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.

<u>Предшественники современных ГССП</u>:

- 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.

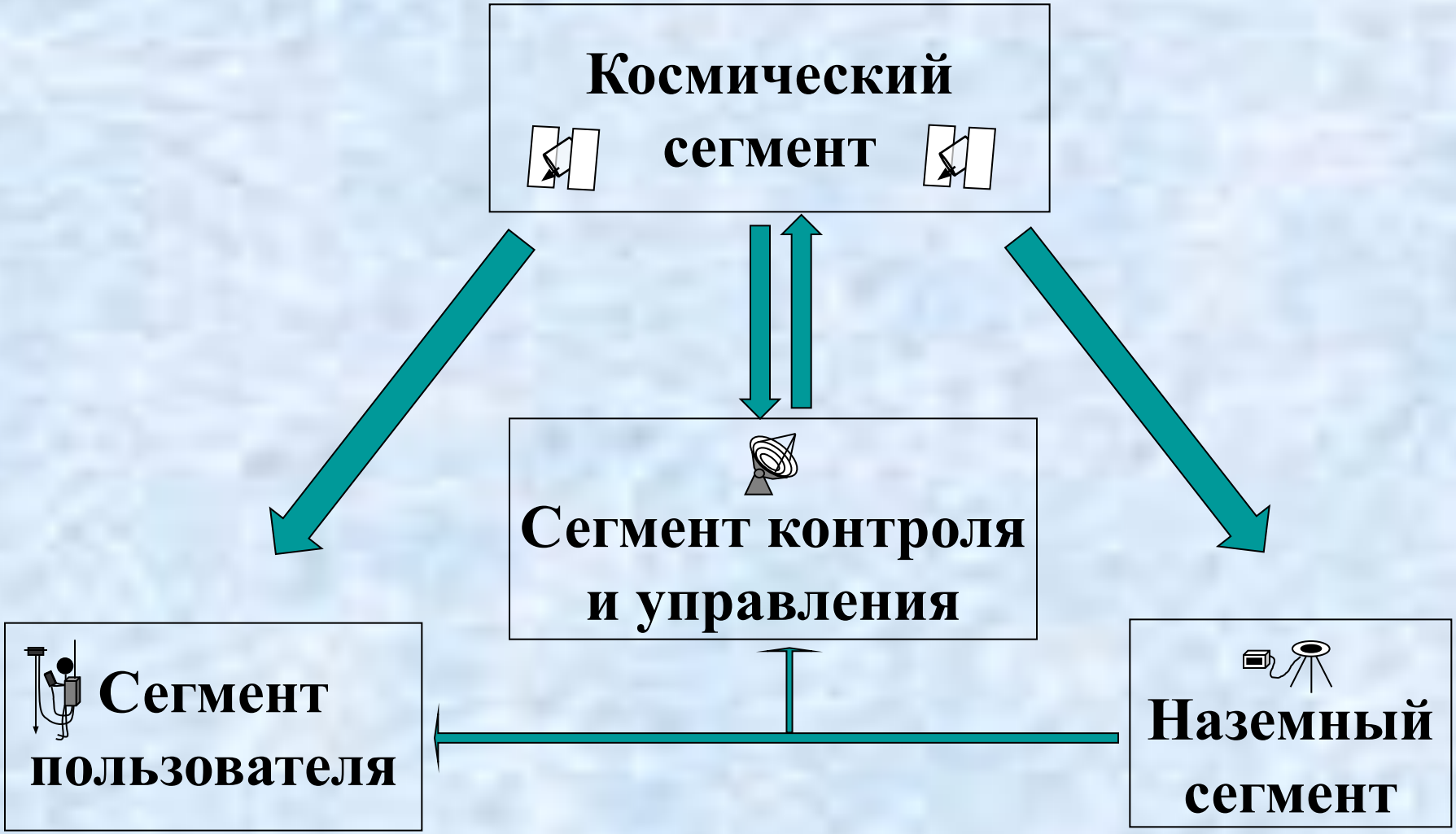
GPS или NAVSTAR

(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

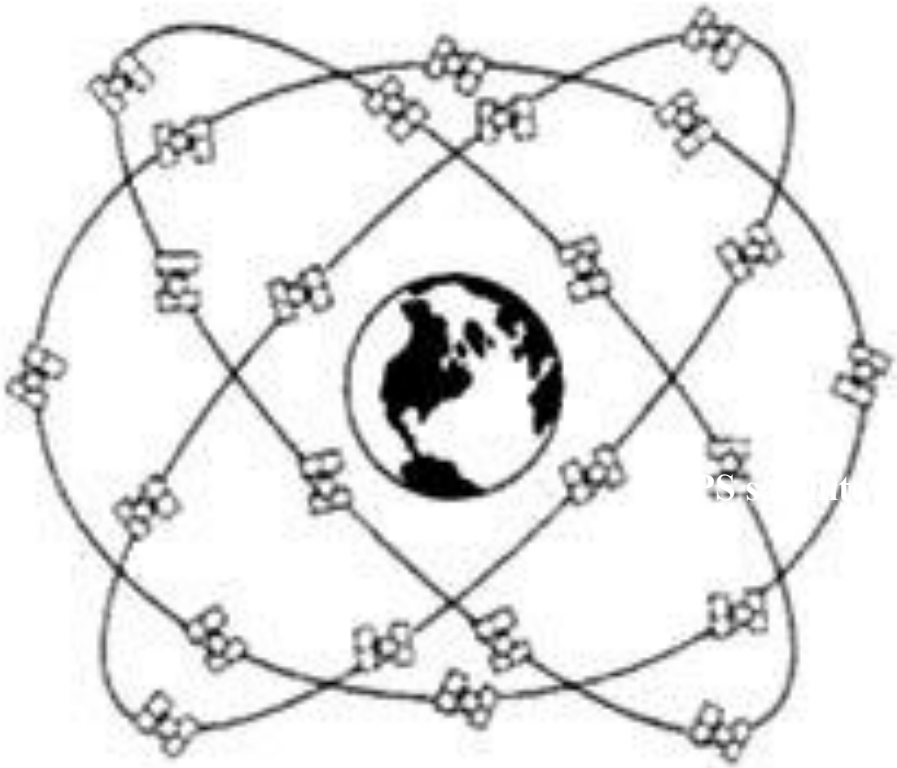
Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Число ИСЗ в системе	24* (3 в запасе)	24* (4 в запасе)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Наклон орбиты	64.8°	55°
Период обращения ИСЗ	$11^h\ 15^m\ 44^s$	$11^h\ 58^m\ 00^s$
Высота ИСЗ над поверхностью Земли	19100 км	20150 км
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Срок активного существования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

