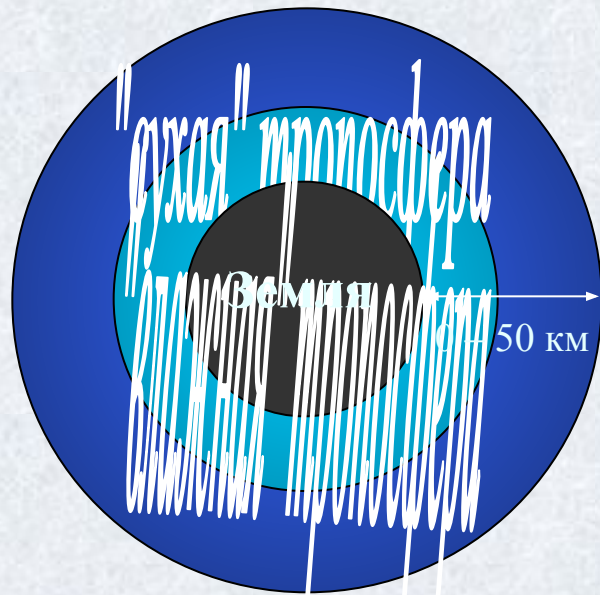
$$\phi_{L_1, L_2} = \alpha \phi_{L_1} + \beta \phi_{L_2}. \quad (12)$$

$$P_{L_1, L_2} = P_{L_1} - \frac{f_{L_2}^2}{f_{L_1}^2} P_{L_2} \quad \text{или} \quad \phi_{L_1, L_2} = \phi_{L_1} - \frac{f_{L_2}}{f_{L_1}} \phi_{L_2} \quad (13)$$

Ионосферно-свободная  
линейная комбинация  
кодовых и фазовых измерений

Название комбинации	$\alpha$	$\beta$	Результирующая длина волны (см)
L1	1	0	19.0
L2	0	1	24.4
Суммарная (narrow line)	1	1	10.7
Разностная (wide line, L5)	1	-1	86.2
Ионосферно-свободная (Iono-free, L3)	1	-0.78	5.4

# Влияние тропосферы на результаты GPS и ГЛОНАСС измерений



## Тропосферные искажения

### Абсолютные

$$\delta P_{Tropo} = 10 \text{ см}$$

даёт

$$\delta b = 0.05 \text{ ppm}$$

### Относительные

$$\delta P_{Tropo} = 1 \text{ см}$$

даёт

$$\delta H = 3 \text{ см}$$

Искажение псевдодальности, обусловленное влиянием тропосферы, может изменяться в пределах от 2.4м ( $z = 0^\circ$ ) до 24.2м ( $z = 85^\circ$ ). Условно тропосфера подразделяется на два слоя – «сухой» и «влажный».

### Искажения в сухом слое:

- составляют 90% от общего искажения псевдодальности в тропосфере;
- главным образом зависят от давления на поверхности Земли;
- медленно изменяются со временем (1см/6ч).

### Искажения во влажном слое:

- по величине  $< 40$  см;
- главным образом зависят от концентрации водяных паров в приземном слое атмосферы;
- быстро изменяются со временем.

# Учет влияния тропосферы на результаты GPS и ГЛОНАСС измерений

## Методы учета тропосферной рефракции

```
graph TD; A[Методы учета тропосферной рефракции] --> B[Моделирование тропосферы]; A --> C[Оценка параметров тропосферы];
```

### Моделирование тропосферы

(менее трудоемко и более просто, но менее точно)

### Оценка параметров тропосферы

(более трудоемко и сложно, но более точно)



# Моделирование тропосферы

К настоящему времени разработано большое количество моделей тропосферы, например, модели Хопфилда (Hopfield, 1969), Саастамойнена (Saastamoinen, 1973) и др. Все модели строятся на основе общей формулы

$$\delta P_{Tropo} = f_{dry}(z) \cdot \delta P_{dry}(0) + f_{wet}(z) \cdot \delta P_{wet}(0). \quad (13)$$

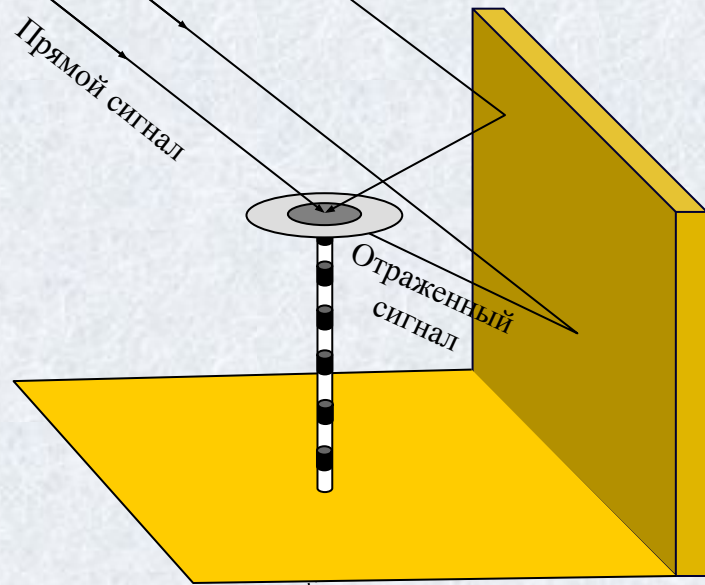
В формуле (13) величины  $\delta P_{dry}$ ,  $\delta P_{wet}$  вычисляются с использованием информации о температуре  $T$ , давлении  $P$  и влажности  $\varepsilon$  в пункте наблюдений. Эта информация может быть получена путем экстраполяции стандартных значений  $T$ ,  $P$  и  $\varepsilon$  в пункте наблюдений или путем метеорологических наблюдений в GPS/ГЛОНАСС пункте.

## Оценивание параметров тропосферы

Искажение псевдодальности из-за влияния тропосферной рефракции может рассматриваться как кусочно-непрерывная линейная функция, либо как случайный (стохастический) процесс. Во втором случае для оценки параметров тропосферы используется фильтр Кальмана, а в первом случае используется формула

$$\delta P_{Tropo} = f_{apr}(z) \cdot \delta P_{apr} + f(z) \cdot \delta P(t). \quad (14)$$

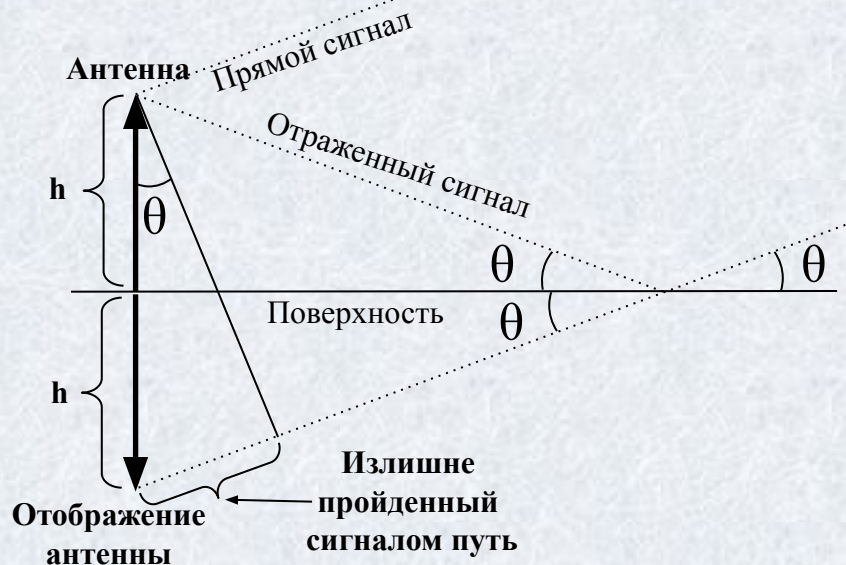
# Влияние эффекта многолучевости на результаты GPS/ГЛОНАСС измерений



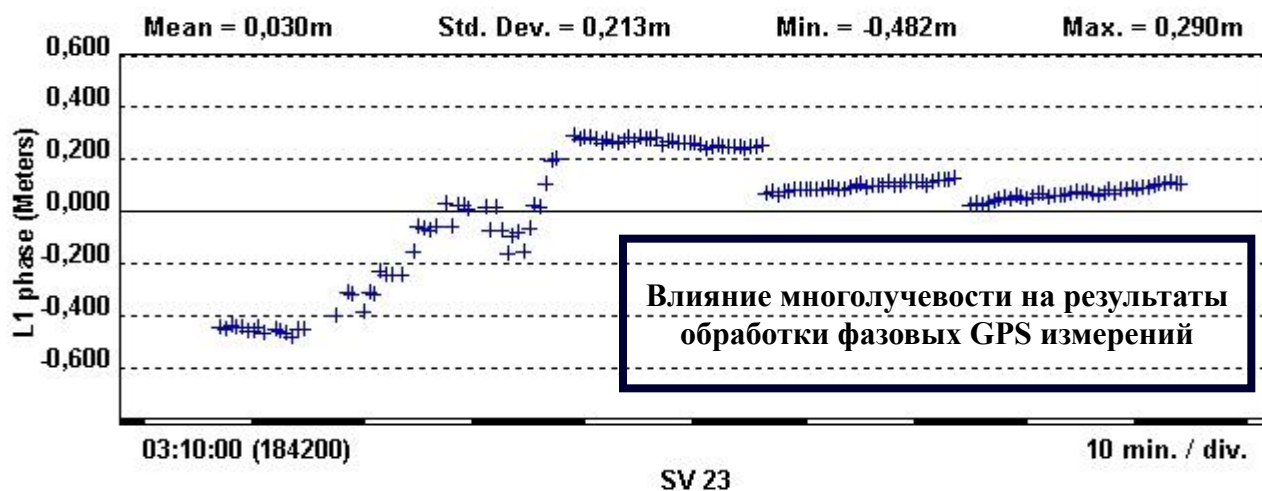
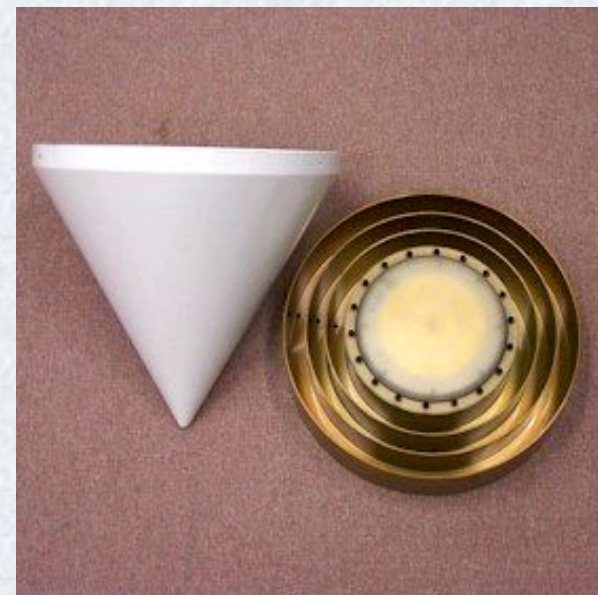
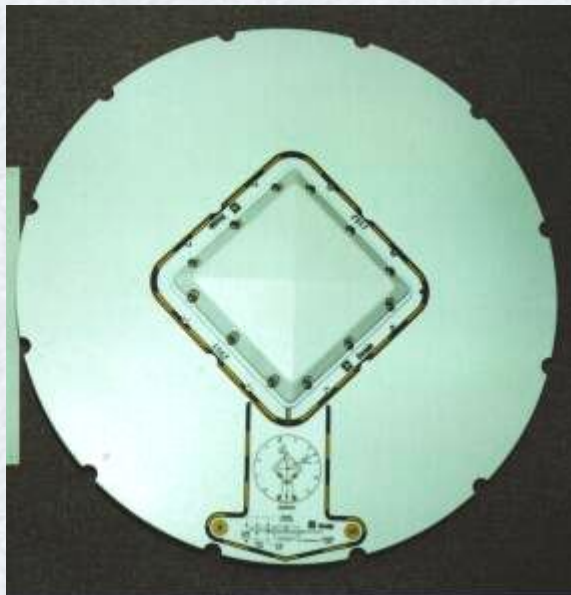
Переотражение сигнала может привести к ошибкам в измерении псевдодальностей по коду и фазе несущей до 20м (код) и несколько см (фаза). Особенно ярко эффект многолучевости проявляется при наблюдении НИСЗ с малыми углами возвышения.