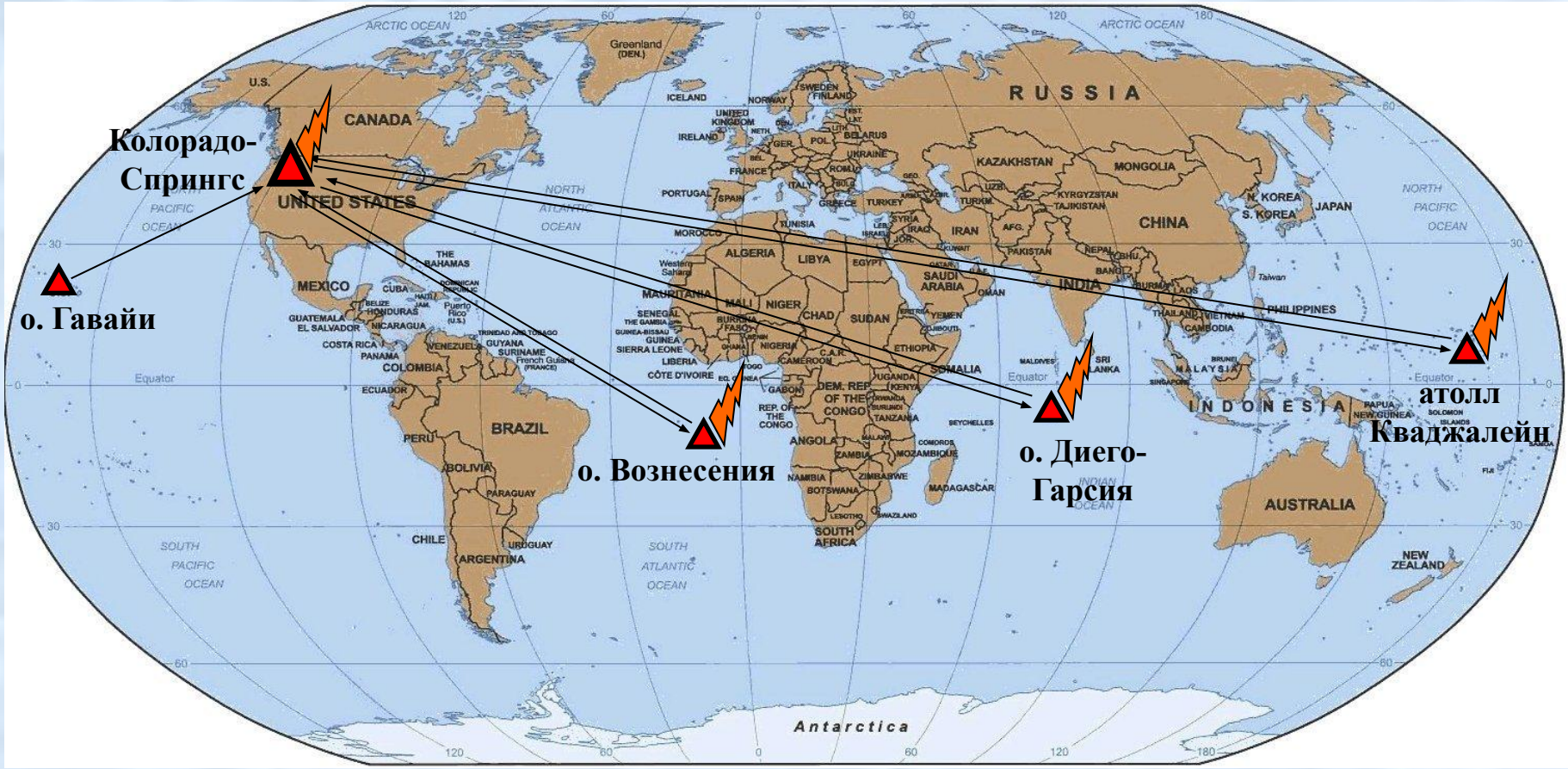


Космический сегмент систем GPS и ГЛОНАСС

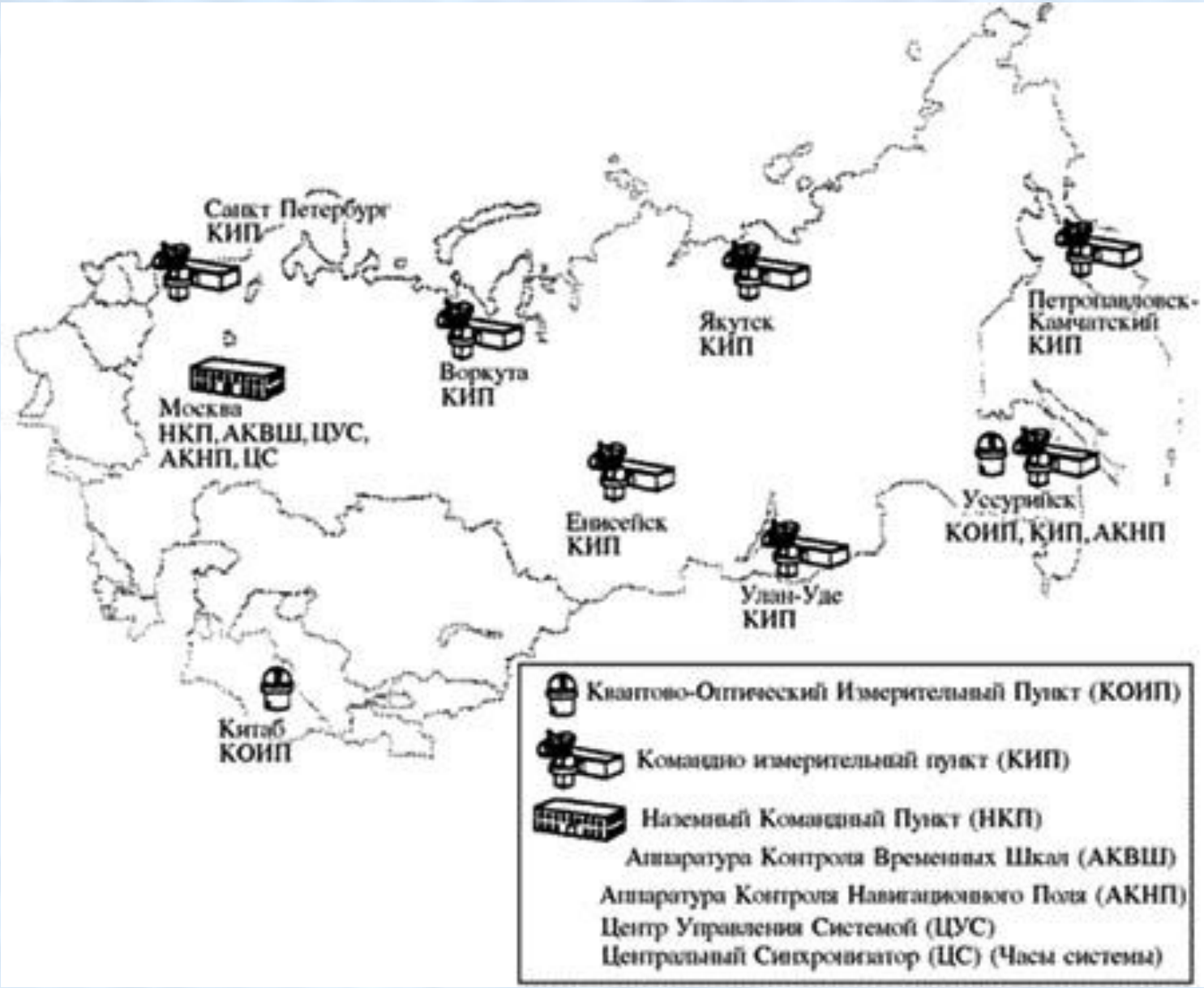
Запуск спутника GPS, BLOCK IIR

ГЛОНАСС спутник

Сегмент контроля и управления системой GPS



Сегмент контроля и управления системой ГЛОНАСС

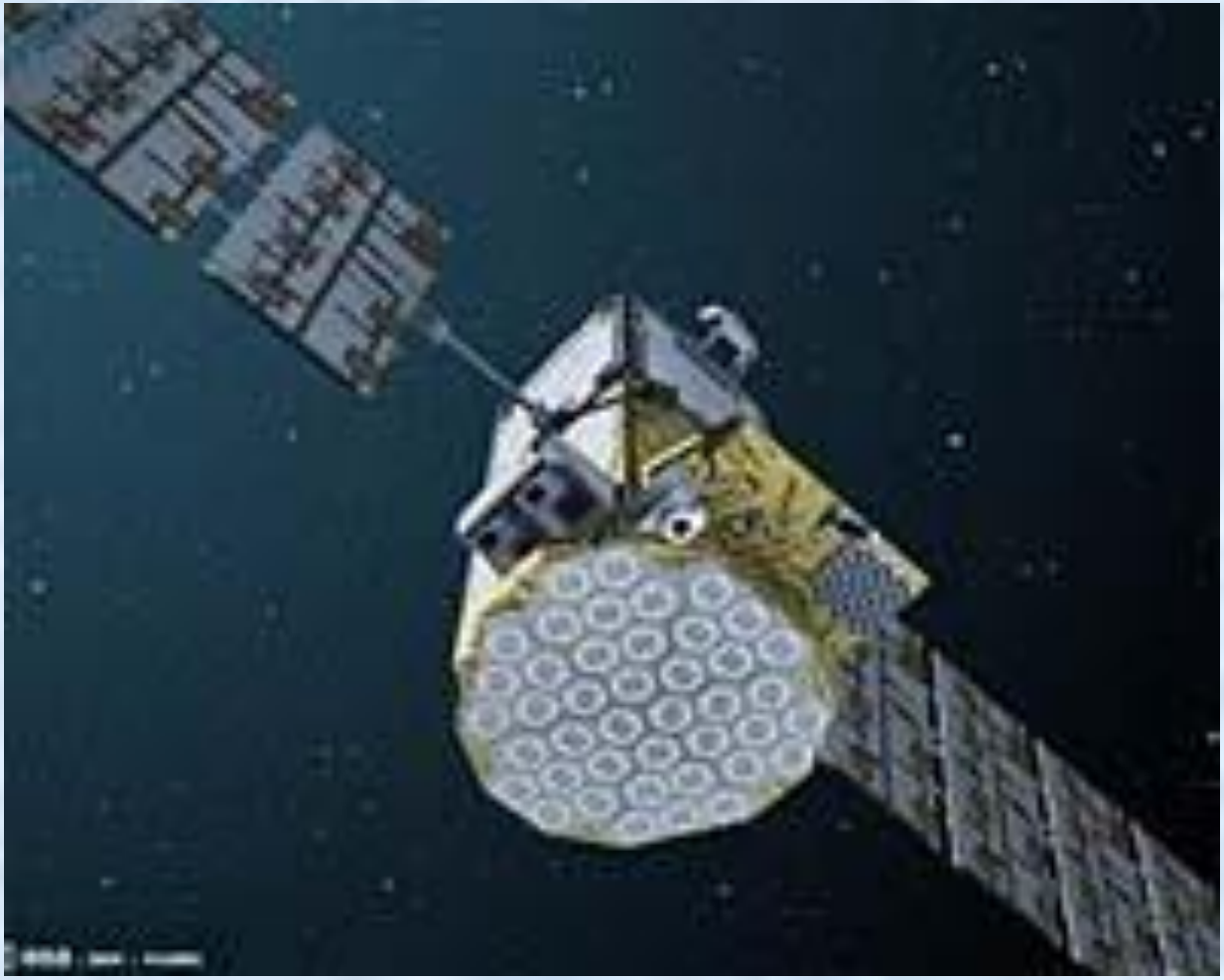


Европейская глобальная навигационная система GALILEO (планируется к вводу в эксплуатацию в 2013г.)

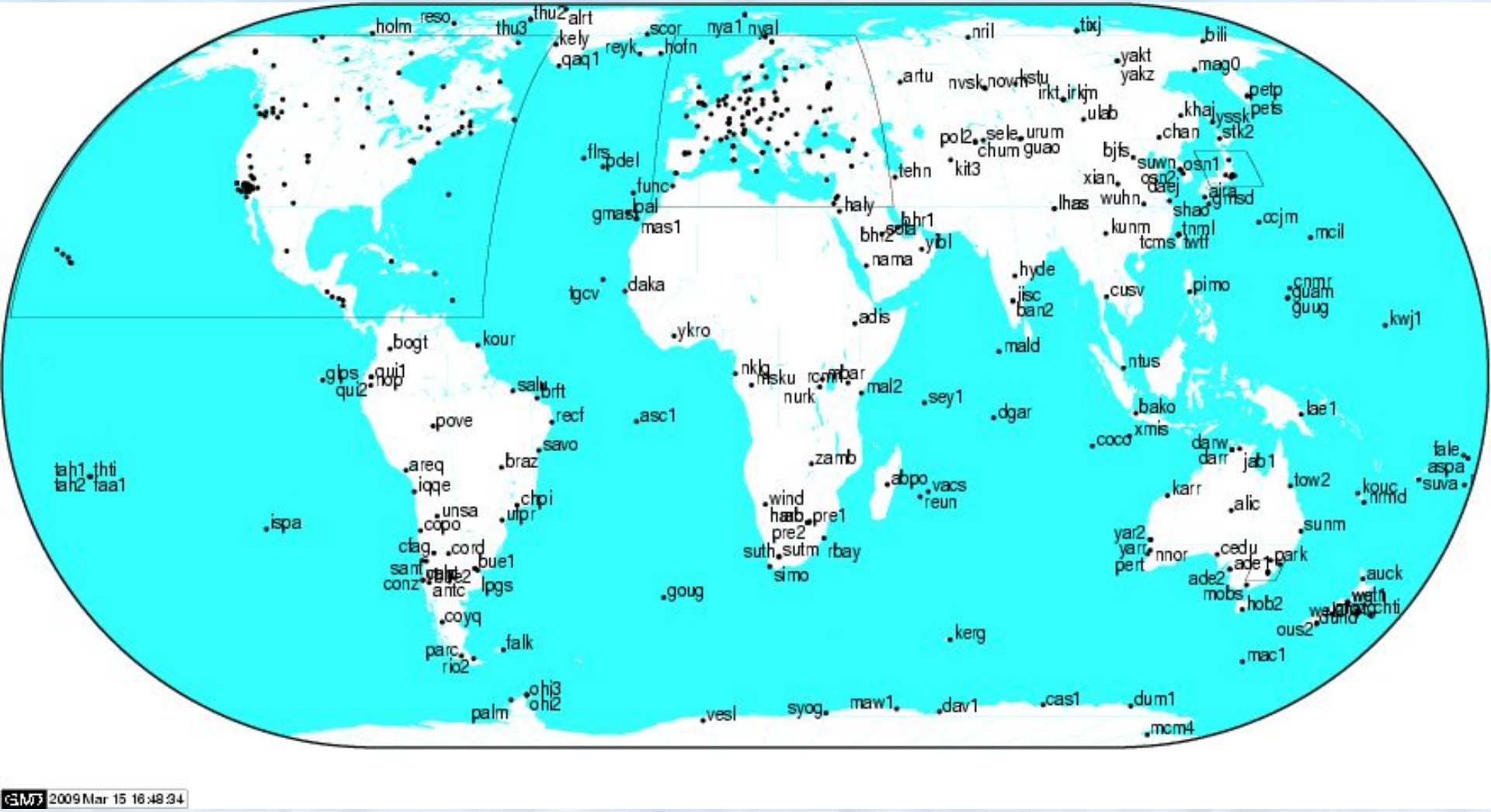
Параметр	Значение	GPS
Число ИСЗ в системе	30	24* (4 в запасе)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Наклон орбиты	54°	55°
Высота ИСЗ над поверхностью Земли	22966 км	20150 км
Система координат	GTRS	WGS-84
Срок активного существования	12 лет	7.5 лет

* в настоящее время выведены на орбиту 2 SV's

Общий вид спутника системы GALILEO



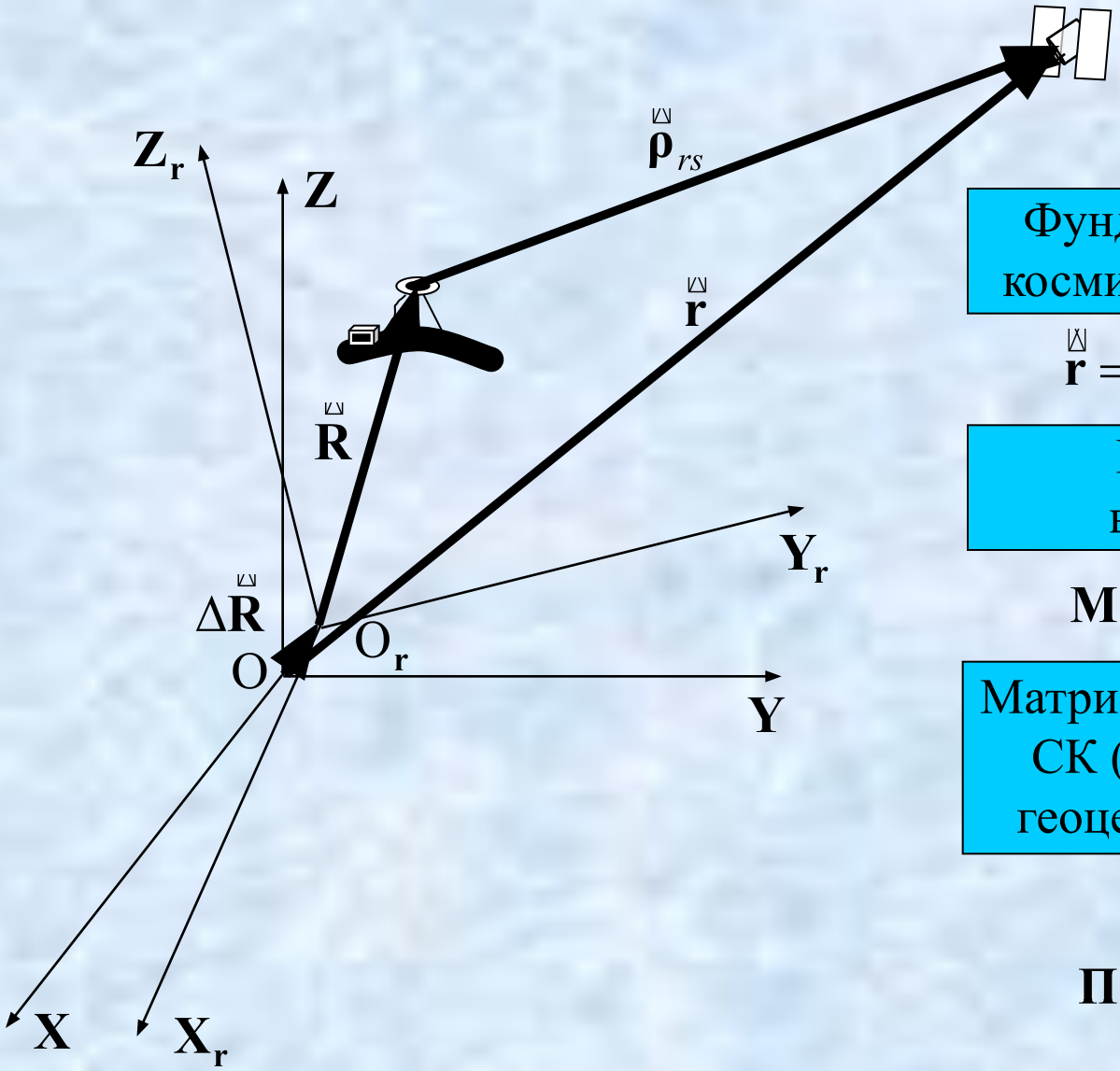
Наземный сегмент (сеть IGS)



GMT 2009 Mar 15 16:48:34

Trimble
LOGGING FOR 23:46
MEMORY LEFT: 78 HR
23:46:40 UTC
TELEV/R2M
POSITION
DATE
MORE
TIMER
ENTER
CLEAR
STATUS
SAT INFO
ALPHA
SESSIONS
CONTROL
LOG DATA
MODIFY
POWER

Принципы определения местоположения при помощи ГССП GPS и ГЛОНАСС



Фундаментальное уравнение космической геодезии (**ФУКГ**)

$$\vec{\mathbf{r}} = \vec{\boldsymbol{\rho}}_{rs} + \mathbf{\Pi M}\vec{\mathbf{R}} + \Delta\vec{\mathbf{R}}. \quad (1)$$

Матрица масштабов вдоль осей координат

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

Матрица разворота референцной СК (X_r, Y_r, Z_r) 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:

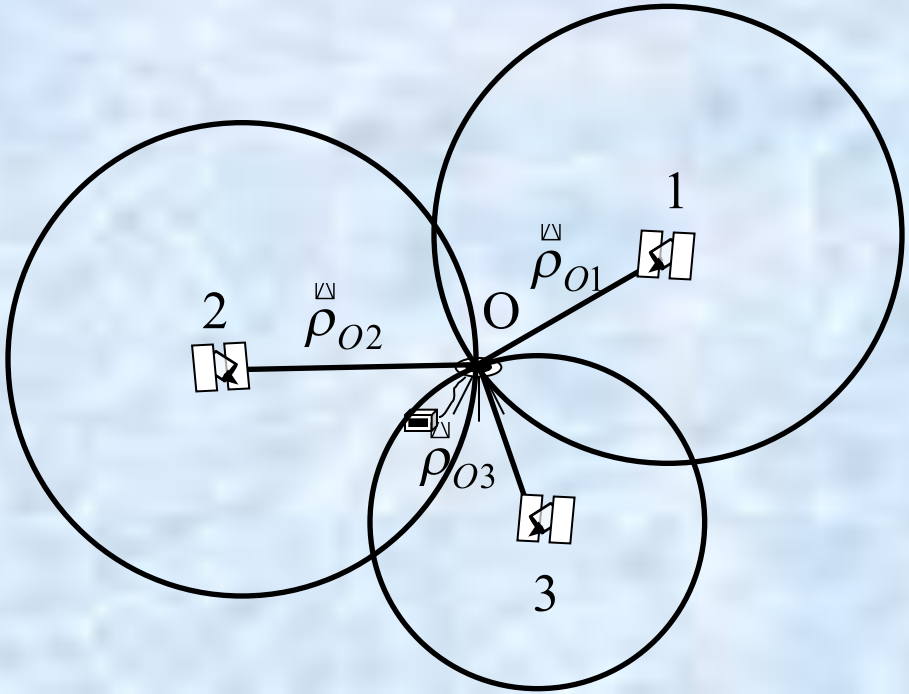
$$\vec{\boldsymbol{\rho}}_{rs} = \vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{R}}. \quad (2)$$

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

$$\left|\vec{\rho}_{rs}\right| = \sqrt{(X_S - X_r)^2 + (Y_S - Y_r)^2 + (Z_S - Z_r)^2}. \quad (3)$$

Геометрическая интерпретация

(пространственная линейная засечка)



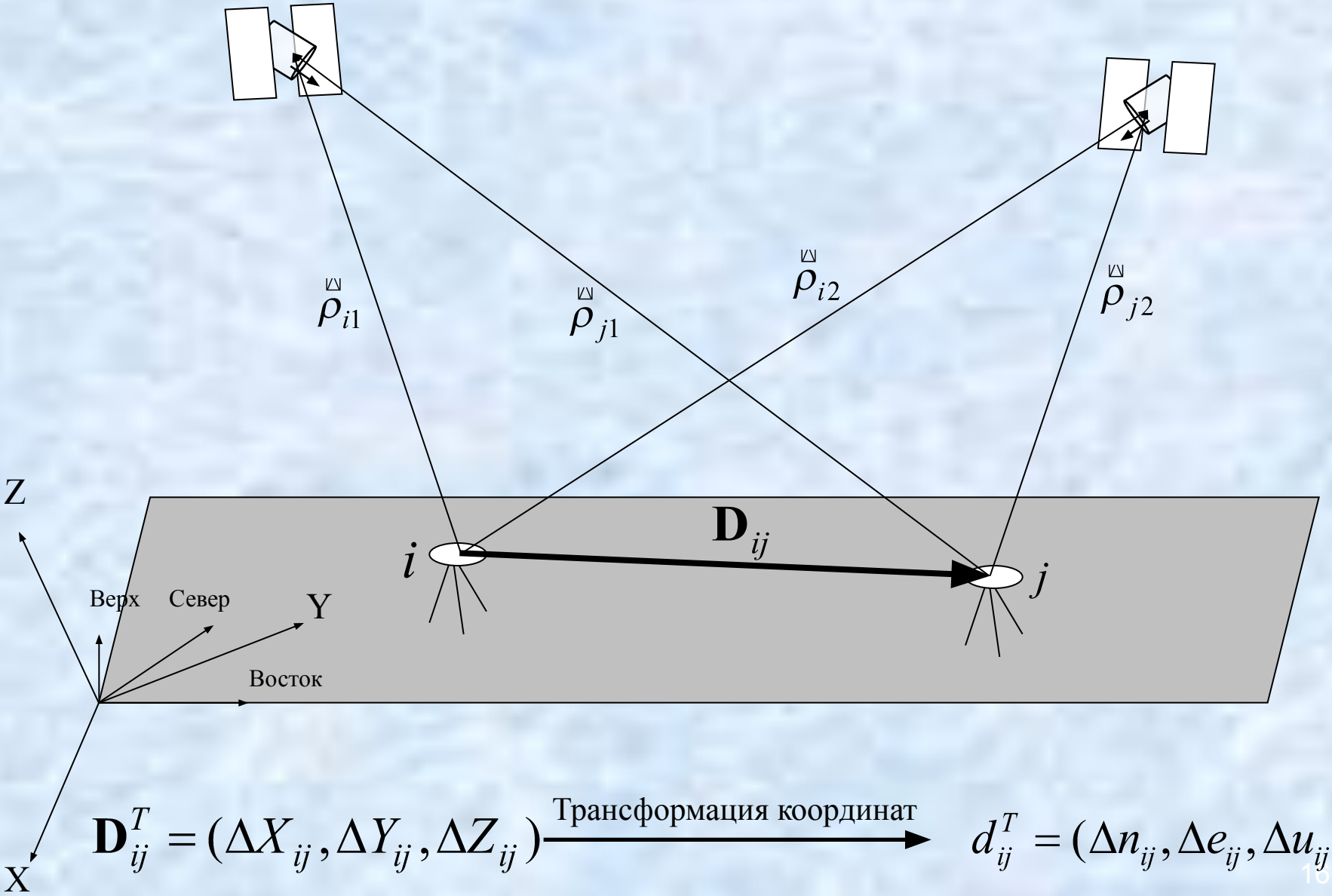
Абсолютное позиционирование

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

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

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

Относительное позиционирование



$$\mathbf{D}_{ij}^T = (\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij}) \xrightarrow{\text{Трансформация координат}} d_{ij}^T = (\Delta n_{ij}, \Delta e_{ij}, \Delta u_{ij})$$

Трансформирование разностей геоцентрических координат в локальную ТПСК

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

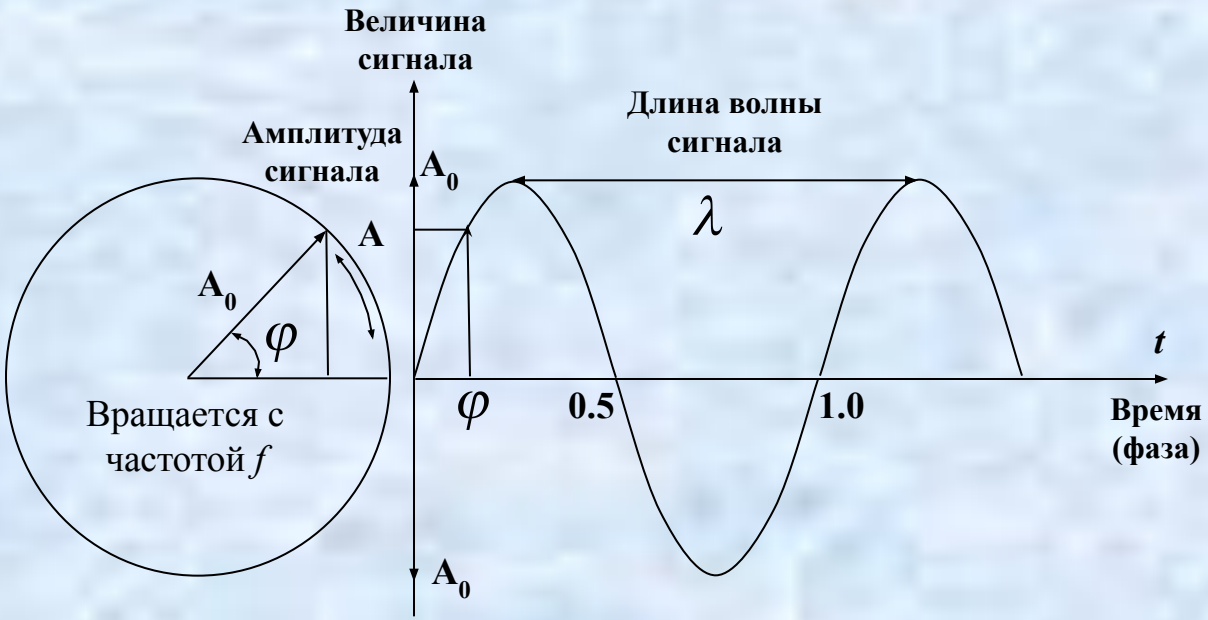
Известны геодезическая широта и долгота пункта i – B, L

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

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

Сигналы, излучаемые спутниками GPS и ГЛОНАСС и их назначение

Немодулированный сигнал (несущая)



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

$$\lambda = cT;$$

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

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

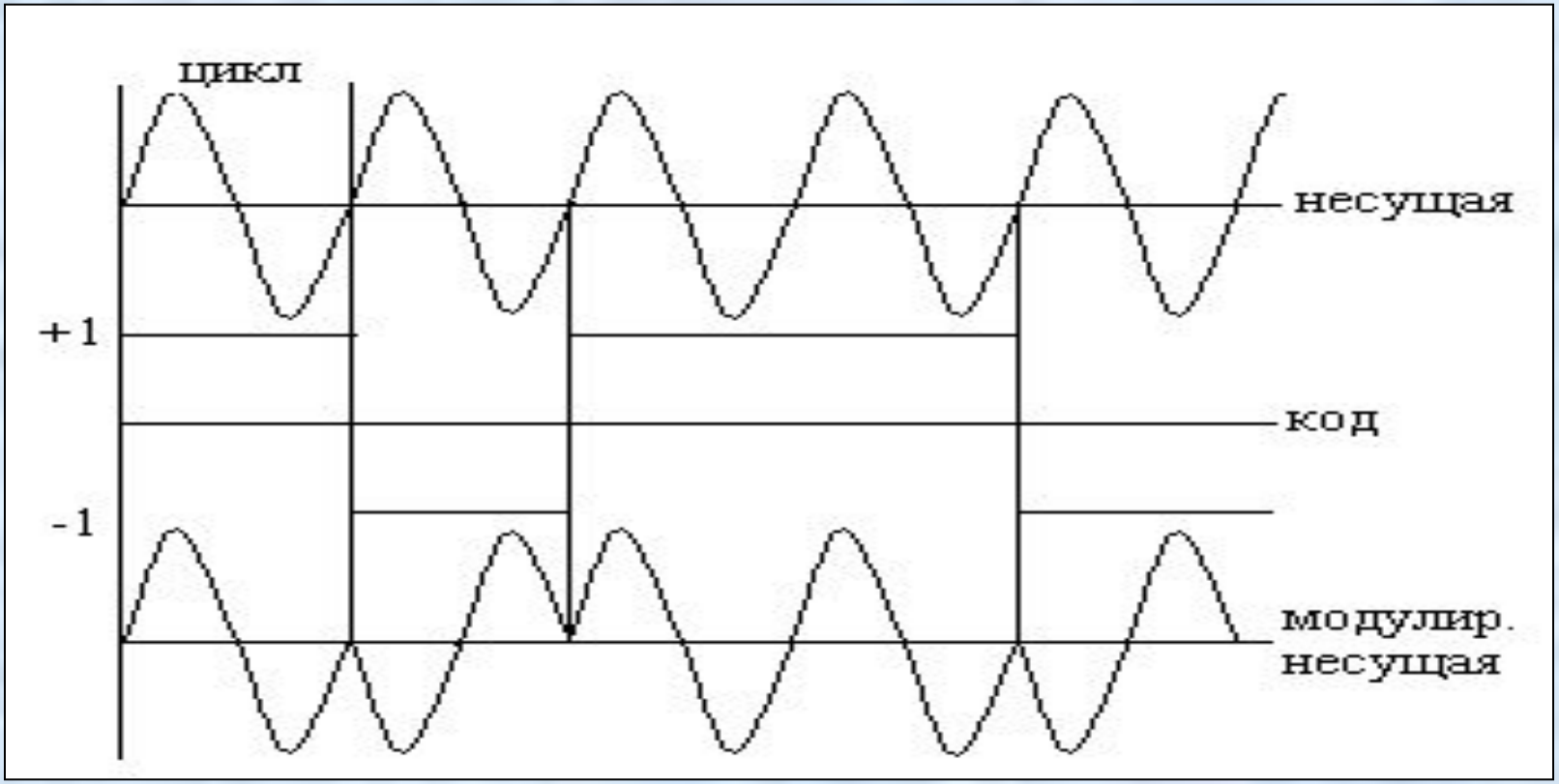
<u>Назначение несущих сигналов</u>:

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

Генератор опорной частоты f_0=10.23 МГц

f_0

$f_0/10$

$154f_0$

$120f_0$

$115f_0$

Несущая частота L1: f_{L1} = =1575.42 МГц; λ_{L1}=19 см	C/A-code ($f_{C/A}$=1.023 МГц)	P-code (f_P=10.23 МГц)
Несущая частота L2: f_{L2} = =1227.60 МГц; λ_{L1}=24 см	*C/A-code*	(f_P=10.23 МГц)
Несущая частота L5: f_{L5} = *=1176.45 МГц;* λ_{L1}*=25.5 см*	*C/A-code*	
Навигационное сообщение (эфемериды, поправки к часам спутника, альманах, коэффициенты ионосферной модели, информация о работоспособности спутников)		

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

Генератор опорной частоты f_0=5.11 МГц

f_0

$f_0/10$

Полоса несущих частот L1: $f_{L1}(k) = 1602 + k \cdot 0.5625$ МГц, где $k = 1, 2, \ldots, 24$.	СТ-code ($f_{СТ} = 0.511$МГц)	ВТ-код ($f_{ВТ} = 5.11$ МГц)
Полоса несущих частот L2: $f_{L2} = 1246 + k \cdot 0.4375$ МГц, где $k = 1, 2, \ldots, 24$.		($f_P = 10.23$ МГц)
Навигационное сообщение (эфемериды, поправки к часам спутника, альманах, коэффициенты ионосферной модели, информация о работоспособности спутников)		

Дальномерные коды

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

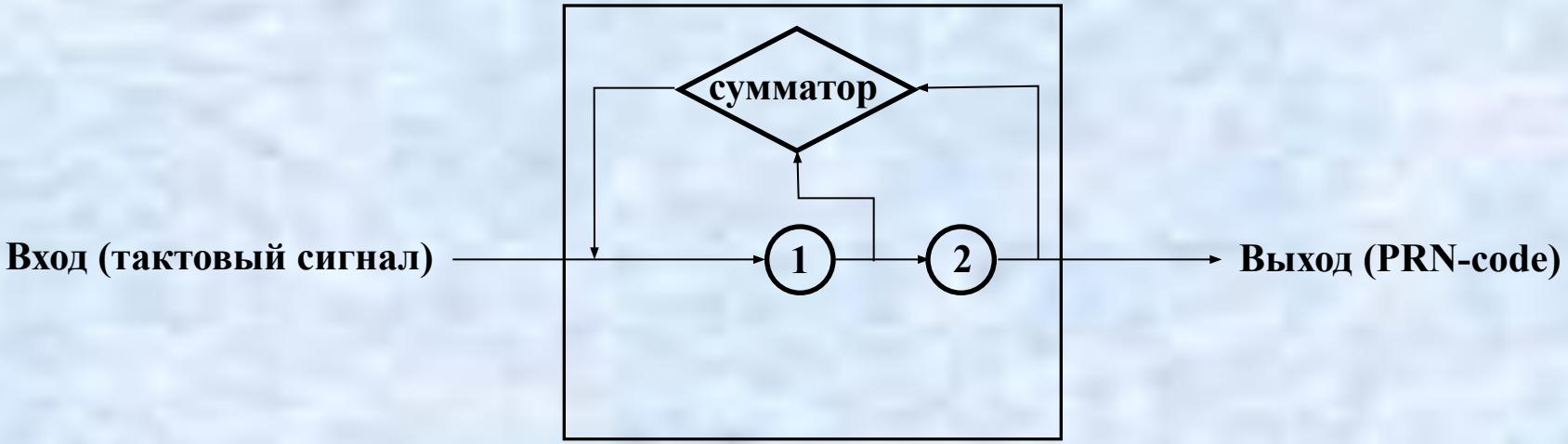
ВТ – точный код;

Режимы доступа

ограничения отсутствуют

Формирование дальномерных кодов (ПСП-последовательностей)