При увеличении высоты антенны над поверхностью величина искажений растет, но период уменьшается и наоборот.

Эффект многолучевости слабо поддается моделированию, но хорошо осредняется за длительный период времени или фильтруется сидерическим фильтром. Хорошо себя зарекомендовали плоские экраны-отсекатели и экраны типа choke-ring.

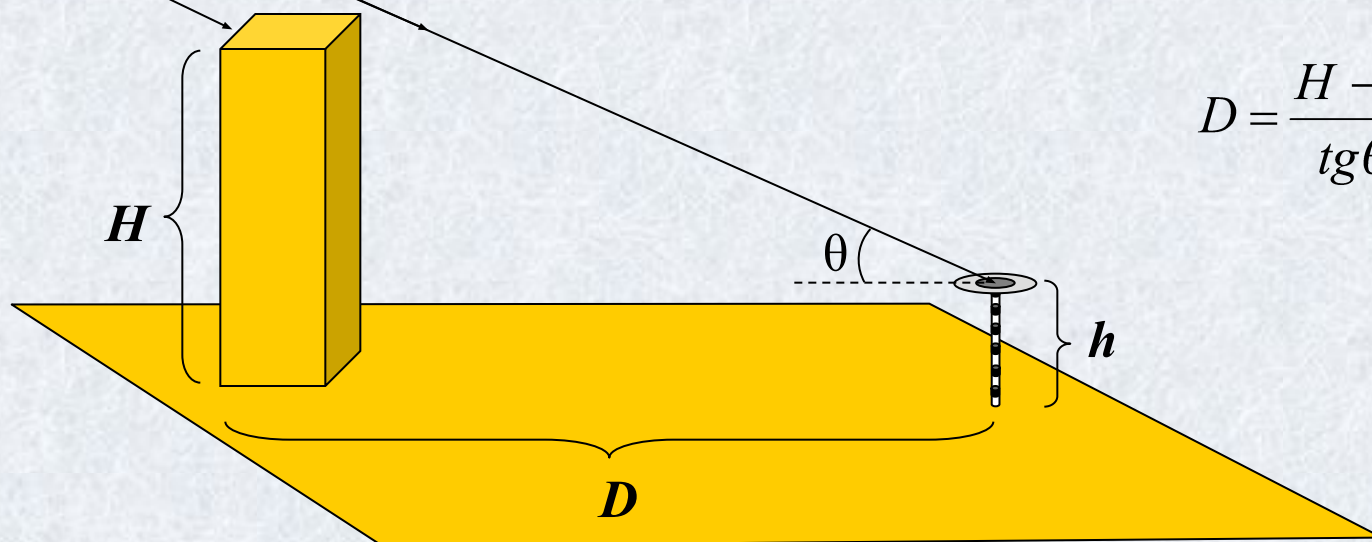


# Пример плоского экрана-отсекателя и экранов типа Choke-Ring





# Препятствия на пути спутникового сигнала



$$D = \frac{H - h}{\operatorname{tg}\theta}. \quad (15)$$

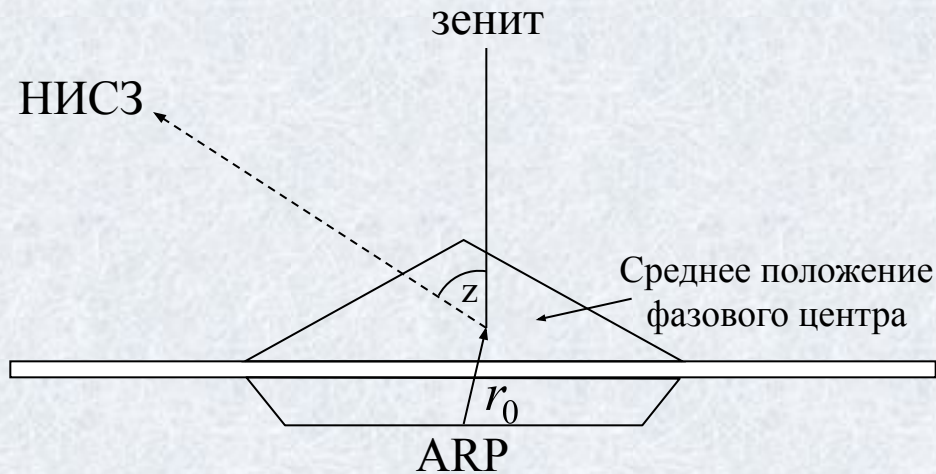
<b>Высота препятствия <math>H</math>, м</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>25</b>
<b>Рекомендуемое расстояние <math>D</math>, м</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>49</b>	<b>77</b>	<b>134</b>

Примечание: таблица составлена для  $h = 1.5$  м и  $\theta = 10^\circ$

Радиоволны способны огибать препятствия, сравнимые с длиной волны сигнала, т.е. около 20-25 см. При измерениях по фазе несущей важно каждое измерение, а при кодовых нет, т.к., например, один символ C/A-code вмещает около 1500 несущих колебаний. Поэтому кодовые наблюдения возможны даже под кронами деревьев.



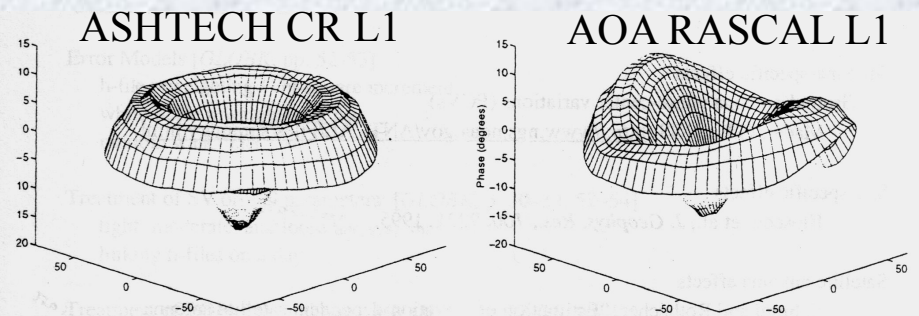
# Влияние нестабильности и неточного знания положения фазового центра антенны на результаты GPS/ГЛОНАСС позиционирования



Вариации фазового центра описываются моделью вида

$$\delta r^{\perp} = r_0^{\perp} + \delta\phi(z, \alpha) \cdot e_{z, \alpha}^{\perp}. \quad (16)$$

Использование при наблюдениях антенн разных типов может привести к ошибкам определения отметок пунктов до 10 см. Вариации фазового центра приводят к искажению длин длинных базовых линий на величину до 0.016ppm

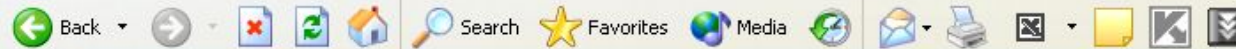


Графики вариации фазы принимаемого сигнала для двух типов антенн

# Калибровка GPS/ГЛОНАСС

Global Positioning System (GPS) Antenna Calibration - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help



Address <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>



## GPS Antenna Calibration



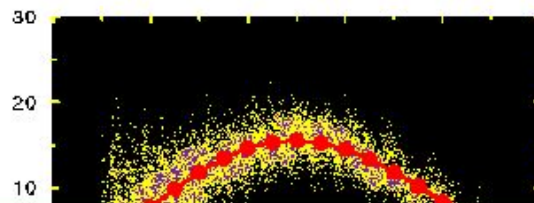
### Calibrated Antennas:

- [AeroAntenna](#)
- [Allen Osborne Associates](#)
- [Ashtech](#)
- [Javad](#)
- [Leica](#)
- [Macrometer](#)
- [Micro Pulse](#)
- [NavCom](#)
- [NovAtel](#)
- [Sensor Systems](#)
- [Sokkia](#)
- [Spectra Precision](#)
- [Thales Navigation](#)
- [Topcon](#)
- [Trimble](#)
- [GPS Block II A Satellite](#)



Antenna testing facility in Corbin, VA

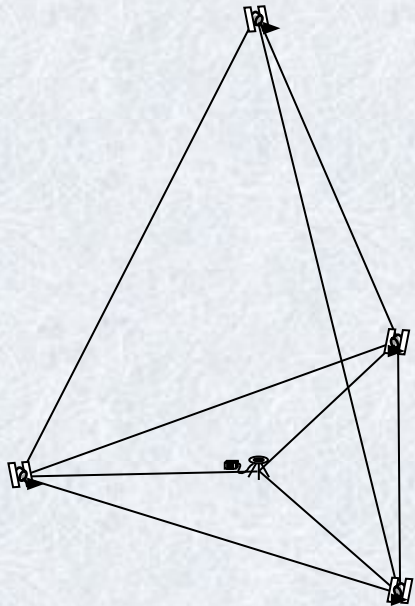
Phase Center Variation (mm)



### Antenna Calibration Resources

- [Calibration Format Information](#)
- [GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey \[PDF Version\]](#) by Gerald L. Mader

# Геометрический фактор (DOP) и его влияние на результаты GPS/ГЛОНАСС позиционирования



DOP является связующим звеном между точностью псевдодальномерных измерений  $\sigma_{mes}$  и точностью позиционирования  $\sigma$ :

$$\sigma = DOP \sigma_{mes} \cdot (17)$$

Матрица весовых коэффициентов координат точки

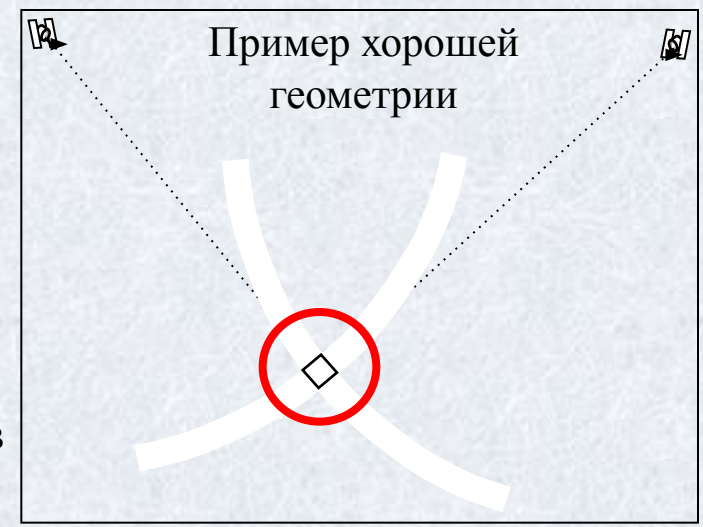
PDOP	Вербальная характеристика
$\leq 4$	хорошо
5-7	удовлетворительно
$\geq 7$	плохо

$$Q_X = \begin{pmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{XY} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{XZ} & q_{YZ} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{Xt} & q_{Yt} & q_{Zt} & q_{tt} \end{pmatrix} \cdot (18)$$

$$GDOP = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}}; \quad HDOP = \sqrt{q_{nn} + q_{ee}};$$

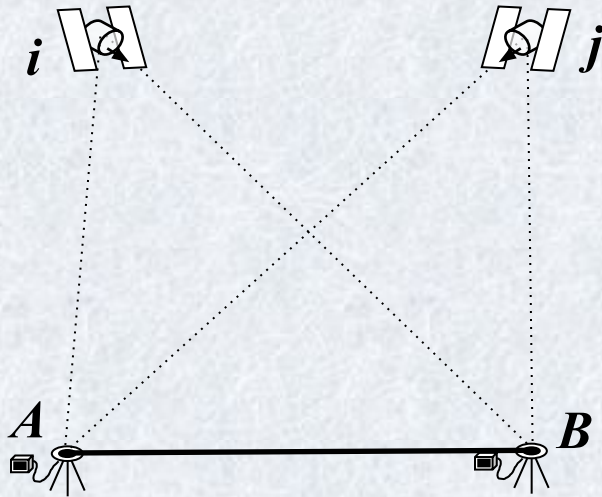
$$PDOP = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}}; \quad VDOP = \sqrt{q_{uu}}.$$

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}};$$





# Формирование разностей спутниковых измерений



Пусть на пунктах  $A$  и  $B$  одновременно измеряются фазовым методом псевдодальности до спутников  $i$  и  $j$ , тогда для фиксированного момента времени  $t$  можем записать два уравнения

$$dP_{Ai} = \rho_{Ai} - N_{Ai}\lambda + \delta P_A + \delta P_i + \delta P_{Ai}. \quad (19)$$

$$dP_{Bi} = \rho_{Bi} - N_{Bi}\lambda + \delta P_B + \delta P_i + \delta P_{Bi}. \quad (20)$$

Вычитая из уравнения (20) уравнение (19) получаем выражение для *первых* разностей

$$dP_{ABi} = \rho_{ABi} - N_{ABi}\lambda + \delta P_{AB} + \delta P_{ABi}. \quad (21)$$

Если в момент  $t$  наблюдается еще один спутник  $j$ , образуем для него уравнение *первых* разностей

$$dP_{ABj} = \rho_{ABj} - N_{ABj}\lambda + \delta P_{AB} + \delta P_{ABj}. \quad (22)$$

Вычитая из уравнения (22) уравнение (21) получаем выражение для *вторых* разностей

$$dP_{ABij} = \rho_{ABij} - N_{ABij}\lambda + \delta P_{ABij}. \quad (23)$$

Если спутники  $i$  и  $j$  наблюдаются в два момента времени (эпохи)  $t_1$  и  $t_2$ , то записывая уравнения *вторых* разностей для обеих эпох и находя их разность, получаем уравнение *третьих* разностей

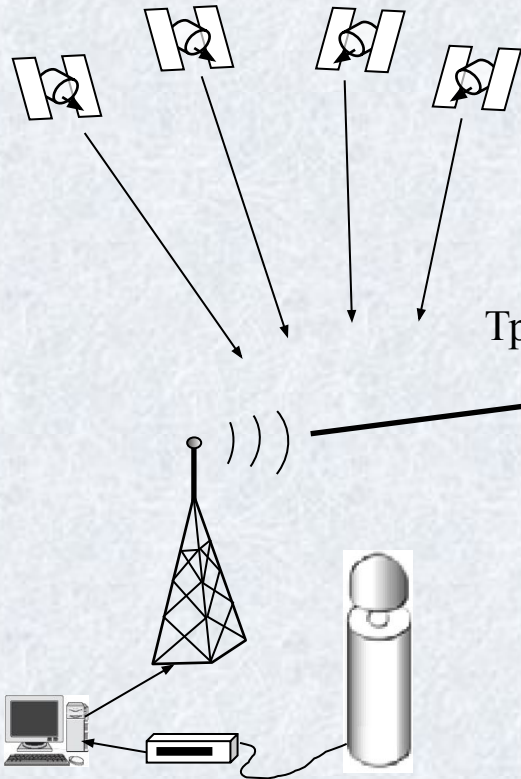
$$dP_{ABij}(t_1, t_2) = \rho_{ABij}(t_1, t_2) + \delta P_{ABij}(t_1, t_2). \quad (24)$$



# Способы и режимы позиционирования

АБСОЛЮТНЫЕ (Single point positioning)	ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ (DGPS, DGLONASS)	ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ	
		Статические (Static positioning)	Кинематические (Kinematic positioning)
<b>Реального времени</b> (Real Time) <u>Точность</u> – десятки метров, в лучшем случае 3-5 метров	<b>Реального времени</b> (Real Time) <u>Точность</u> – десятки метров, в лучшем случае метры-дицметры	<b>Статика</b> (Static) <u>Точность</u> – сантиметры-миллиметры	<b>Стой и иди</b> (Stop and Go) <u>Точность</u> – сантиметры
<b>Постобработка</b> (Postprocessing) <u>Точность</u> – метры, в лучшем случае лучше метра	<b>Постобработка</b> (Postprocessing) <u>Точность</u> – десятки метров, в лучшем случае метры-дицметры	<b>Быстрая статика</b> (Fast, rapid static) <u>Точность</u> – сантиметры	<b>Непрерывная</b> (Continuous) <u>Точность</u> – сантиметры
		<b>Псевдостатика или реокупация</b> (Pseudostatic, reoccupation) <u>Точность</u> – сантиметры	<b>Реального времени</b> (Real Time Kinematic-RTK) <u>Точность</u> – сантиметры

# Дифференциальное позиционирование



Дифференциальное позиционирование может осуществляться по кодовым и фазовым измерениям (RTK) в режиме реального времени

Трансляция поправок

$\delta P_i$



Вычисление скорректированных псевдодальностей

$$dP_{Rover-j}^{Corr} = \delta P_j + dP_{Rover-j}^{Observ}$$

**Контрольно-корректирующая (ККС) или базовая станция (БС)**

Вычисление поправок (коррекций) к псевдодальностям

$$\delta P_j = dP_{KKS-j}^{Theor} - dP_{KKS-j}^{Observ}$$

DGPS системы по охвату территории делятся на:

- **Локальные** (создаются пользователем)
- **Региональные** (WAAS, EGNOS, MSAS, SNAS, OMNISTAR, RACALL)
- **Глобальные** (GDGPS (JPL NASA) и StarFire (NavCom))

# Способы инициализации кинематики

*Цель инициализации* – разрешение неоднозначности фазовых измерений.

1). *По известной точке* (координаты которой в СК WGS-84 определены с точностью не хуже 5см).

2). *Статическая инициализация.*

3). *ON THE FLY* – на лету (может быть использована только с двухчастотными приемниками).

4). *ANTENNA SWAPPING* – способ перестановки антенн.

# Особенности построения геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей

Известное правило геодезии – «от общего к частному»  
– полностью справедливо при проектировании и построении геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей!