Простейший сдвиговый регистр обратной связи



Правила сложения битов информации

1 + 1 = 0; **0 + 0 = 0**

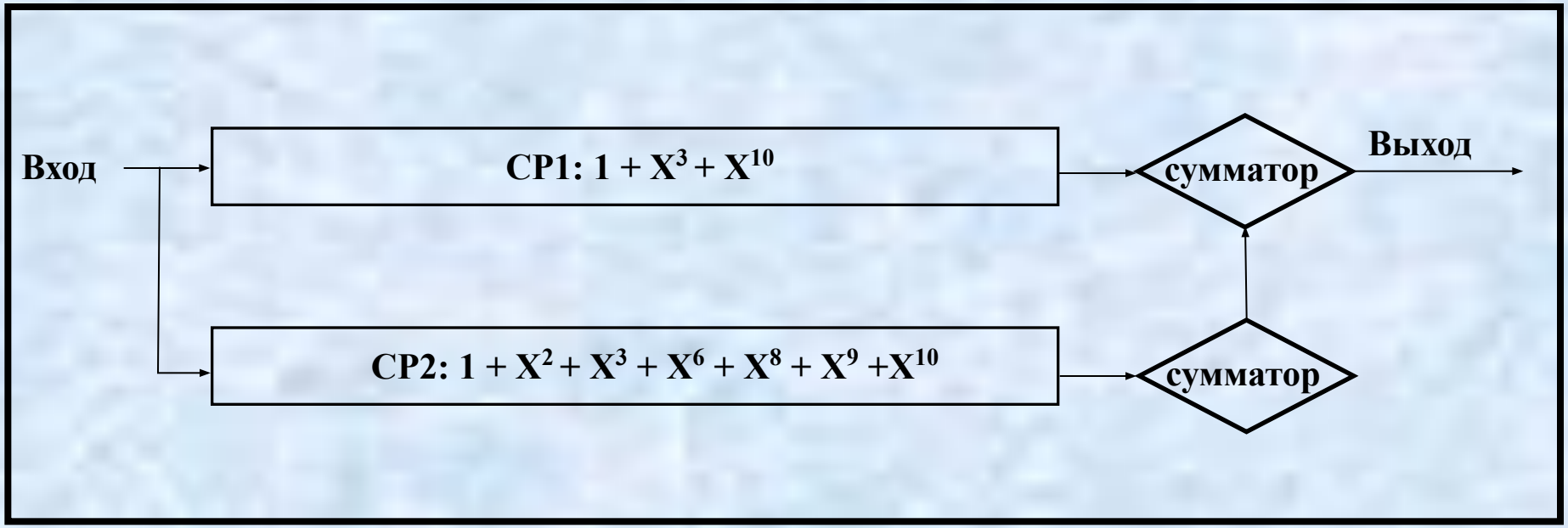
1 + 0 = 1; **0 + 1 = 1**

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

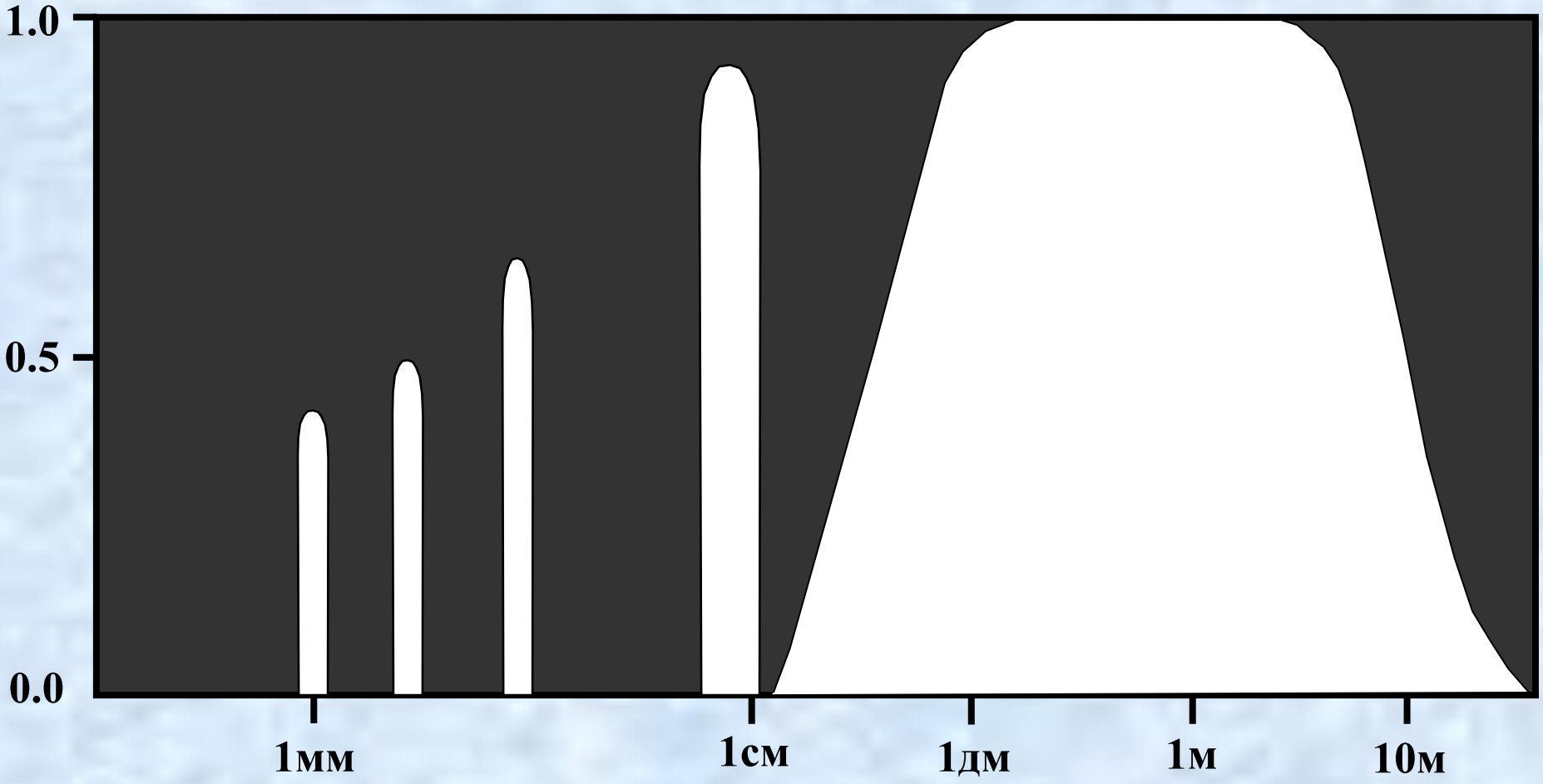
Образующий полином: $1 + X^1$

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

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:

$$GPST=UTC+n_S,$$

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

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:

$$GPSweek=int[(JD-2444244.5)/7],$$

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

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

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 Search Favorites Media

Address http://igscb.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	1458	Ultra06						
	1457	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Ultra18
	1456	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid	Rapid

IGS Final Orbit available for GPS weeks:

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

Вычисление псевдодальностей в ГССП GPS и ГЛОНАСС

Основные методы определения псевдодальностей

Кодовый метод

точность получения псевдодальностей 0.3 – 0.6 м.

Фазовый метод

точность получения псевдодальностей ~0.002 м.

Кодовый метод

Теоретически:

$$\rho_{rs} = c\Delta\tau = c\,[NT_п + (m + ф)\,T_m]. \quad (4)$$

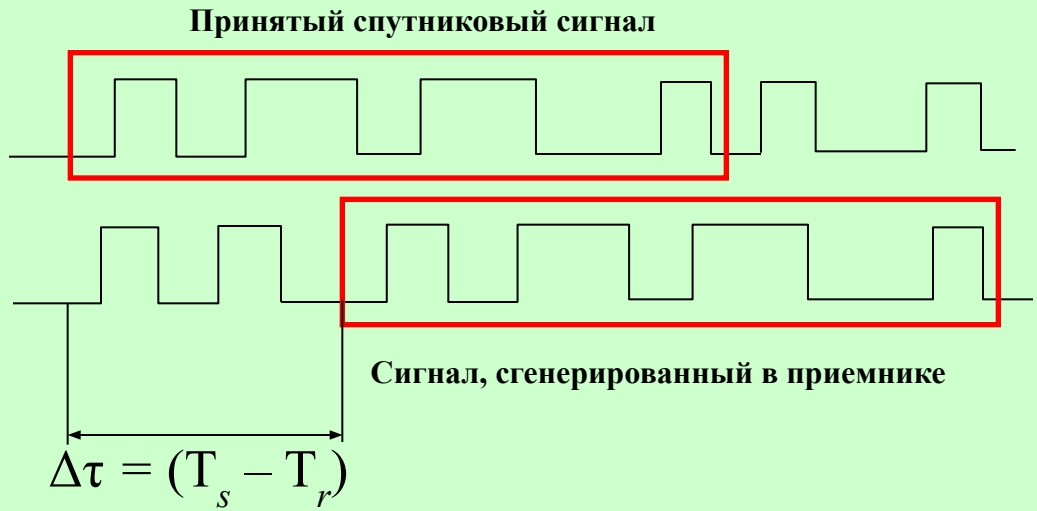
Учитывая, что $\lambda = cT$, получаем

$$\rho_{rs} = N\lambda_п + (m + ф)\,\lambda_m. \quad (5)$$

Практически, в простейшем случае имеем

$$P_{rs} = c(t_r + \delta t_r) - c(t_s + \delta t_s) =$$

$$= c(t_r - t_s) + c(\delta t_r - \delta t_s) = \rho_{rs} + c\delta t_r - c\delta t_s. \quad (6)$$



Параметры ПСП кодов стандартной точности

Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Число символов в ПСП М	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 $T_п$	1мс	1мс
Длина волны всей ПСП $\lambda_п = Mc/f_m$	~300км	~300км

Фазовый метод

Теоретически:

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

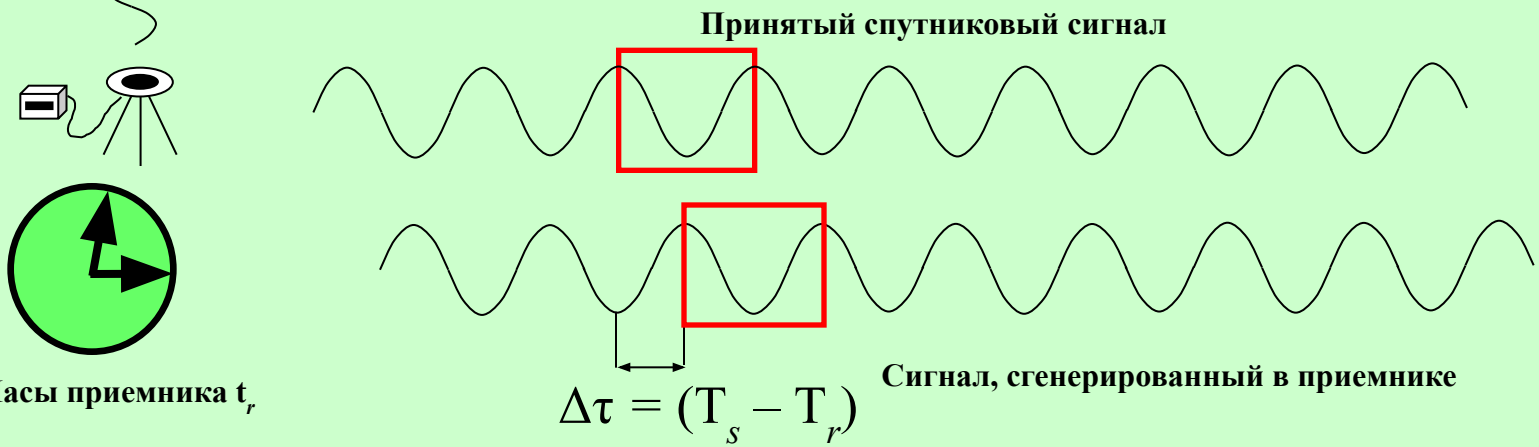
Учитывая что $\rho_{rs} = c\Delta\tau$, получаем из (7)

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

Практически, в простейшем случае имеем

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

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



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.

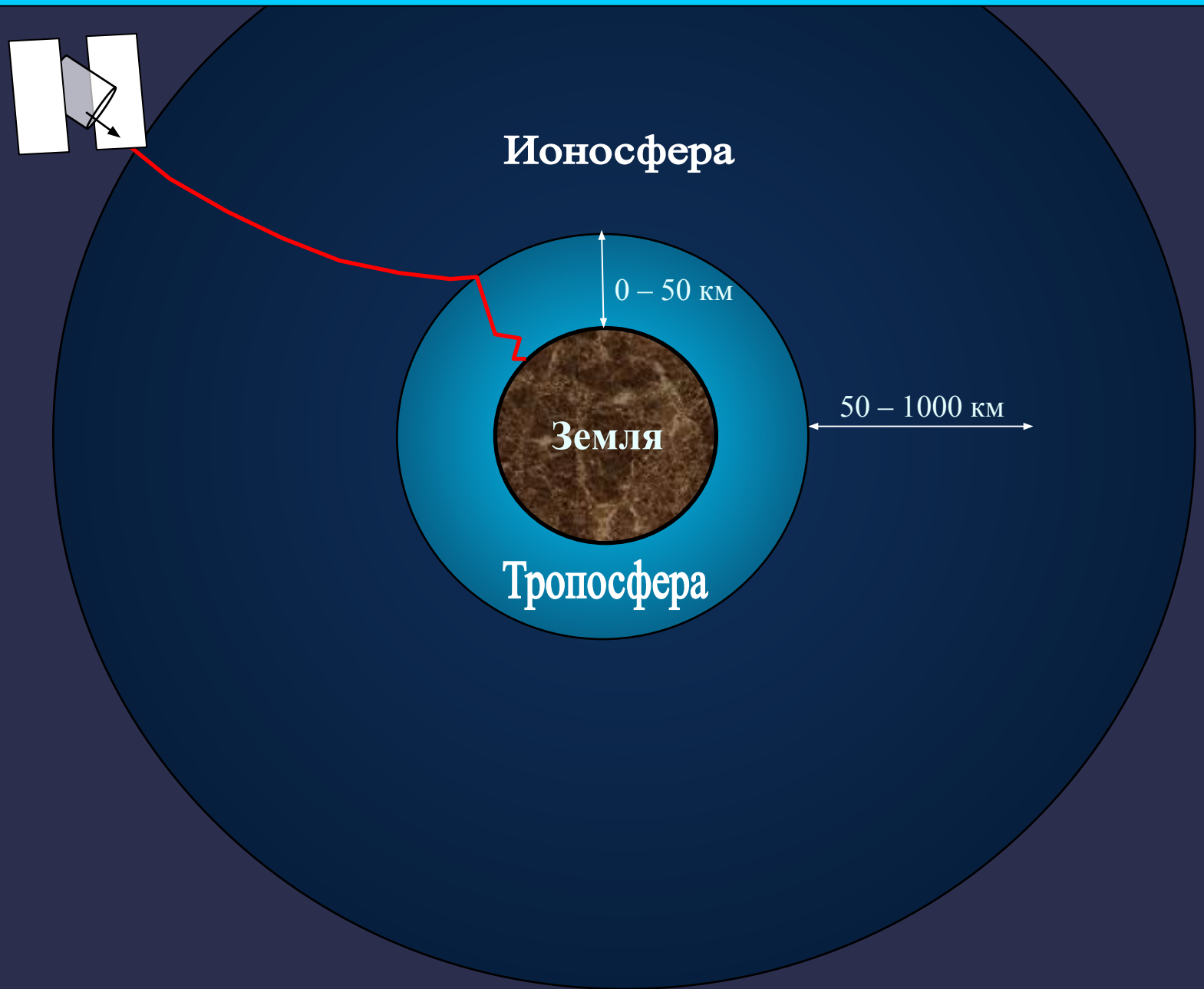
Существуют и другие ошибки, не относящиеся ни к одной из перечисленных групп, например, ошибки трансформирования результатов позиционирования из системы координат WGS-84 в ПЗ-90 и т.д.

Влияние ошибок эфемерид спутников GPS и ГЛОНАСС на точность позиционирования

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

ΔR(м)	b(км)	δb (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

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

δP_{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 = 5ns, A_2 – амплитуда, A_3 – фаза, A_4 – период функции δt_{Iono} .