## Методы построения геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей

### Сетевой метод

(требует больших затрат временных и материальных ресурсов, а также денежных средств; обеспечивает наличие избыточных измерений)

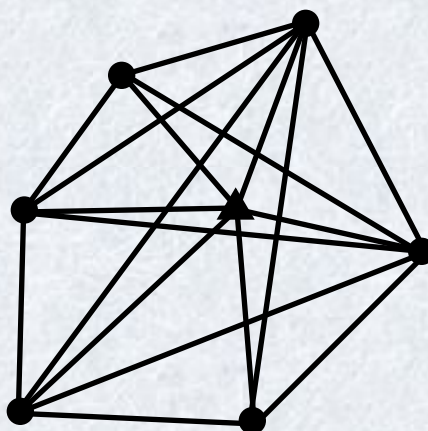
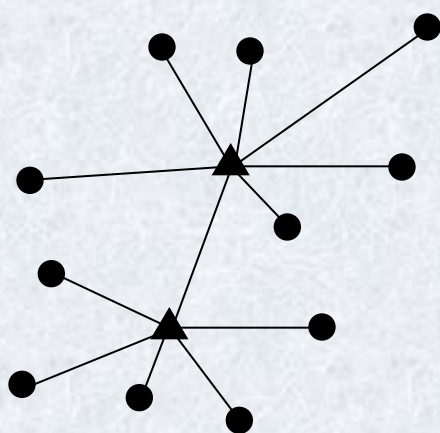
### Лучевой метод

(более экономически выгоден, избыточные измерения отсутствуют)

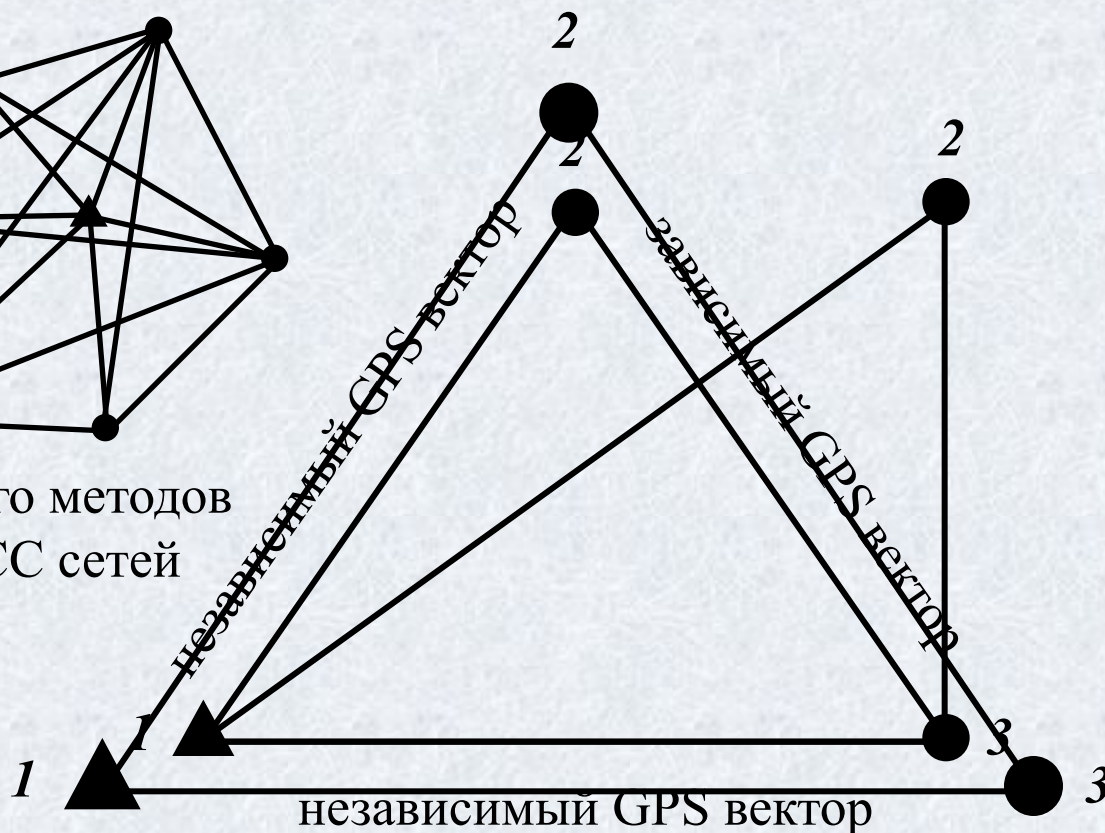


# Особенности построения геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей

Необходимо стремиться к выполнению независимых и однородных измерений в спутниковой сети, а также включению в ее состав достаточного количества избыточных измерений!



Примеры лучевого и сетевого методов построения GPS/ГЛОНАСС сетей



# Общая концепция уравнивания GPS/ГЛОНАСС сетей

Пусть измерено  $n$  величин, истинные значения которых  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , а измеренные значения равны  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , причем количество измерений  $n$  избыточно по отношению к числу определяемых параметров  $r$ .

Теоретически имеем

$$\begin{aligned} \varphi_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0, \\ &\dots \end{aligned} \quad (29)$$

$$\varphi_r(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0.$$

Практически имеем

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= W_1, \\ &\dots \end{aligned} \quad (30)$$

$$\varphi_r(x_1, x_2, \dots, x_n) = W_r.$$

Для того, чтобы устранить невязки  $W_1, W_2, \dots, W_r$  необходимо исправить измерения поправками  $v_1, v_2, \dots, v_n$ . Тогда получим

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_1 + v_1, x_2 + v_2, \dots, x_n + v_n) &= 0, \\ &\dots \end{aligned} \quad (31)$$

$$\varphi_r(x_1 + v_1, x_2 + v_2, \dots, x_n + v_n) = 0.$$

Решение системы уравнений (31) выполняется по МНК под условием  $[pv^2] = \min$ , полагая, что ошибки измерений подчиняются нормальному закону распределения.

Среднеквадратические ошибки измерений, необходимые для вычисления априорных весов измерений, используемых при уравнивании, получают из выражений

$$\begin{aligned} \sigma_i &= a + bD_i \\ p_i &= (\sigma_0 / \sigma_i)^2. \end{aligned}$$

# Условия, возникающие в GPS/ГЛОНАСС сетях

В качестве *измеренных величин* при уравнивании GPS/ГЛОНАСС сетей обычно используются компоненты базовых линий  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ .

В GPS/ГЛОНАСС сетях возникают следующие виды условий

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^2 \Delta x_i = 0,$$

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^2 \Delta y_i = 0,$$

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^2 \Delta z_i = 0,$$

Замкнутый  
векторный ход  
(полигон)

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^2 \Delta x_i - (x_{II} - x_I) = 0,$$

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^2 \Delta y_i - (y_{II} - y_I) = 0,$$

$$\frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^2 \Delta z_i - (z_{II} - z_I) = 0,$$

Векторный ход  
между двумя  
пунктами с  
известными  
координатами

## Цели уравнивания геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей

**Задача уравнивания возникает только при наличии  
в сети избыточно измеренных величин!!!**

### Цели уравнивания спутниковых измерений:

1. Поиск и исключение грубых ошибок в результатах измерений;
2. Оценка и соответствующее распределение случайных ошибок измерений.
3. Получение единственного набора значений определяемых параметров;
4. Оценка точности полученных значений определяемых параметров;



# Виды ошибок GPS/ГЛОНАСС измерений

## Грубые ошибки (промахи)

### *Примеры:*

- ввод ошибочных координат пункта;
- ввод ошибочного названия пункта;
- ошибочное измерение высоты антенны;

## Систематические ошибки

### *Примеры:*

- влияния внешней среды при непродолжительных сеансах наблюдений (многолучевость, атмосферная рефракция и т. д.);
- указание неправильного метода измерения высоты антенны;

## Случайные ошибки

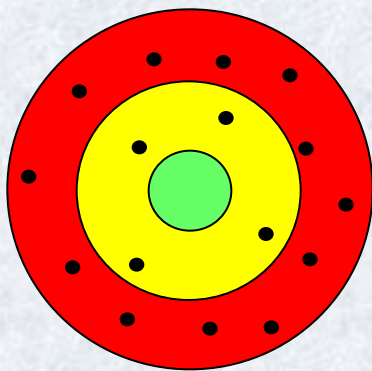
### *Примеры:*

- атмосферная рефракция при длительных периодах измерений;

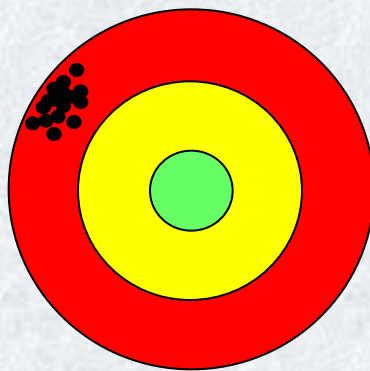
# Абсолютная точность и внутренняя сходимость результатов GPS/ГЛОНАСС измерений

**Абсолютная точность** (accuracy) характеризует степень близости результатов измерений к их истинному значению.

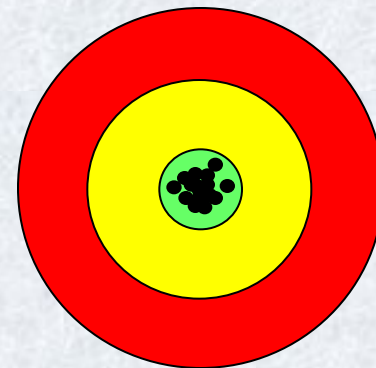
**Внутренняя сходимость** (precision) характеризует степень близости результатов измерений друг к другу или их среднему значению.