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

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

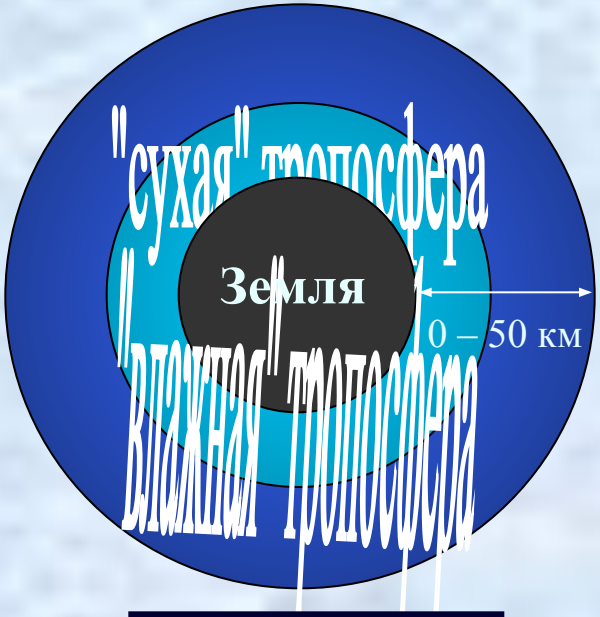
$$\phi_{L_1,L_2} = \alpha\phi_{L_1} + \beta\phi_{L_2}. \quad (12)$$

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

Ионосферно-свободная линейная комбинация кодовых и фазовых измерений

Название комбинации	**α**	**β**	**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

$\delta P_{Tropo} = 10$см

дает

$\delta b = 0.05$ppm

Относительные

$\delta P_{Tropo} = 1$см

дает

$\delta H = 3$см

Искажение псевдодальности, обусловленное влиянием тропоферы, может изменяться в пределах от 2.4м (z = 0º) до 24.2м (z = 85º). 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

<u>Моделирование тропосферы</u>
(менее трудоемко и более просто, но менее точно)

<u>Оценка параметров тропосферы</u>
(более трудоемко и сложно, но более точно)

Моделирование тропосферы

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

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

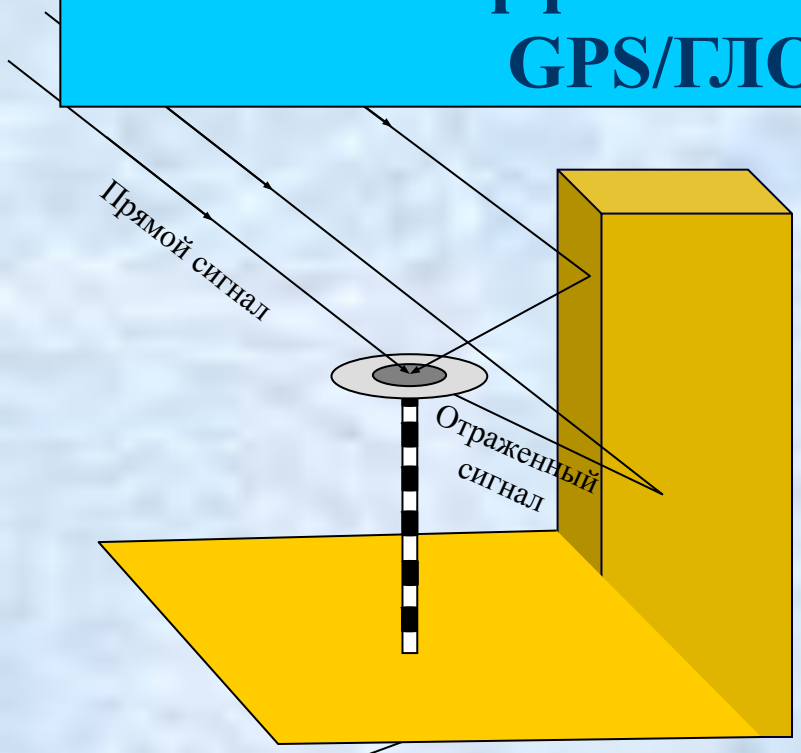
В формуле (13) величины δP_{dry}, δP_{wet} вычисляются с использованием информации о *температуре* T, *давлении* P и *влажности* ε в пункте наблюдений. Эта информация может быть получена путем экстраполяции стандартных значений T, P и ε в пункте наблюдений или путем метеорологических наблюдений в GPS/ГЛОНАСС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

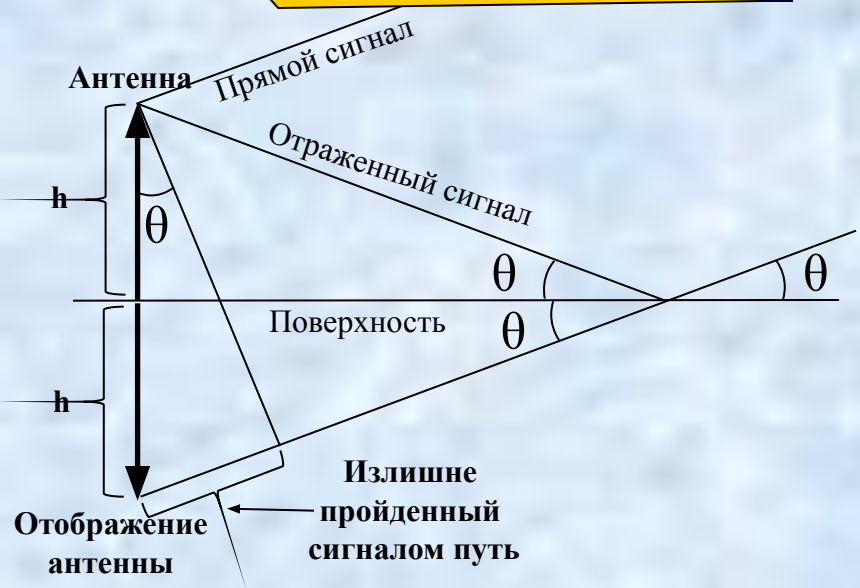
Оценивание параметров тропосферы

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





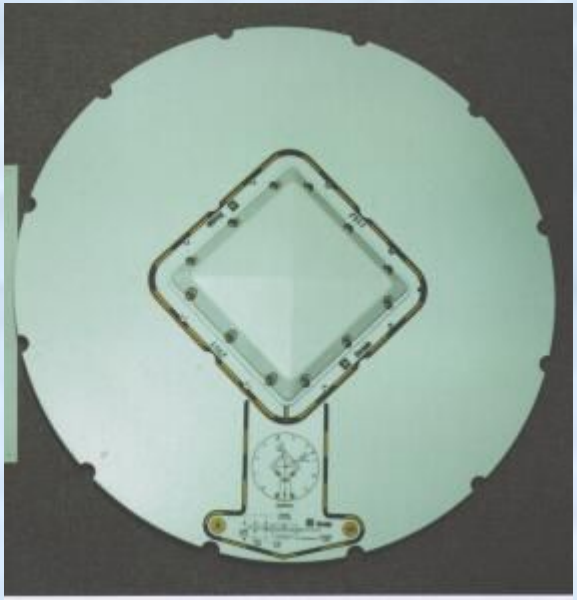
Переотражение сигнала может привести к ошибкам в измерении псевдодальностей по коду и фазе несущей до 20м (код) и несколько см (фаза). Особенно ярко эффект многолучевости проявляется при наблюдении НИСЗ с *малыми углами возвышения*.

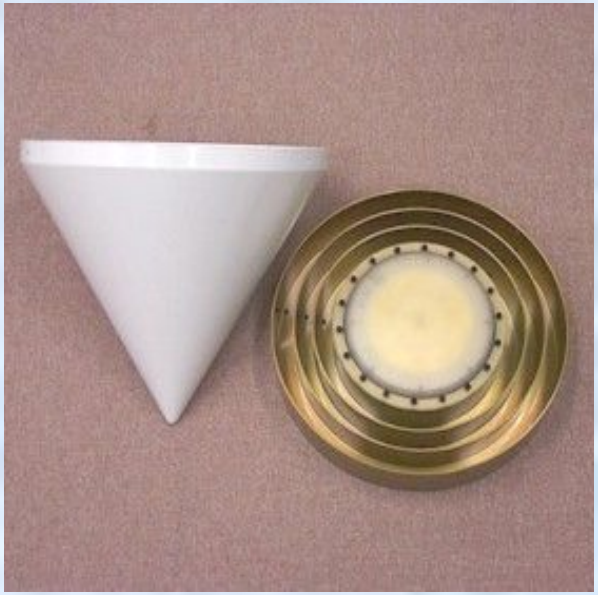
При *увеличении высоты антенны* над поверхностью *величина искажений растет*, но *период уменьшается* и наоборот.

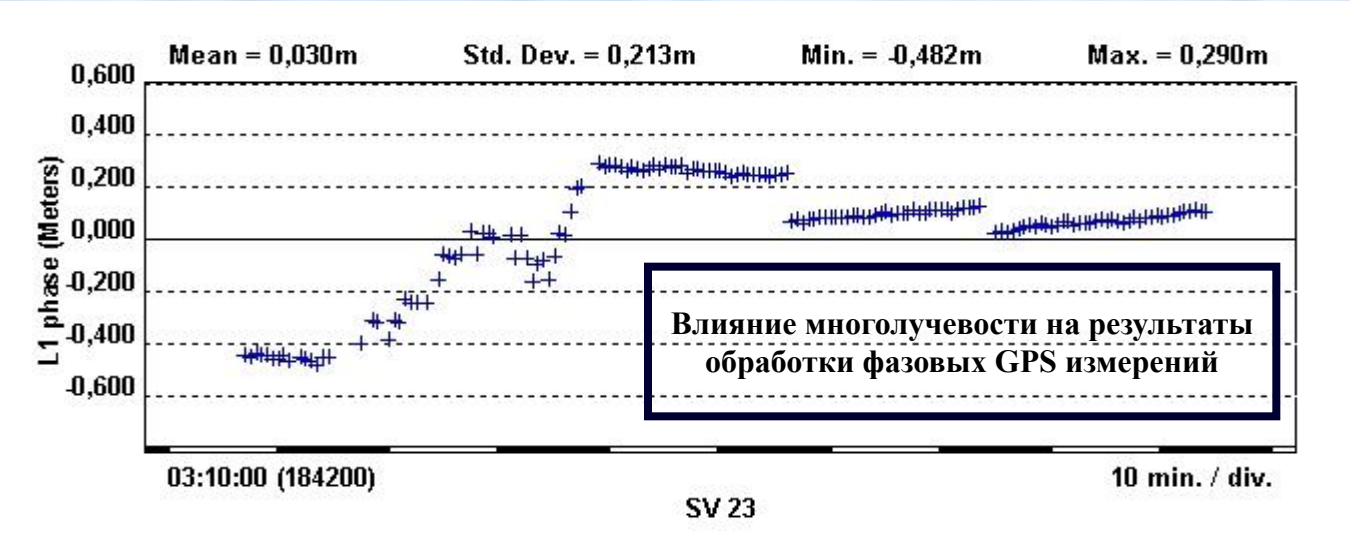
Эффект многолучевости *слабо поддается моделированию*, но хорошо *осредняется* *за длительный период времени* или фильтруется *сидерическим фильтром*.

Хорошо себя зарекомендовали плоские экраны-отсекатели и экраны типа choke-ring.

Пример плоского экрана-отсекателя и экранов типа Choke-Ring

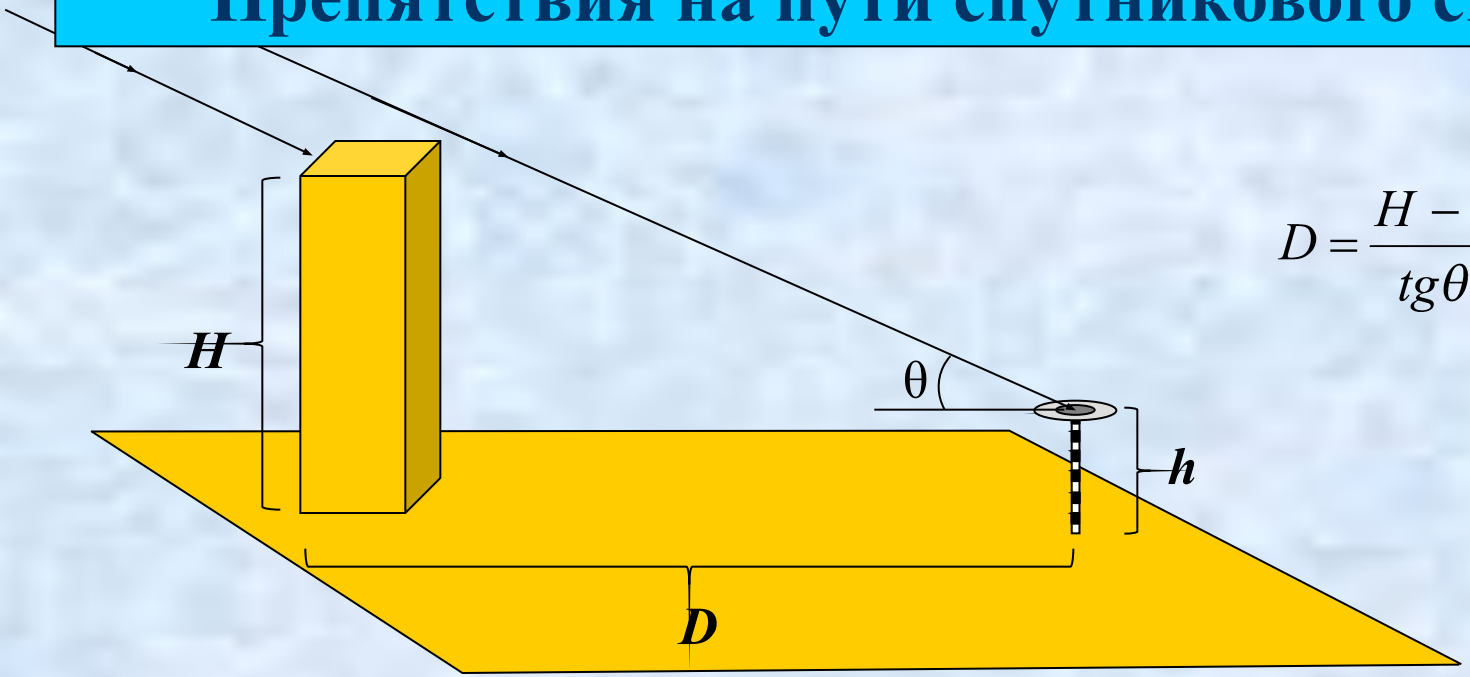






Влияние многолучевости на результаты обработки фазовых GPS измерений

Препятствия на пути спутникового сигнала



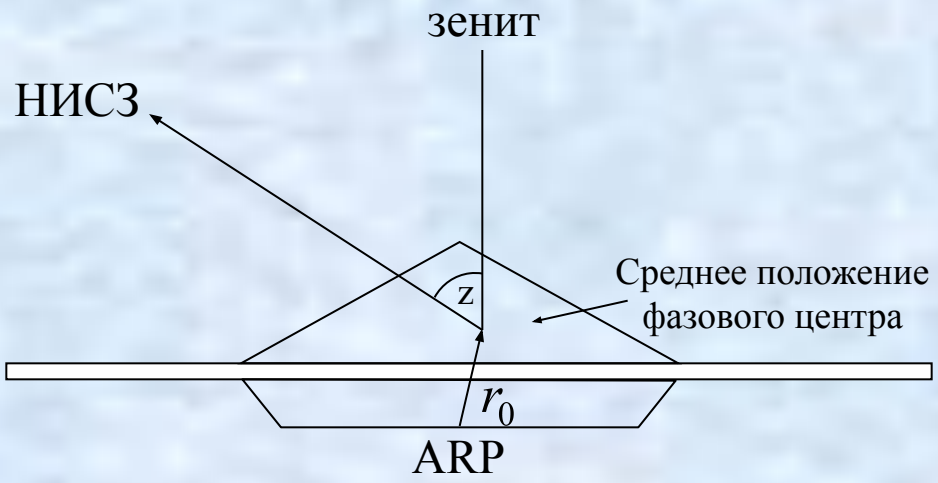
$$D = \frac{H - h}{tg\theta}. \quad (15)$$

Высота препятствия *H*, м	**2**	**5**	**10**	**15**	**25**
Рекомендуемое расстояние *D*, м	3	20	49	77	134

Примечание: таблица составлена для h = 1.5м и θ = 10º

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.