Плохая абсолютная  
точность и  
внутренняя  
сходимость  
результатов



Хорошая  
внутренняя  
сходимость, но  
плохая абсолютная  
точность  
результатов



Хорошая  
внутренняя  
сходимость и  
абсолютная  
точность  
результатов

# Оценка точности компонент базовой линии по внутренней сходимости результатов GPS измерений

Baseline report - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Back Forward Stop Home Search Favorites Media Mail Print TV

Address C:\Trimble Geomatics Office\Projects\STUDENT\Reports\Baseline\FrameB3.html Go

[Back to Processing Summary](#)

[Baseline Summary](#)

[Baseline Components](#)

- [Standard Errors](#)
- [Covariance Matrix](#)

[Occupations](#)

[Tracking Summary](#)

[Residuals](#)

[Processing Style](#)

- [Static](#)
- [Kinematic](#)
- [Global](#)
- [Quality](#)
- [Tropo](#)
- [Iono](#)
- [Events](#)
- [OTF Search](#)

[Highlight in Trimble Geomatics Office](#)

<b>Northing</b>	43 18 31,911m	<b>Latitude</b>	43 18 41,45382°N	<b>Latitude</b>	43 18 41,45382°N
<b>Easting</b>	28780,996m	<b>Longitude</b>	131°54'55,18422"E	<b>Longitude</b>	131°54'55,18422"E
<b>Elevation</b>	126,693m	<b>Height</b>	152,758m	<b>Height</b>	152,758m

<b>Baseline:</b>					
<b>Δ Northing</b>	-2123,051m	<b>NS Fwd Azimuth</b>	202°05'47"	<b>Δ X</b>	-359,836m
<b>Δ Easting</b>	-863,621m	<b>Ell. Distance</b>	2291,983m	<b>Δ Y</b>	1691,052m
<b>Δ Elevation</b>	61,983m	<b>Δ Height</b>	61,996m	<b>Δ Z</b>	-1506,018m

### Standard Errors

<b>Baseline Errors:</b>					
<b>σ Δ Northing</b>	0,001m	<b>σ NS Fwd Azimuth</b>	0,034 seconds	<b>σ Δ X</b>	0,001m
<b>σ Δ Easting</b>	0,000m	<b>σ Ell.Distance</b>	0,000m	<b>σ Δ Y</b>	0,002m
<b>σ Δ Elevation</b>	0,003m	<b>σ Δ Height</b>	0,003m	<b>σ Δ Z</b>	0,002m

### Aposteriori Covariance Matrix

	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>X</b>	2,182e-6m		
<b>Y</b>	-2,230e-6m	2,505e-6m	
<b>Z</b>	-2,649e-6m	2,882e-6m	3,791e-6m



# Поправки, нормальное распределение поправок, нормированные поправки

**Поправка** – это разность между уравненным значением измеряемой величины и ее отдельным значением, полученным в ходе наблюдений или их обработки.

**Нормированная поправка** – это поправка деленная на среднеквадратическую ошибку ее определения.

$$\tau_i = \frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma}_i}. \quad (25)$$

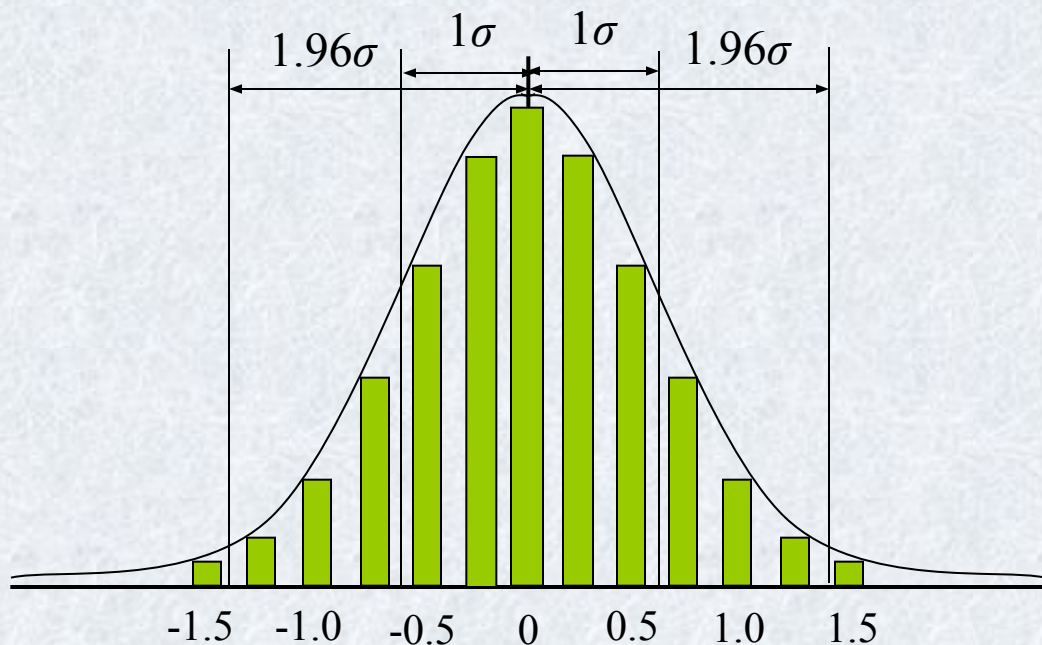


График нормального распределения поправок

Величина  $\sigma$  среднеквадратической ошибки уравненного значения искомой величины гарантирует, что при бесконечно большом количестве измерений, выполненных в одинаковых условиях, 68% всех возможных измеренных значений данной величины будут находиться в интервале  $(-\sigma; \sigma)$ .



# Ковариационная матрица. Среднеквадратическая ошибка единицы веса (Reference Factor).

Структура ковариационной матрицы  $i$ -й базовой линии, полученная в результате постобработки GPS или ГЛОНАСС измерений

$$\mathbf{K}_{D_i} = \begin{pmatrix} \sigma_{\Delta x_i}^2 & r_{\Delta x_i \Delta y_i} \sigma_{\Delta x_i} \sigma_{\Delta y_i} & r_{\Delta x_i \Delta z_i} \sigma_{\Delta x_i} \sigma_{\Delta z_i} \\ r_{\Delta y_i \Delta x_i} \sigma_{\Delta y_i} \sigma_{\Delta x_i} & \sigma_{\Delta y_i}^2 & r_{\Delta y_i \Delta z_i} \sigma_{\Delta y_i} \sigma_{\Delta z_i} \\ r_{\Delta z_i \Delta x_i} \sigma_{\Delta z_i} \sigma_{\Delta x_i} & r_{\Delta z_i \Delta y_i} \sigma_{\Delta z_i} \sigma_{\Delta y_i} & \sigma_{\Delta z_i}^2 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Реально в результате постобработки или уравнивания GPS/ГЛОНАСС измерений непосредственно получается матрица весовых коэффициентов  $\mathbf{Q}$  и среднеквадратическая ошибка единицы веса  $\sigma_0$ . Структура матрицы  $\mathbf{Q}$  для  $i$ -й базовой линии показана ниже

$$\mathbf{Q}_{D_i} = \sigma_0^{-2} \mathbf{K}_{D_i} = \begin{pmatrix} q_{\Delta x_i \Delta x_i} & q_{\Delta x_i \Delta y_i} & q_{\Delta x_i \Delta z_i} \\ q_{\Delta y_i \Delta x_i} & q_{\Delta y_i \Delta y_i} & q_{\Delta y_i \Delta z_i} \\ q_{\Delta z_i \Delta x_i} & q_{\Delta z_i \Delta y_i} & q_{\Delta z_i \Delta z_i} \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{Q}_{D_i}^{-1} \hat{\mathbf{V}}}{n - k}}. \quad (28)$$

# Математический смысл среднеквадратической ошибки единицы веса (СКОЕВ)

## Можно показать, что:

- если  $СКОЕВ=1$ , ошибки уравненных измерений оценены совершенно точно, т.е. гарантируется корректность соотношения между поправками и их ошибками;
- если  $СКОЕВ<1$ , ошибки уравненных измерений переоценены;
- если  $СКОЕВ>1$ , ошибки уравненных измерений недооценены;

Важное замечание: если  $СКОЕВ \gg 1$ , в измерениях присутствует грубая ошибка (ошибки).



# Результаты оценки точности компонент базовых линий (краткий отчет)

Baseline Summary - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Address C:\Trimble Geomatics Office\Projects\STUDENT\Reports\Baseline\Summary.html

Distance Units Meters  
Height Units Meters

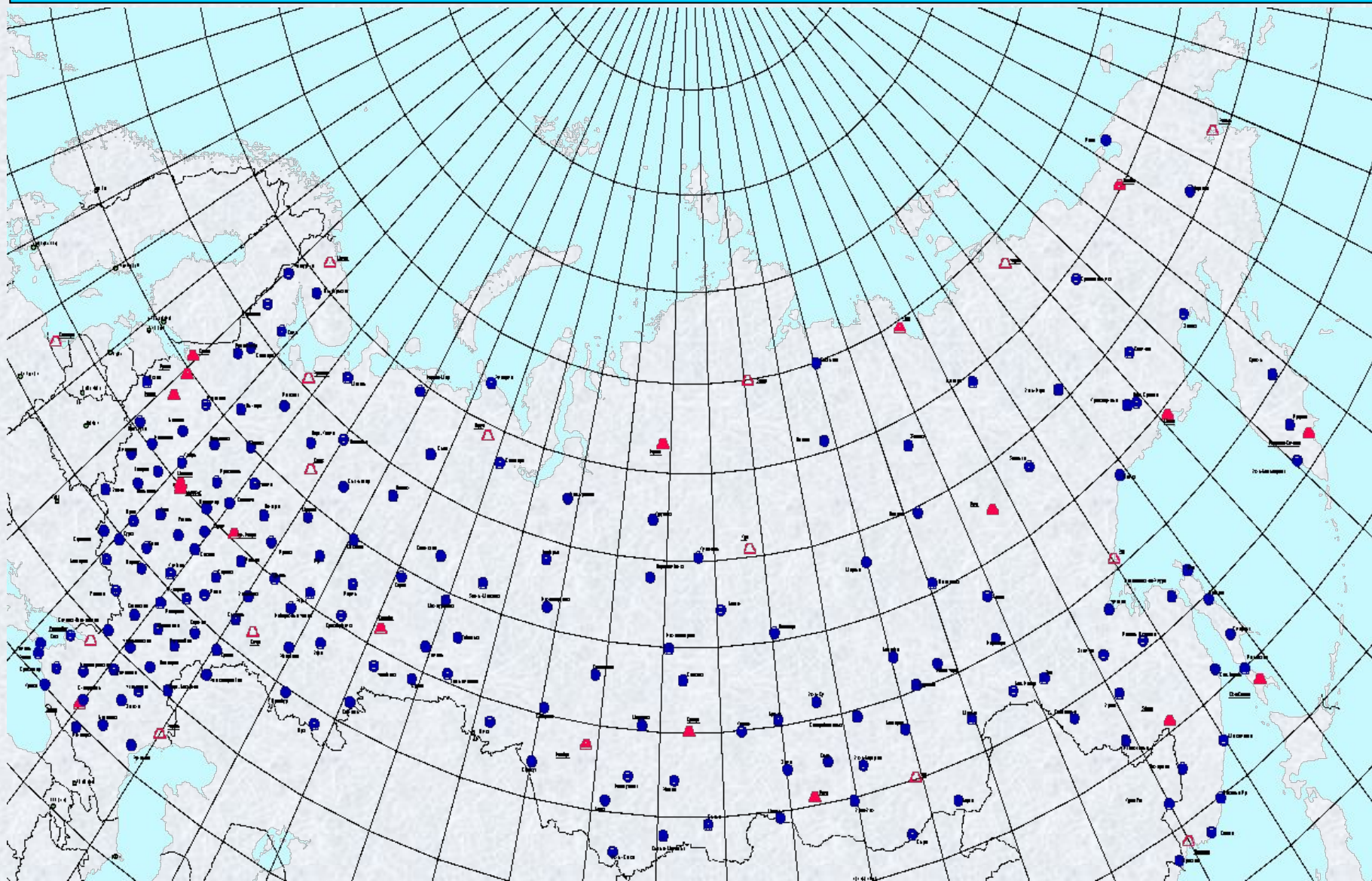
### Processing Summary

ID	From	To	Baseline Length	Solution Type	Ratio	Reference Variance	RMS
<a href="#">B19</a>	ZVEROSOVHOZ	OKEANSKAYA	4973,608m	L1 fixed	5,844	16,013	0,013
<a href="#">B13</a>	OKEANSKAYA	KARYERNAYA	8149,643m	L1 fixed	5,051	15,626	0,015
<a href="#">B16</a>	ZVEROSOVHOZ	KARYERNAYA	5899,830m	L1 fixed	26,447	16,948	0,014
<a href="#">B21</a>	ZVEROSOVHOZ	SEDANKA	3693,701m	L1 fixed	30,395	11,339	0,011
<a href="#">B2</a>	VLADIVOSTOK	SEDANKA	2388,803m	L1 fixed	3,565	8,453	0,010
<a href="#">B7</a>	VLADIVOSTOK	SEDANKA	2388,778m	L1 fixed	12,618	4,505	0,007
<a href="#">B14</a>	SEDANKA	KARYERNAYA	3886,828m	L1 fixed	63,690	10,927	0,012
<a href="#">B5</a>	VLADIVOSTOK	KARYERNAYA	5924,663m	L1 fixed	45,073	9,545	0,011
<a href="#">B9</a>	VLADIVOSTOK	ZVEROSOVHOZ	5233,436m	L1 fixed	24,686	10,276	0,010
<a href="#">B3</a>	VLADIVOSTOK	SHOSSE-NOV	2292,865m	L1 fixed	11,995	6,858	0,009
<a href="#">B8</a>	VLADIVOSTOK	SHOSSE-NOV	2292,859m	L1 fixed	3,788	5,226	0,009
<a href="#">B20</a>	SEDANKA	SHOSSE-NOV	3553,484m	L1 fixed	32,640	9,507	0,010
<a href="#">B22</a>	SEDANKA	SHOSSE-NOV	3553,516m	L1 fixed	9,579	14,992	0,013
<a href="#">B6</a>	VLADIVOSTOK	OKEANSKAYA	10061,530m	iono free fixed	3,791	5,179	0,025
<a href="#">B15</a>	KARYERNAYA	SHOSSE-NOV	5738,151m	L1 fixed	30,918	13,253	0,014
<a href="#">B17</a>	OKEANSKAYA	SEDANKA	8072,636m	L1 fixed	6,139	14,345	0,013
<a href="#">B18</a>	OKEANSKAYA	SHOSSE-NOV	11620,340m	iono free fixed	8,058	5,646	0,025
<a href="#">B24</a>	ZVEROSOVHOZ	SHOSSE-NOV	7097,242m	L1 fixed	3,194	15,848	0,013

[Back to top](#)