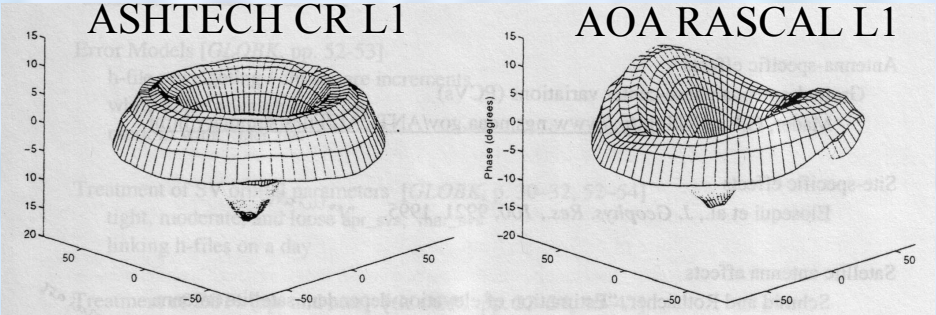
Влияние нестабильности и неточного знания положения фазового центра антенны на результаты GPS/ГЛОНАСС позиционирования



Вариации фазового центра описываются моделью вида

$$\delta\vec{r} = \vec{r}_0 + \delta\phi(z,\alpha)\cdot\vec{e}_{z,\alpha}. \quad (16)$$

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

Back Search Favorites Media

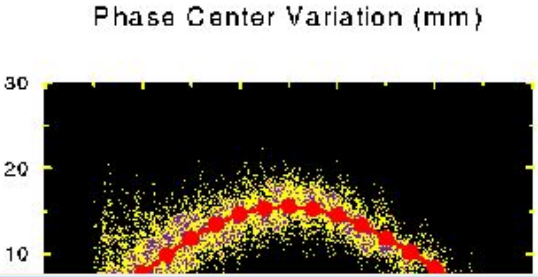
Address http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/ Go

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

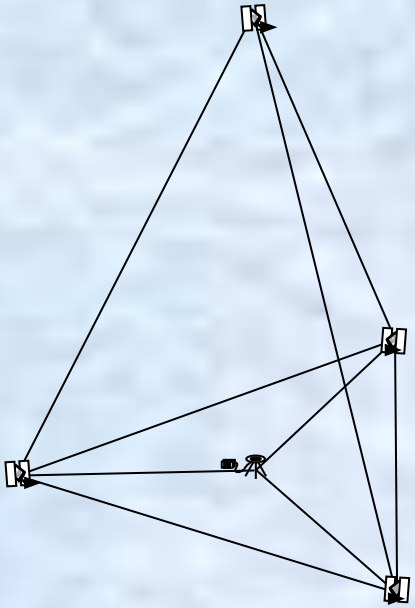
Antenna testing facility in Corbin, VA



Antenna Calibration Resources

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

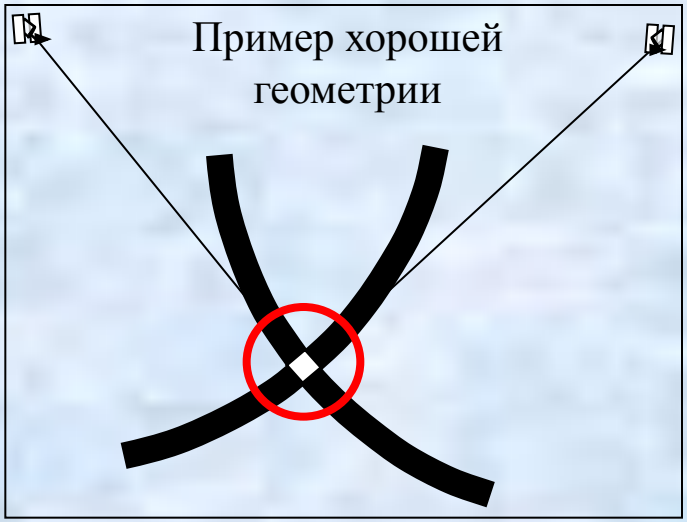
Геометрический фактор (DOP) и его влияние на результаты GPS/ГЛОНАСС позиционирования



DOP является связующим звеном между точностью псевдодальномерных измерений σ_{mes} и точностью позиционирования σ:

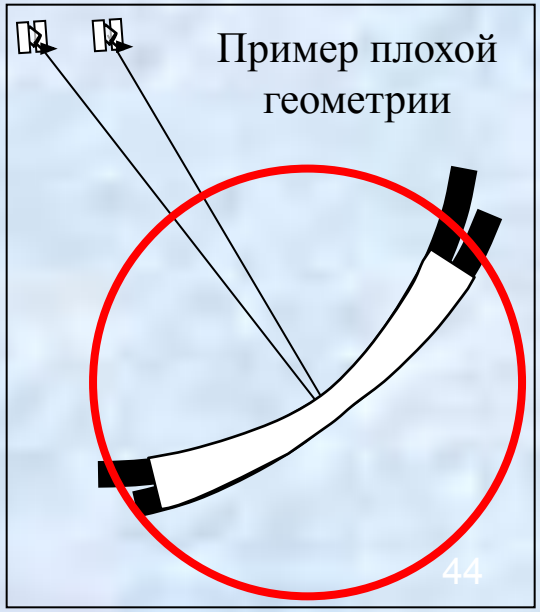
$$\sigma = \mathrm{DOP}\,\sigma_{\mathrm{mes}}. \quad (17)$$

Матрица весовых коэффициентов координат точки



PDOP	Вербальная характеристика
≤4	хорошо
5-7	удовлетворительно
≥7	плохо

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

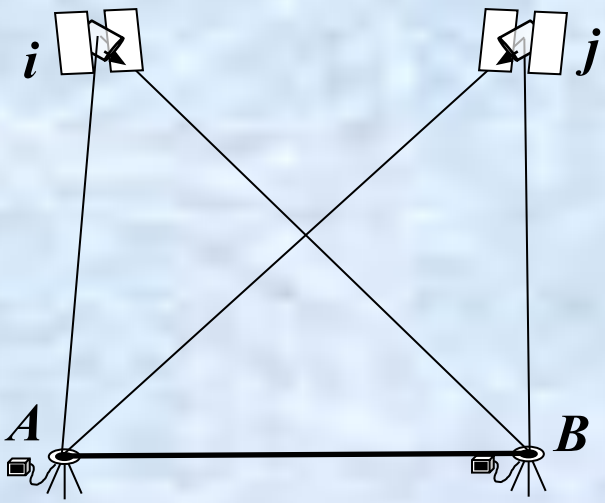


$$GDOP = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}}; \quad HDOP = \sqrt{q_{nn} + q_{ee}};$$

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

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

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* наблюдается 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)	ДИФФЕРЕН-ЦИАЛЬНЫЕ (DGPS, DGLONASS)	ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ	
		Статические (Static positioning)	**Кинематические** (Kinematic positioning)
Реального времени (Real Time) **Точность** – десятки метров, в лучшем случае 3-5 метров	**Реального времени** (Real Time) **Точность** – десятки метров, в лучшем случае метры-дицеметры	**Статика** (Static) **Точность** – сантиметры-миллиметры	**Стой и иди** (Stop and Go) **Точность** – сантиметры
Постобработка (Postprocessing) **Точность** – метры, в лучшем случае лучше метра	**Постобработка** (Postprocessing) **Точность** – десятки метров, в лучшем случае метры-дицеметры	**Быстрая статика** (Fast, rapid static) **Точность** – сантиметры	**Непрерывная** (Continuous) **Точность** – сантиметры
		Псевдостатика или реоккупация (Pseudostatic, reoccupation) **Точность** – сантиметры	**Реального времени** (Real Time Kinematic-RTK) **Точность** – сантиметры

Дифференциальное позиционирование

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

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

Вычисление поправок (коррекций) к псевдодальностям

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

Вычисление скорректированных псевдодальностей

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

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

<u>Цель инициализации</u> **–** 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

<u>Сетевой метод</u>

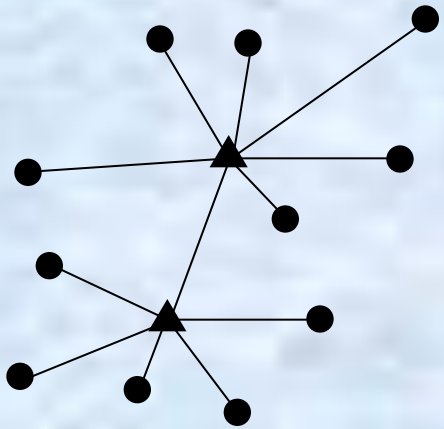
(требует больших затрат временных и материальных ресурсов, а также денежных средств; обеспечивает наличие избыточных измерений)

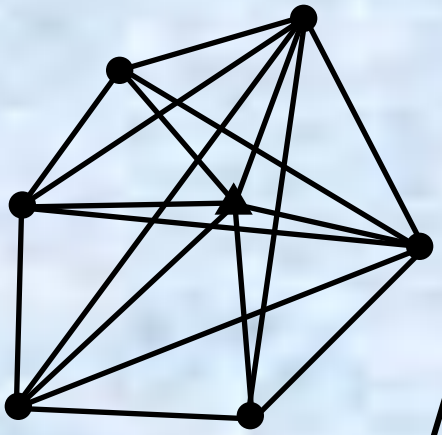
<u>Лучевой метод</u>

(более экономически выгоден, избыточные измерения отсутствуют)

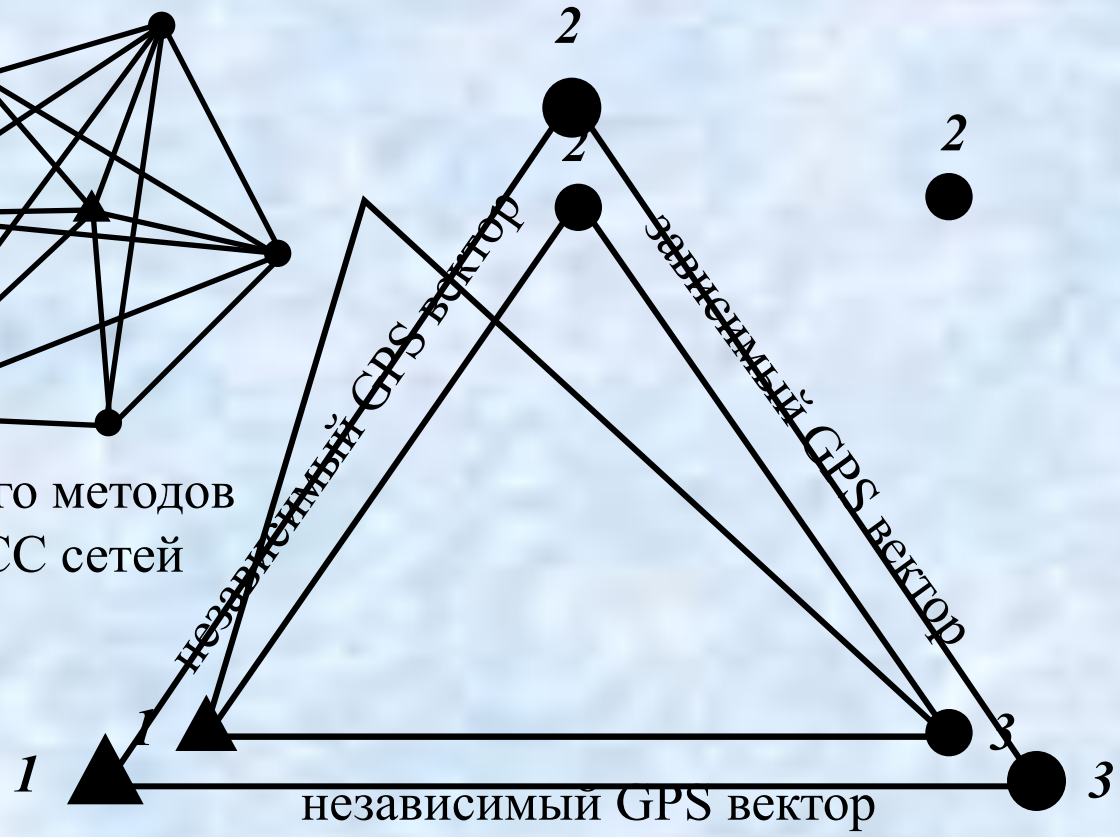
Особенности построения геодезических GPS/ГЛОНАСС сетей

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 $X_1, X_2, \ldots, X_n$, а измеренные значения равны $x_1, x_2, \ldots, x_n$, причем количество измерений n избыточно по отношению к числу определяемых параметров r.

<u>Теоретически имеем</u>

$$\varphi_1(X_1, X_2, \ldots, X_n) = 0,$$
$$\ldots \qquad (29)$$
$$\varphi_r(X_1, X_2, \ldots, X_n) = 0.$$

<u>Практически имеем</u>

$$\varphi_1(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \mathrm{W}_1,$$
$$\ldots \qquad (30)$$
$$\varphi_r(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \mathrm{W}_r.$$

Для того, чтобы устранить невязки $\mathrm{W}_1, \mathrm{W}_2, \ldots, \mathrm{W}_r$ необходимо исправить измерения поправками $v_1, v_2, \ldots, v_n$. Тогда получим

$$\varphi_1(x_1 + v_1, x_2 + v_2, \ldots, x_n + v_n) = 0,$$
$$\ldots \qquad (31)$$
$$\varphi_r(x_1 + v_1, x_2 + v_2, \ldots, x_n + v_n) = 0.$$

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

$$\sigma_i = a + bD_i,$$
$$p_i = (\sigma_0 / \sigma_i)^2.$$

Условия, возникающие в GPS/ГЛОНАСС сетях

В качестве *измеренных величин* при уравнивании GPS/ГЛОНАСС сетей обычно используются компоненты базовых линий Δx_i, Δy_i, Δz_i.

В GPS/ГЛОНАСС сетях возникают следующие виды условий

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta x_i = 0,\\
&\sum_{i=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta y_i = 0,\\
&\sum_{i=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta z_i = 0,
\end{aligned}\right\}$$

Замкнутый векторный ход (полигон)

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta x_i - (x_{II} - x_I) = 0,\\
&\sum_{i=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta y_i - (y_{II} - y_I) = 0,\\
&\sum_{i=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta z_i - (z_{II} - z_I) = 0,
\end{aligned}\right\}$$

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!!!