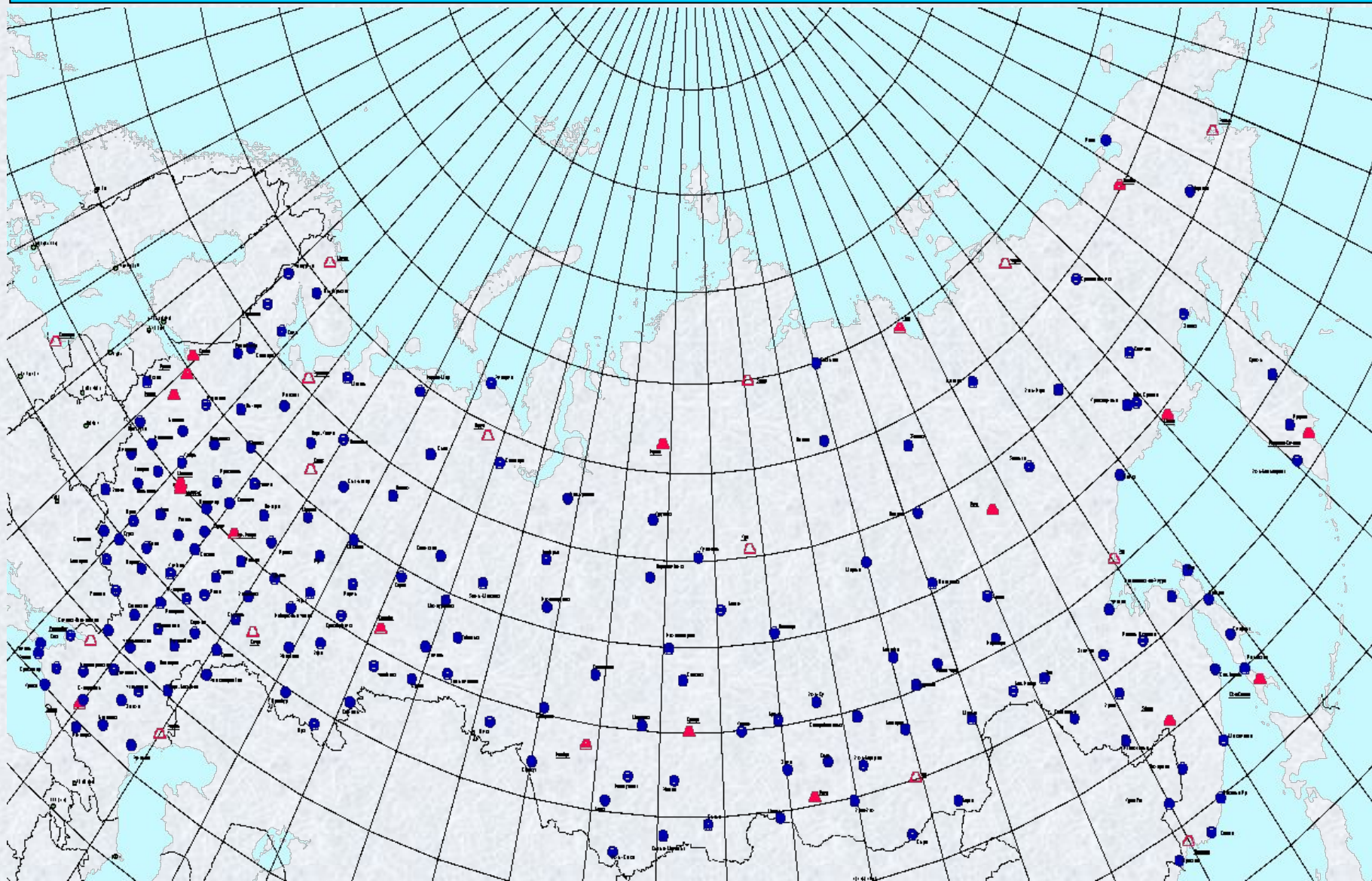


# Схема расположения пунктов ФАГС (1999-2003гг.)





# Схема расположения пунктов ФАГС (1999-2003гг.)



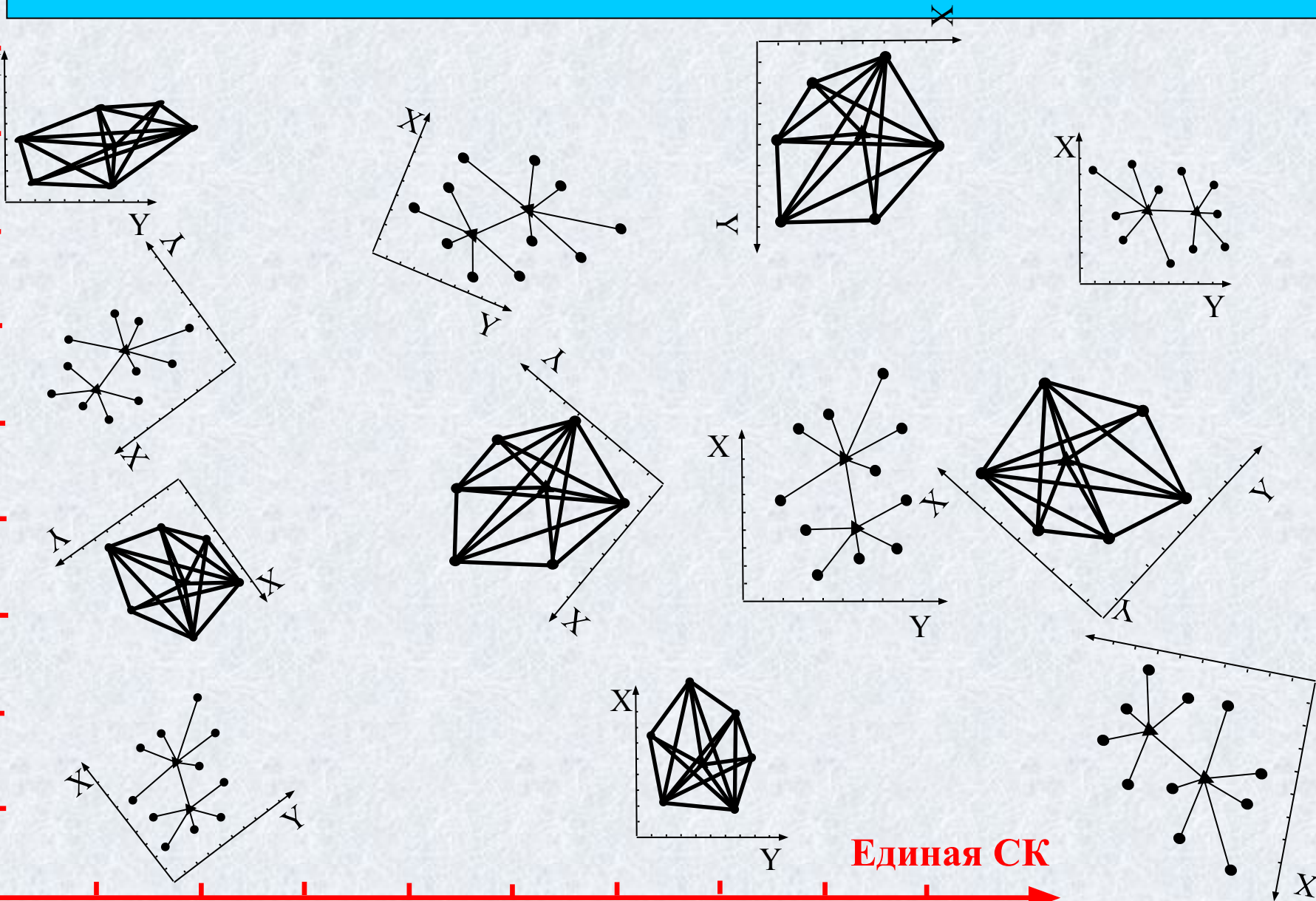


# Схема расположения пунктов ОГС

## Опорная гравиметрическая сеть (фундаментальная и I класса)



# Существующий порядок обработки GPS измерений





# «Идеальная» схема обработки GNSS измерений

## Уравнивание сети в единой геоцентрической СК (например, ITRF2005)

*Используется для:*

- контроля качества и оценки точности выполненных GNSS измерений.
- получения высокоточных координат пунктов сети в единой общемировой СК
- хранения, сопоставления и обработки данных GNSS измерений, полученных в разных сетях, различным оборудованием и в разные эпохи наблюдений.



## Перевычисление полученных данных в местные СК по точным формулам

*Используется для:*

- получения и оценки точности координат пунктов сети в системе координат пользователя;
- удобства дальнейшей обработки и представления ее результатов



# Уравнивание геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей



## Свободное (минимально ограниченное) уравнивание

*Используется для:*

- контроля качества и оценки точности выполненных GPS/ГЛОНАСС измерений.



## Полностью ограниченное уравнивание

*Используется для:*

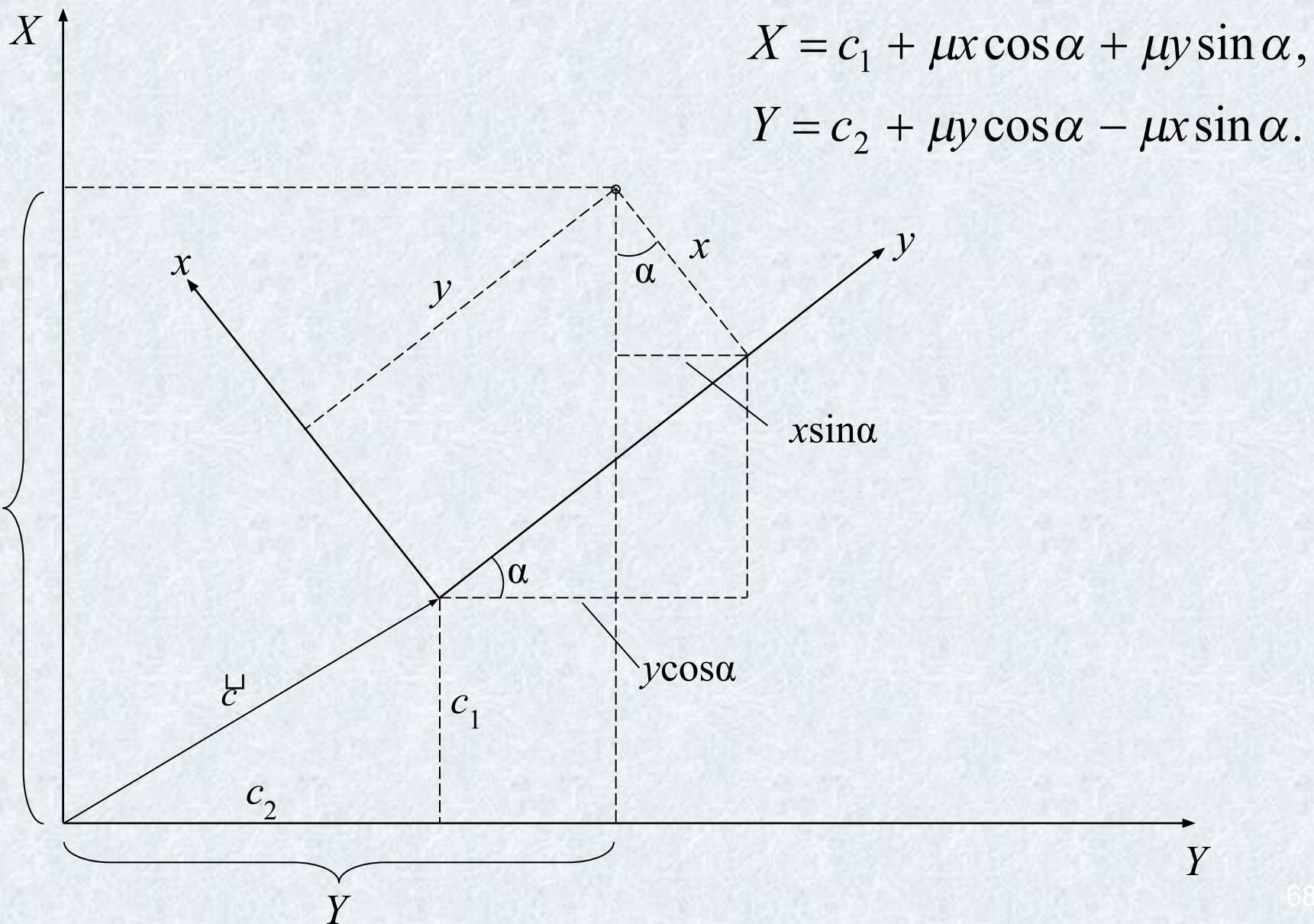
- получения и оценки точности координат пунктов сети в системе координат пользователя;
- проверки качества опорных пунктов, фиксирующих систему координат пользователя;
- определения параметров преобразования (трансформации) сети из системы координат WGS-84 в систему координат пользователя.

# Трансформация результатов GPS/ГЛОНАСС измерений в заданную систему координат

*Цель трансформации* – преобразование результатов GPS/ГЛОНАСС позиционирования в заданную систему координат, определяемую пользователем.

Как правило, трансформация плановых координат и высот пунктов GPS/ГЛОНАСС сети осуществляется отдельно.

# Трансформация плановых координат



# Одна из возможных схем трансформации плановых координат из системы WGS-84 в систему координат пользователя

Преобразование геоцентрических координат пунктов  $(X, Y, Z)$ , определенных в системе координат WGS-84 (GPS) или ПЗ-90 (ГЛОНАСС), в геодезические координаты  $(B, L, H)$



Преобразование геодезических координат пунктов  $(B, L)$  в плоские прямоугольные координаты  $(x, y)$  в требуемой проекции

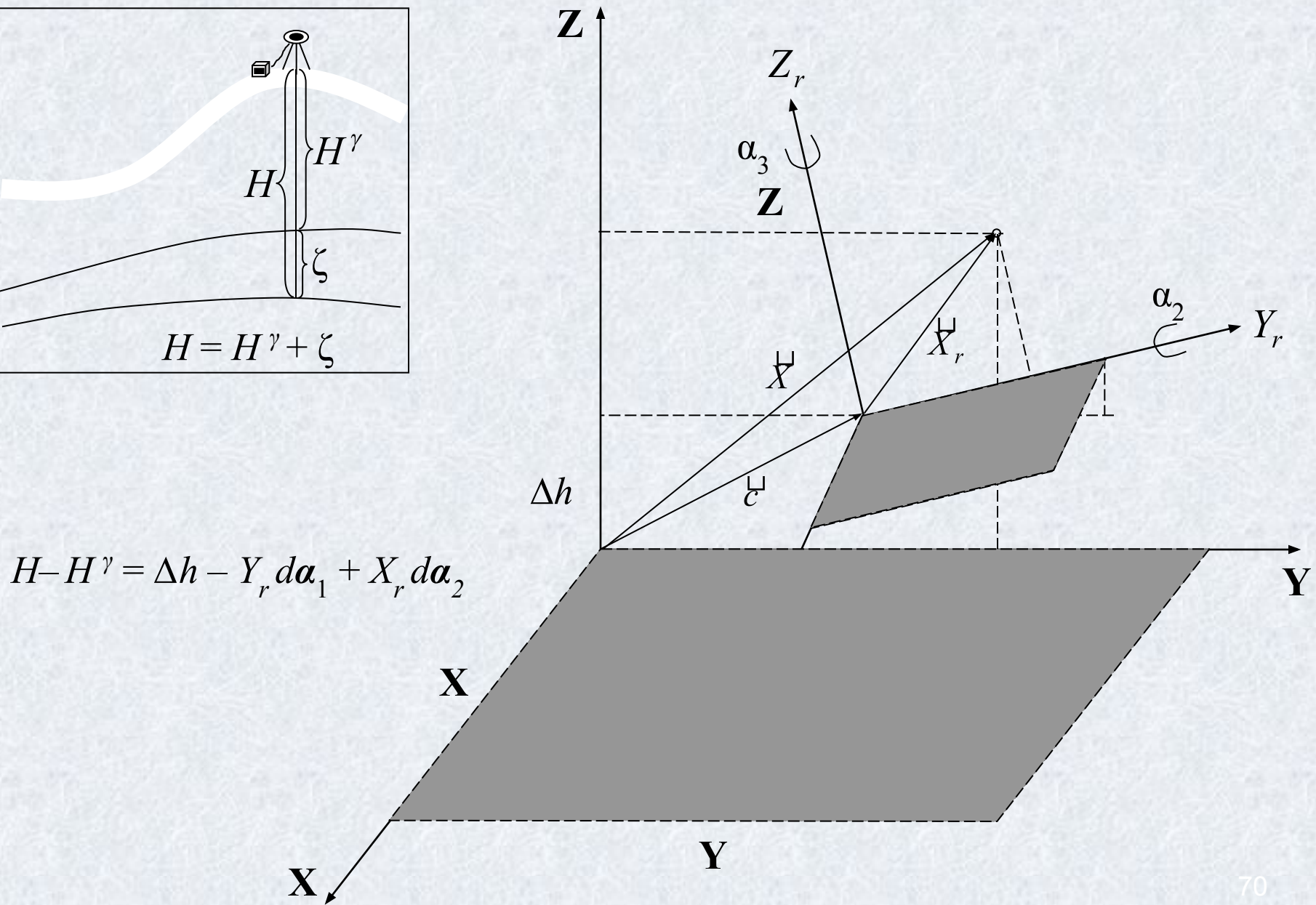
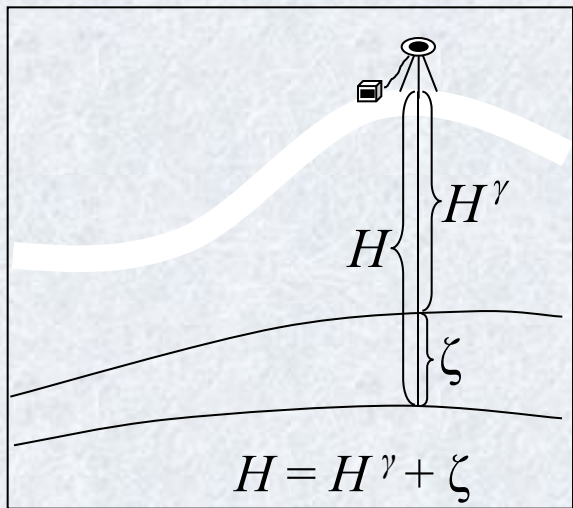