<u>Цели уравнивания спутниковых измерений:</u>

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

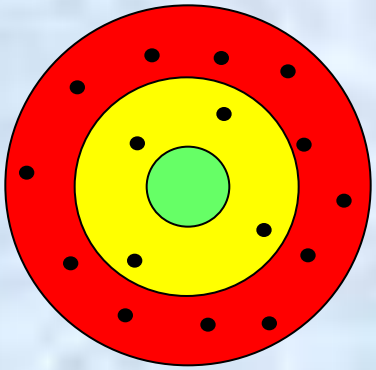
Примеры:

- атмосферная рефракция при длительных периодах измерений;

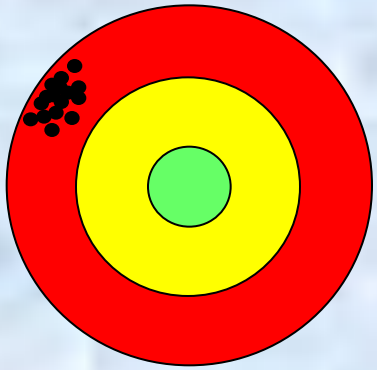
Абсолютная точность и внутренняя сходимость результатов GPS/ГЛОНАСС измерений

<u>Абсолютная точность</u> (accuracy) характеризует степень близости результатов измерений к их истинному значению.

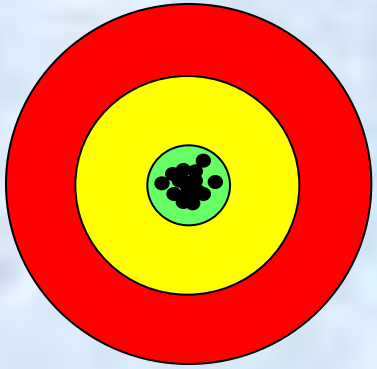
<u>Внутренняя сходимость</u> (precision) характеризует степень близости результатов измерений друг к другу или их среднему значению.



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 Search Favorites Media

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

Easting	28780,996m	Longitude	131°54'55,18422"E	Longitude	131°54'55,18422"E
Elevation	126,693m	Height	152,758m	Height	152,758m

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

Standard Errors

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

Aposteriori Covariance Matrix

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

Поправки, нормальное распределение поправок, нормированные поправки

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

<u>Нормированная поправка</u> – это поправка деленная на среднеквадратическую ошибку ее определения.

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

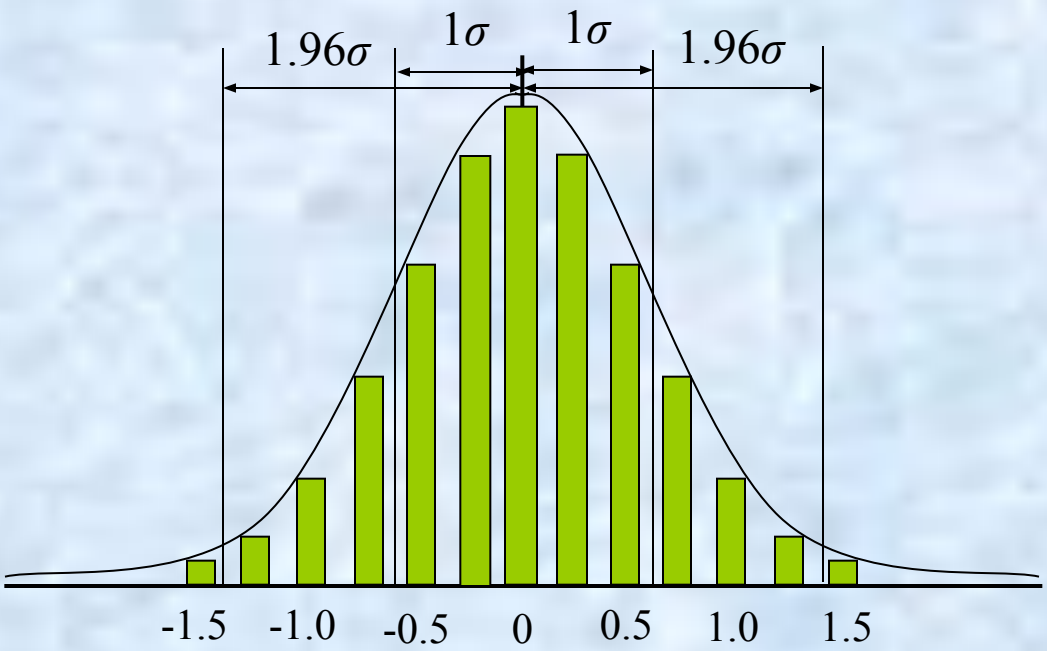


График нормального распределения поправок

Величина σ 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

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

Реально в результате постобработки или уравнивания GPS/ГЛОНАСС измерений непосредственно получается *матрица весовых коэффициентов* $\boldsymbol{Q}$ и *среднеквадратическая ошибка единицы веса* σ_0. Структура матрицы $\boldsymbol{Q}$ для i-й базовой линии показана ниже

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

ãäå $\sigma_0 = \sqrt{\dfrac{\hat{V}^T \mathbf{Q}_{\mathbf{D}_i}^{-1} \hat{V}}{n-k}}.$ (28)

Математический смысл среднеквадратической ошибки единицы веса (СКОЕВ)

<u>Можно показать, что:</u>

- 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;

<u>Важное замечание:</u> *если СКОЕВ>>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

Back Search Favorites Media

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

Distance Units Meters
Height Units Meters

Processing Summary

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

Back to top

Схема расположения пунктов ФАГС (1999-2003гг.)

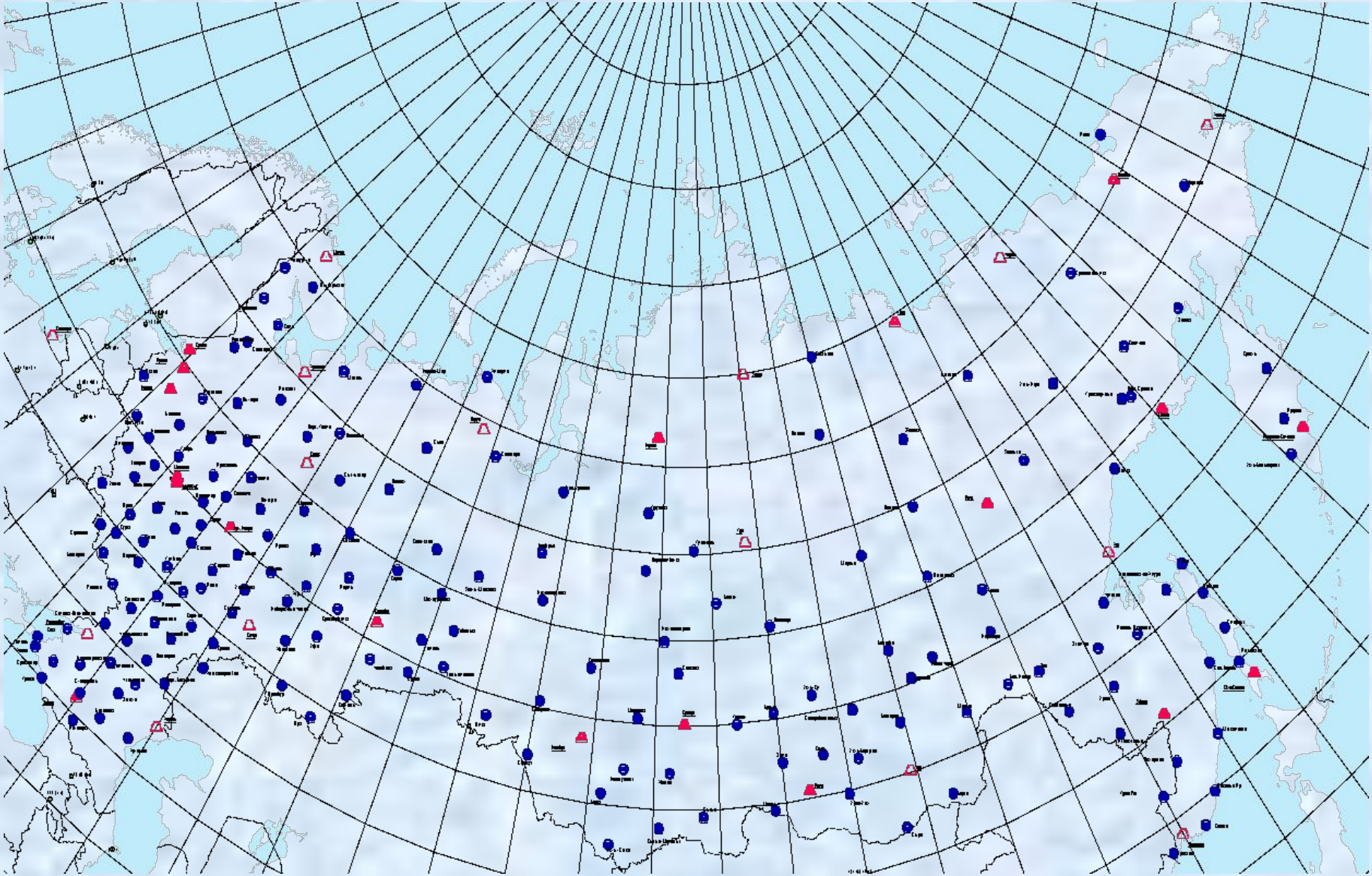


Схема расположения пунктов ФАГС (1999-2003гг.)

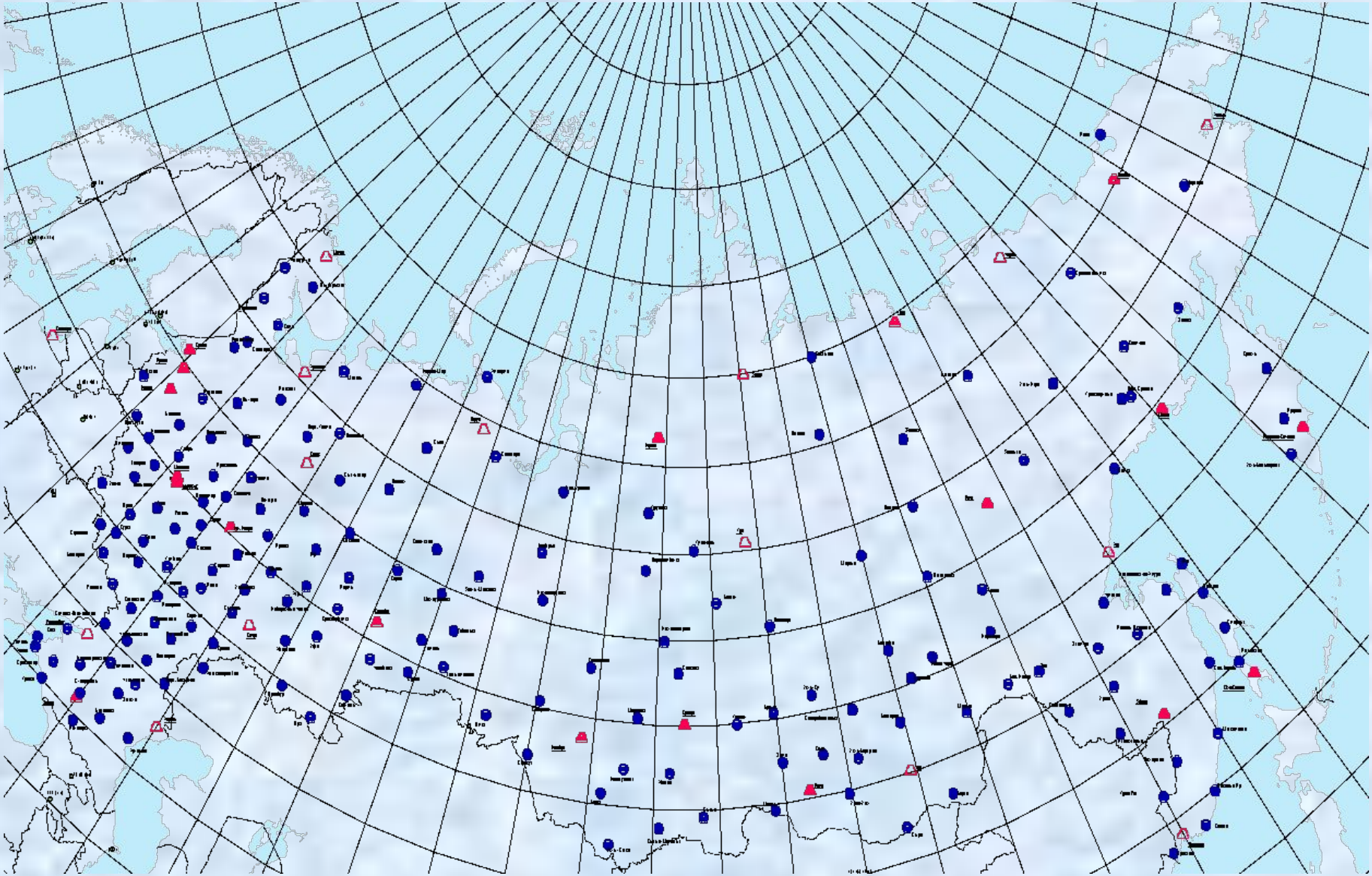
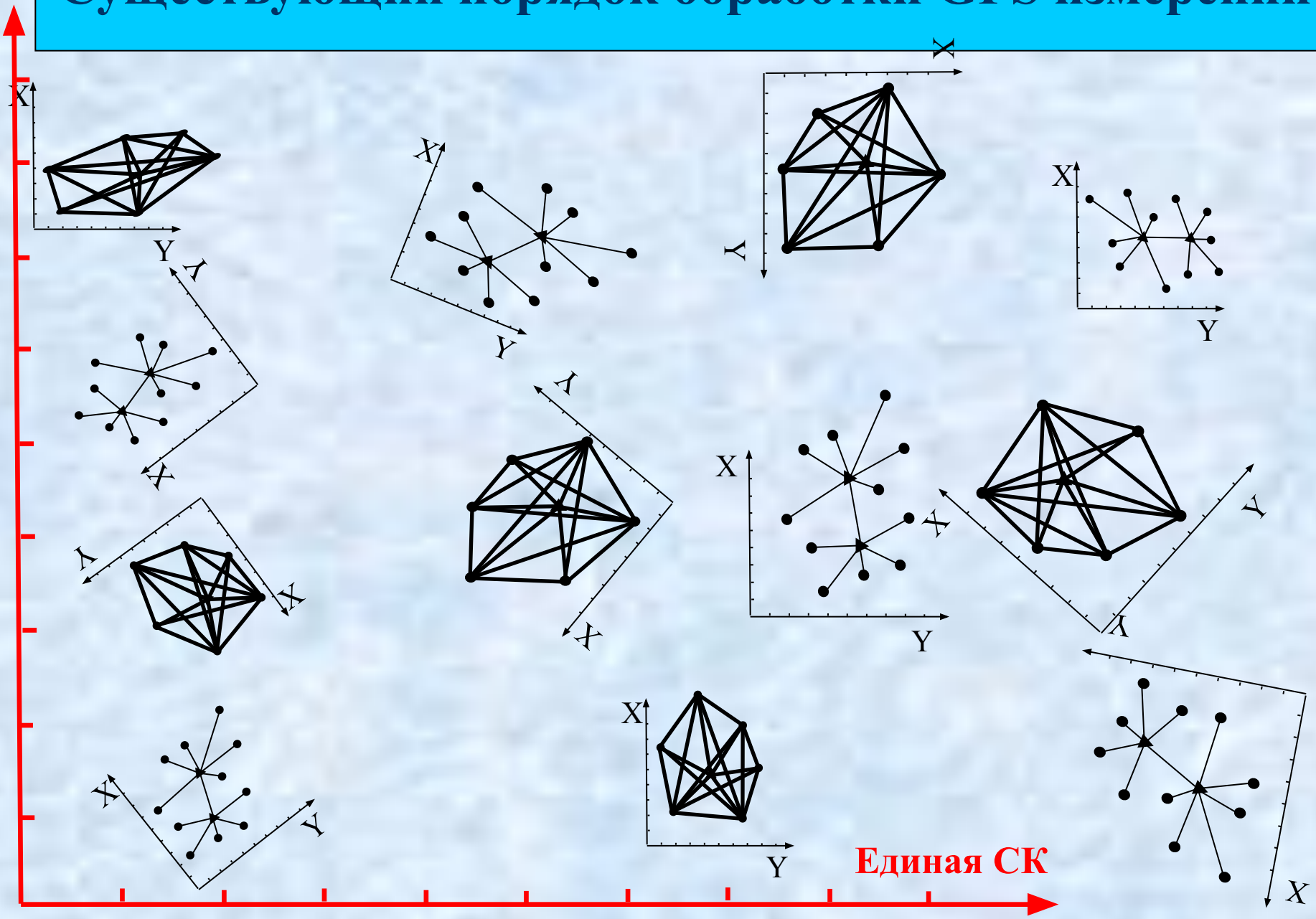


Схема расположения пунктов ОГС

Существующий порядок обработки GPS измерений



«Идеальная» схема обработки GNSS измерений

<u>Уравнивание сети в единой геоцентрической СК (например, ITRF2005)</u>

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.