Вычисление по совмещенным пунктам параметров преобразования координат  $(x, y)$  в систему координат пользователя (разворот, масштабный коэффициент, смещение начал отсчета).

Для определения параметров преобразования требуется 2 совмещенных пункта. Если совмещенных точек больше, параметры преобразования определяются по МНК с оценкой точности.



# Трансформация высот



# Одна из возможных схем трансформации высот из системы WGS-84 в систему координат пользователя

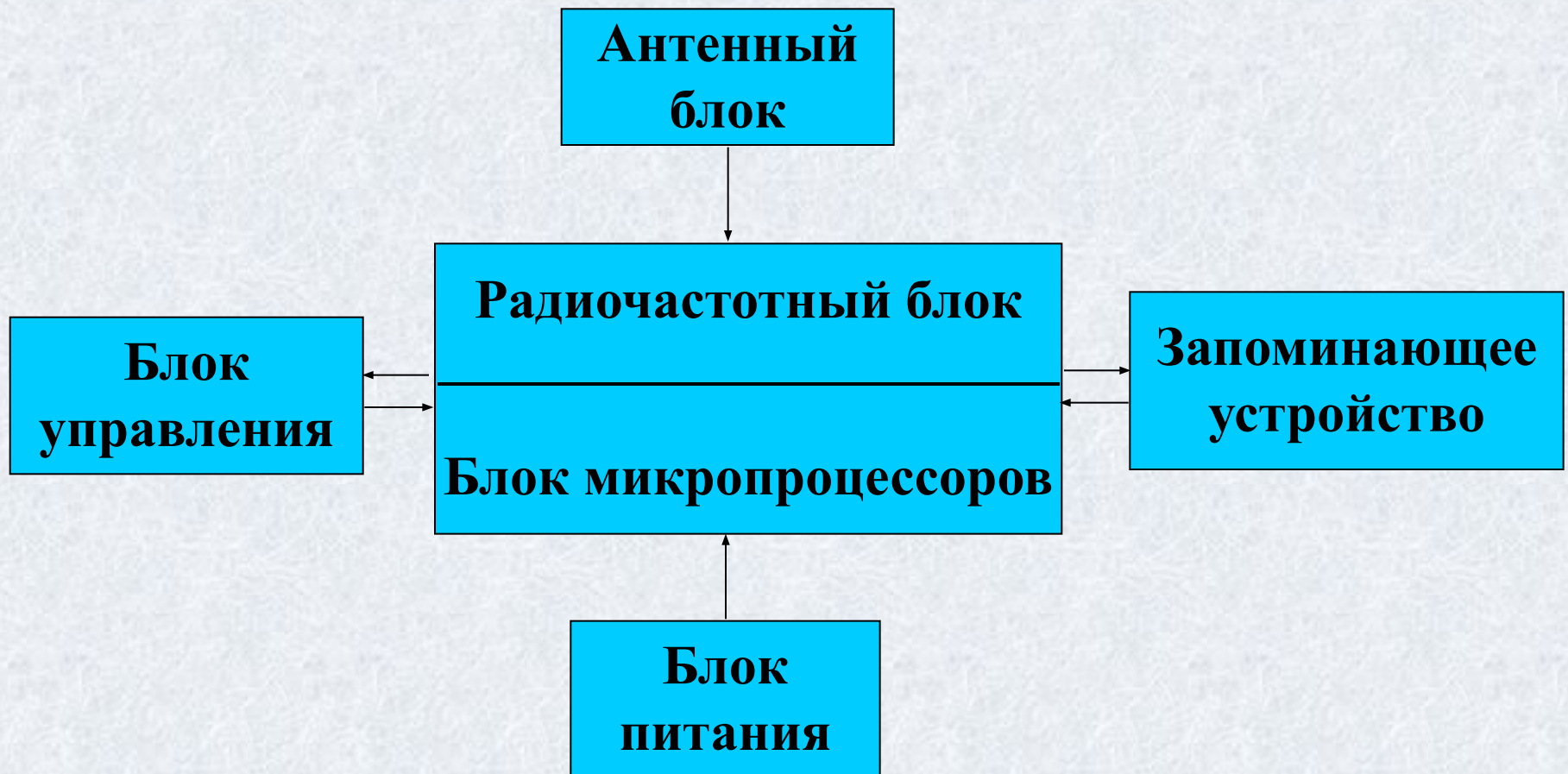
Преобразование геоцентрических координат пунктов  $(X, Y, Z)$ , определенных в системе координат WGS-84 (GPS) или ПЗ-90 (ГЛОНАСС), в геодезические координаты  $(B, L, H)$



Вычисление по совмещенным пунктам параметров преобразования (два угла разворота, вертикальное смещение) геодезических высот  $H$  в нормальные высоты  $H'$ .

Для определения параметров преобразования требуется 3 совмещенных пункта. Если совмещенных точек больше, параметры преобразования определяются по МНК с оценкой точности.

# Упрощенная принципиальная схема устройства и функционирования спутникового приемника



# Классификация спутникового оборудования

## Системная классификация.

- 1) Односистемные (обычно ориентированы на GPS);
- 2) Двухсистемные (GPS и ГЛОНАСС).

## Классификация по видам принимаемого сигнала.

- 1) Кодовые (C/A-code), одночастотные;
- 2) Кодовые двухчастотные (C/A-code, P-code);
- 3) Кодово-фазовые одночастотные (C/A-code, P-code, фаза несущей L1);
- 4) Кодово-фазовые двухчастотные (C/A-code, P-code, фаза несущей L1 и L2).



# ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## Общие рекомендации по выполнению геодезических GPS/ГЛОНАСС измерений

**При практическом выполнении спутниковых наблюдений следует соблюдать следующие общие рекомендации:**

- 1) Выполнять измерения в местах с наилучшим обзором небосвода и минимальным количеством препятствий, превышающих угол отсечки (маску), установленную в приемнике. Рекомендуемая величина маски  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ . Необходимо учитывать, что наименьшее количество спутников наблюдается в северной части небосвода.
- 2) Не производить наблюдений вблизи мощных источников радио-излучения близкого к GPS/ГЛОНАСС частотного диапазона.
- 3) Не производить наблюдений вблизи объектов, способных переотразить спутниковых сигнал (стены зданий, металлические решетчатые фермы, мачты и т.п., обширные водные поверхности).
4. Выбирать для наблюдений периоды с наибольшим количеством наблюдаемых спутников, имеющих максимальное возвышение над горизонтом.
5. Соответствующим образом увеличивать продолжительность сеанса наблюдений при уменьшении количества наблюдаемых спутников и увеличении длины наблюдаемой базовой линии.
6. При высокоточных измерениях всегда использовать штатные экраны-отсекатели для снижения воздействия многолучевости на результаты измерений (или антенны типа Choke-Ring), а также ориентировать антенну в северном направлении при помощи маркеров, нанесенных на ее поверхность.
7. При высокоточных измерениях очень тщательно (лучше дважды) измерять высоту антенны на геод. центром и корректно фиксировать метод измерения высоты (наклонная, вертикальная, до кромки экрана и т.д.).
8. При работе без контроллера тщательно записывать имя точки, моменты начала и конца наблюдений, высоту антенны и способ ее измерения, тип используемого приемника и антенны.

## Параметры, которые необходимо контролировать при выполнении GPS/ГЛОНАСС измерений

- 1) Количество непрерывно отслеживаемых спутников (желательно чтобы их было 5-6 и больше);
- 2) PDOP (чем он меньше тем лучше).  
Желательно, чтобы его величина PDOP находилась в пределах 1-3.
- 3) Количество эпох наблюдений по каждому отслеживаемому спутнику (позволяет выявить срывы цикла).
- 4) Продолжительность сеанса наблюдений.

[www.trimble.com](http://www.trimble.com) – официальный сайт компании Trimble;  
<http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-29893/SetupPlanning.exe> – программа для планирования GPS наблюдений;  
<ftp://ftp.trimble.com/pub/eph/current.ssf> – альманах (постоянно обновляется);  
<https://www.schriever.af.mil/gps/Current/current.alm> – альманах (постоянно обновляется);  
<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.shtml> – NGS калибровка GPS/GLONASS антенн;  
<http://www.navcen.uscg.gov/Ftp/gps/status.txt>