<u>Перевычисление полученных данных в местные СК по точным формулам</u>

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

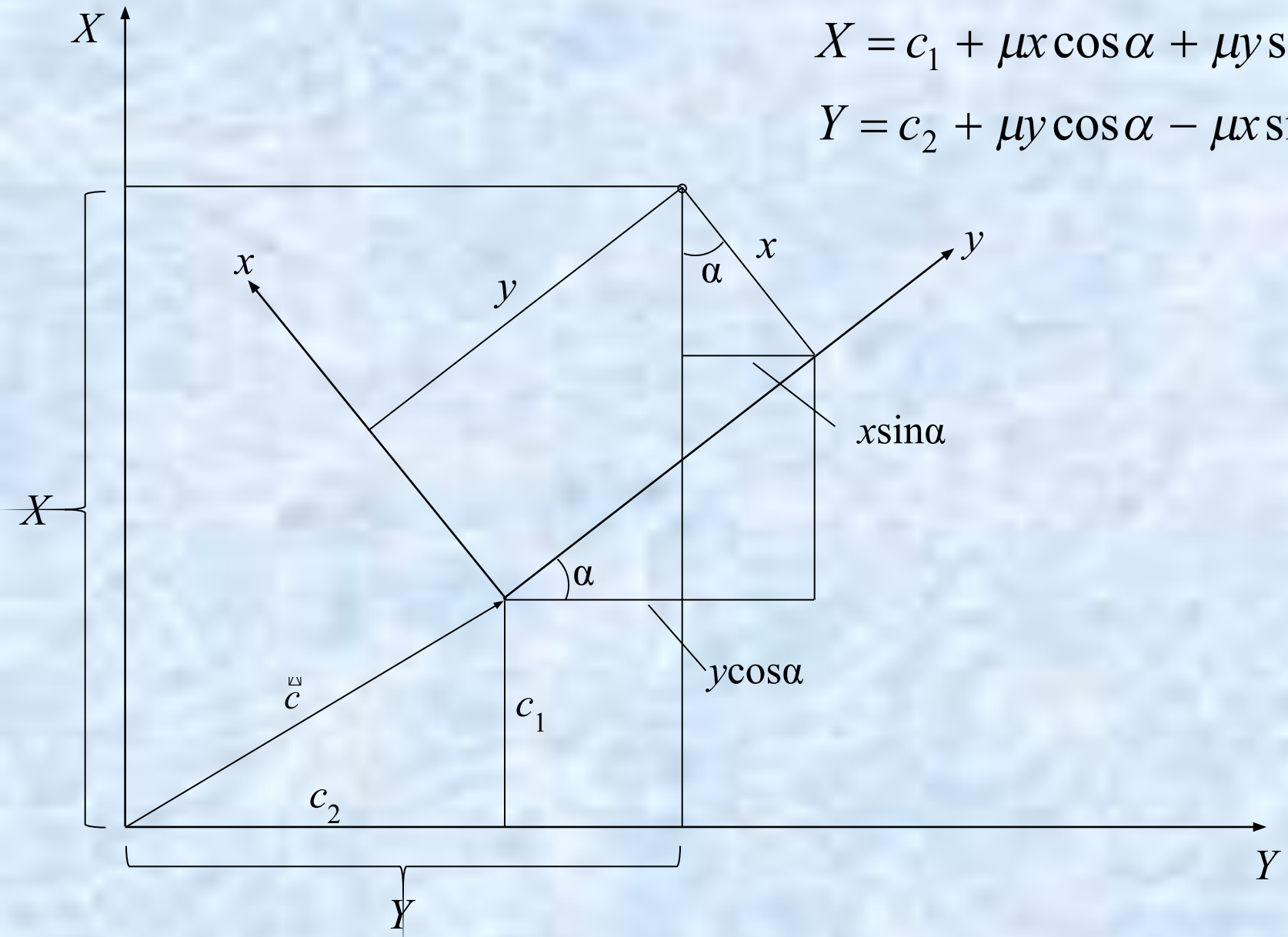
<u>Цель трансформации</u> – преобразование результатов GPS/ГЛОНАСС позиционирования в заданную систему координат, определяемую пользователем.

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

Трансформация плановых координат

$$X = c_1 + \mu x \cos\alpha + \mu y \sin\alpha,$$

$$Y = c_2 + \mu y \cos\alpha - \mu x \sin\alpha.$$



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)

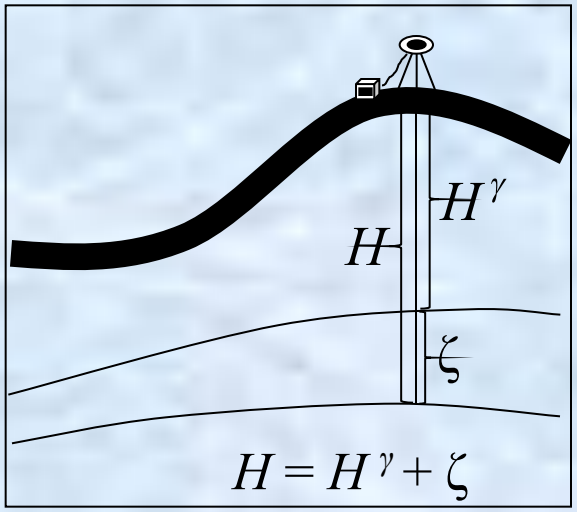
↓

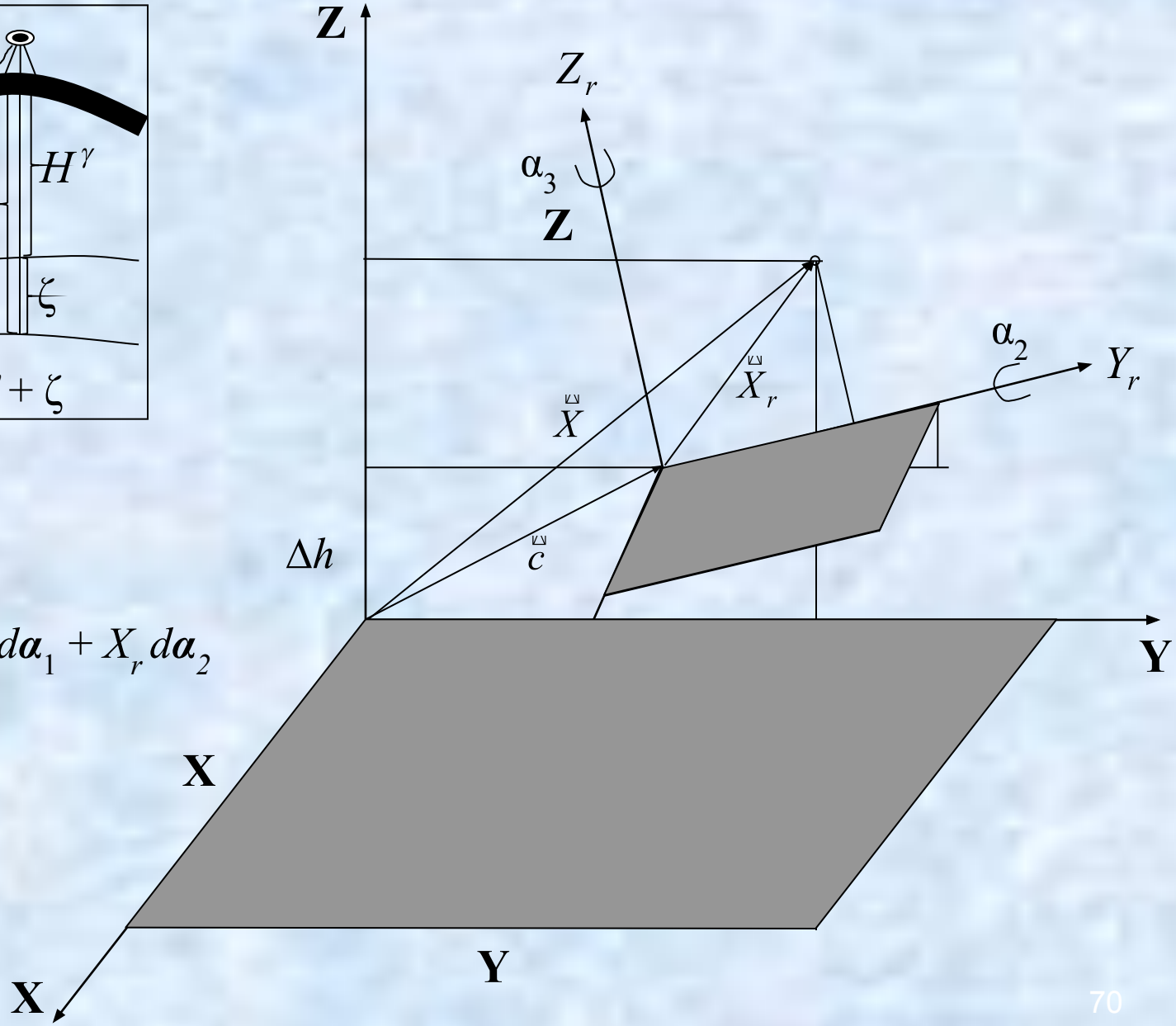
Преобразование геодезических координат пунктов (B, L) в плоские прямоугольные координаты (x, y) в требуемой проекции

↓

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





$$H - H^{\gamma} = \Delta h - Y_r d\boldsymbol{\alpha}_1 + X_r d\boldsymbol{\alpha}_2$$

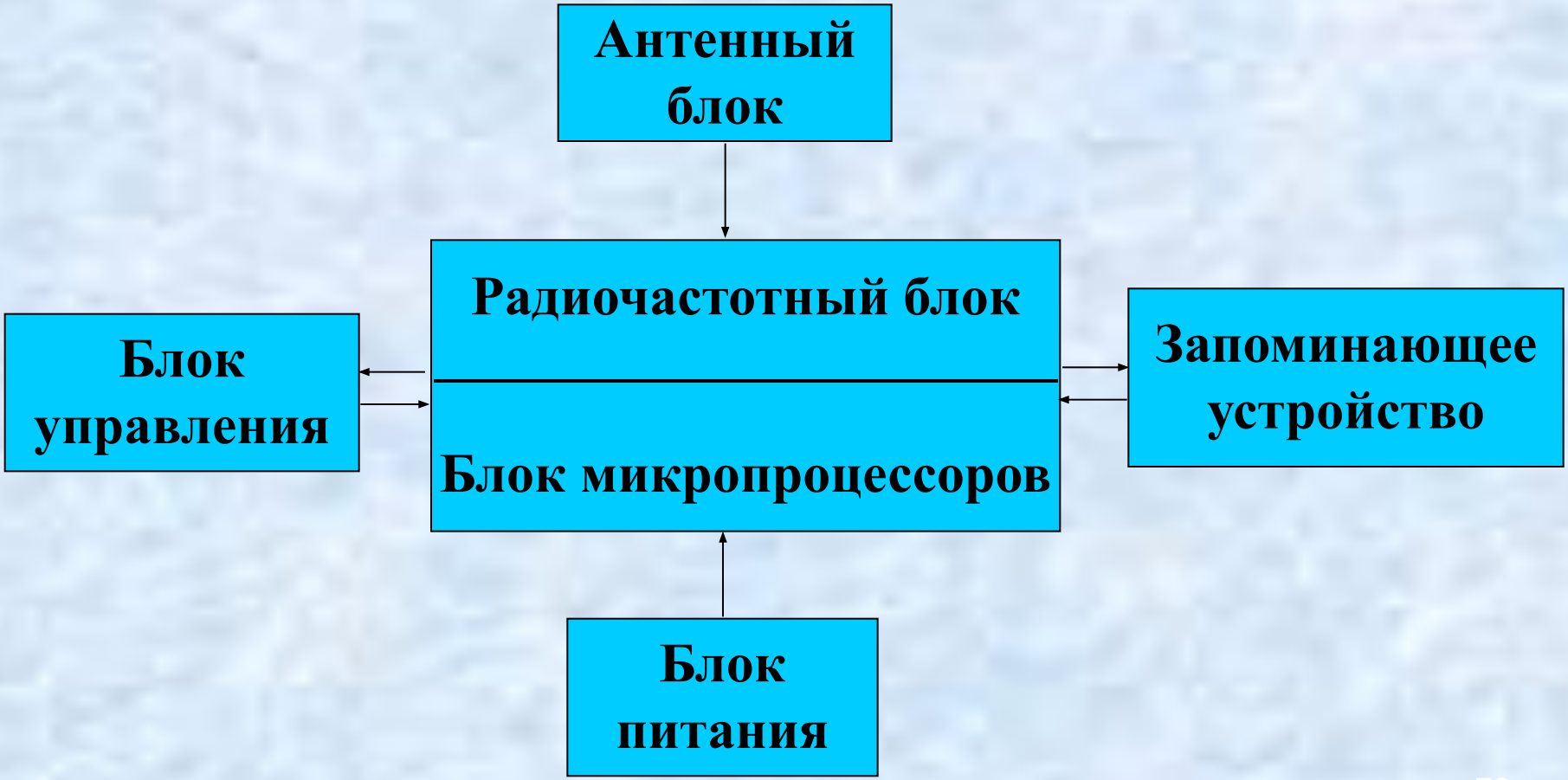
Одна из возможных схем трансформации высот из системы WGS-84 в систему координат пользователя

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^{γ}.

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

<u>Системная классификация.</u>

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

<u>Классификация по видам принимаемого сигнала.</u>

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 10º-15 º. 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 – 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