

Государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
ГОУ ВО «СГУГиТ»

# Спутниковые системы и технологии позиционирования

ст. преп. каф. ИГиМД,  
к.т.н. Е.К. Лагутина

# Раздел 1.

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ



# **Лекция 1. Понятие и архитектура ГНСС**

# Целью изучения курса получить представление:

- об общей теории определения координат пунктов спутниковым методом;
- о теории определения компонент базовых линий из наблюдений фазовыми приемниками;
- о проектировании, организации, выполнении и обработка наблюдений спутников глобальных навигационных систем для различных видов топографо-геодезических работ, включая обеспечение геодезическими данными для городского и земельного кадастра, построения ФАГС, ВАГС, а так же для проведения фундаментальных исследований;
- о действии ошибок при наблюдениях спутниковыми методами;
- о теории преобразования плановых координат и высот в спутниковом методе геодезии.

# Преимущества использования ГНСС в геодезии:

- Широкий диапазон точностей - от первых метров до первых миллиметров практически на любых расстояниях.
- Отсутствует необходимость в обеспечении прямой видимости между пунктами.
- Повышение производительности по сравнению с обычными технологиями в 10-15 раз.
- Возможность выполнения измерений в движении.
- Возможность выполнения непрерывных наблюдений в режиме реального времени.
- Определение трех координат объекта.
- Высокий уровень автоматизации - быстрота обработки и уменьшение субъективных ошибок.
- Почти полная независимость от погоды.

# Недостатки использования ГНСС в геодезии:

- Проблема согласования с результатами классических измерений (привязки к ГГС).
- Зависимость от препятствий и радиопомех.
- Точность определения высот в 2-5 раз уступает точности определения плановых координат.
- Высокая стоимость оборудования, сложное программное обеспечение.

# Глобальная навигационная спутниковая система

- комплексная электронно-техническая система, состоящая из совокупности наземного и космического оборудования, предназначенная для определения местоположения (географических координат и высоты), а также параметров движения (скорости и направления движения и т. д.) для наземных, водных и воздушных объектов.
- система радионавигационных искусственных спутников Земли, службы контроля и управления и приёмников спутниковых радиосигналов, обеспечивающая координатно-временные определения на земной поверхности и в околоземном пространстве.

# Структура ГНСС

- Подсистема космических аппаратов;
- Подсистемы контроля и управления;
- Подсистема пользователей.

# Сегмент ГНСС

- **Подсистема космических аппаратов**
  - высокоорбитальные спутники, снабженные бортовым навигационным передатчиком, высокоточными атомными часами, бортовым управляющим комплексом, системой ориентации и стабилизации и так далее;
- Подсистемы контроля и управления;
- Подсистема пользователей.

# Задачи сегмента ГНСС

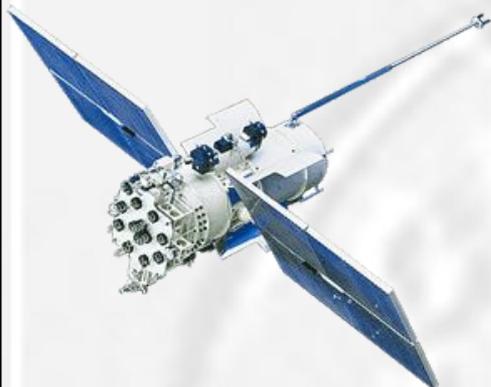
- **Подсистема космических аппаратов:**
  - прием и хранение данных, передаваемых контрольным сегментом,
  - поддержание точного времени посредством нескольких бортовых атомных стандартов частоты,
  - передача информации и сигналов пользователю.
- Подсистемы контроля и управления;
- Подсистема пользователей.

# Группировка GPS

Блок спутников	II	IIA	IIIR	IIIRM	IIIF	IIIA
Период запусков	89-90	90-97	97-04	05-09	10-11	2012
Масса, кг	885	1500	2000	2000	2170	2270
Срок жизни	7.5	7.5	10	10	15	15
Бортовые часы	Cs	Cs	Rb	Rb	Rb+Cs	Rb+Hg
Автоном. работа, дней	14	180	180	180	>60	
Навигац. сигнал	L1	C/A+P		+M		+C
	L2	P		+M+C		
	L5	-			C	
Запущено	9	19	12	8	2	1
Работают сейчас	0	11	12	7	2	0



# Группировка ГЛОНАСС



Блок спутников		ГЛОНАСС	ГЛОНАСС-М	ГЛОНАСС-К
Период запусков		1982-2005	2001	2011
Масса, кг		1250	1480	935
Срок жизни		3	7	10
Бортовые часы		Cs	Cs	
Автоном. работа, дней				
Навигац. сигнал	L1	OF+SF	OF+SF	OF+SF
	L2	SF	OF+SF	OF+SF
	L3	-	-	OC
Запущено		89	37	1
Работают сейчас		0	30	0

# Основные характеристики созвездий ГНСС

ПАРАМЕТР, СПОСОБ		СРНС ГЛОНАСС	GPS NAVSTAR	TEN GALILEO
Число	НС (резерв)	24 (3)	24 (3)	27 (3)
	орбит. пл./НС в пл.	3/8	6/4	3/9
Тип орбит		Круговая ( $e=0\pm 0.01$ )	Круговая	Круговая
Большая полуось орбиты, км		25510	26560	29600,318
Наклонение орбиты, градусы		65	55	56
Номинальный период обращения		11:15:44	11:57:58	14:04:42
Способ разделения сигналов		Частотный	Кодовый	Кодово-частотный
Несущие частоты радиосигналов, МГц		L1=1602.5625...1615.5 L2=1246.4375...1256.5	L1=1575.42 L2=1227.60 L5=1176.45	E1=1575.42 E5=1191.795 E5A=1176.46 E5B=1207.14 E6=12787.75

# Основные характеристики созвездий ГНСС

ПАРАМЕТР, СПОСОБ	СРНС ГЛОНАСС	GPS NAVSTAR	TEN GALILEO
тип дальномерного кода	М-последовательн. (СТ-код 511 зн.)	Код Голда (С/А-код 1023 зн.)	М-последовательн.
тактовая частота дальномерного кода, МГц	0.511	1.023 (С/А-код) 10.23 (Р, Y-код)	E1=1.023 E5=10.23 E6=5.115
Система отсчета времени	UTS (SU)	UTS (USNO)	UTS (GST)
Система отсчета координат	ПЗ-90/ПЗ90.2	WGS-84	ETRF-00
Тип эфемерид	Геоцентрические координаты и их производные	Модифицированные кеплеровы элементы	Модифицированные кеплеровы элементы
Максимальное пребывание в зоне видимости, ч	5.5	4.1	нет данных

# Опрос по определениям

- ГНСС –
- Структура ГНСС –
- Навигационный спутник –
- Блок спутников –
- Эфемерида –

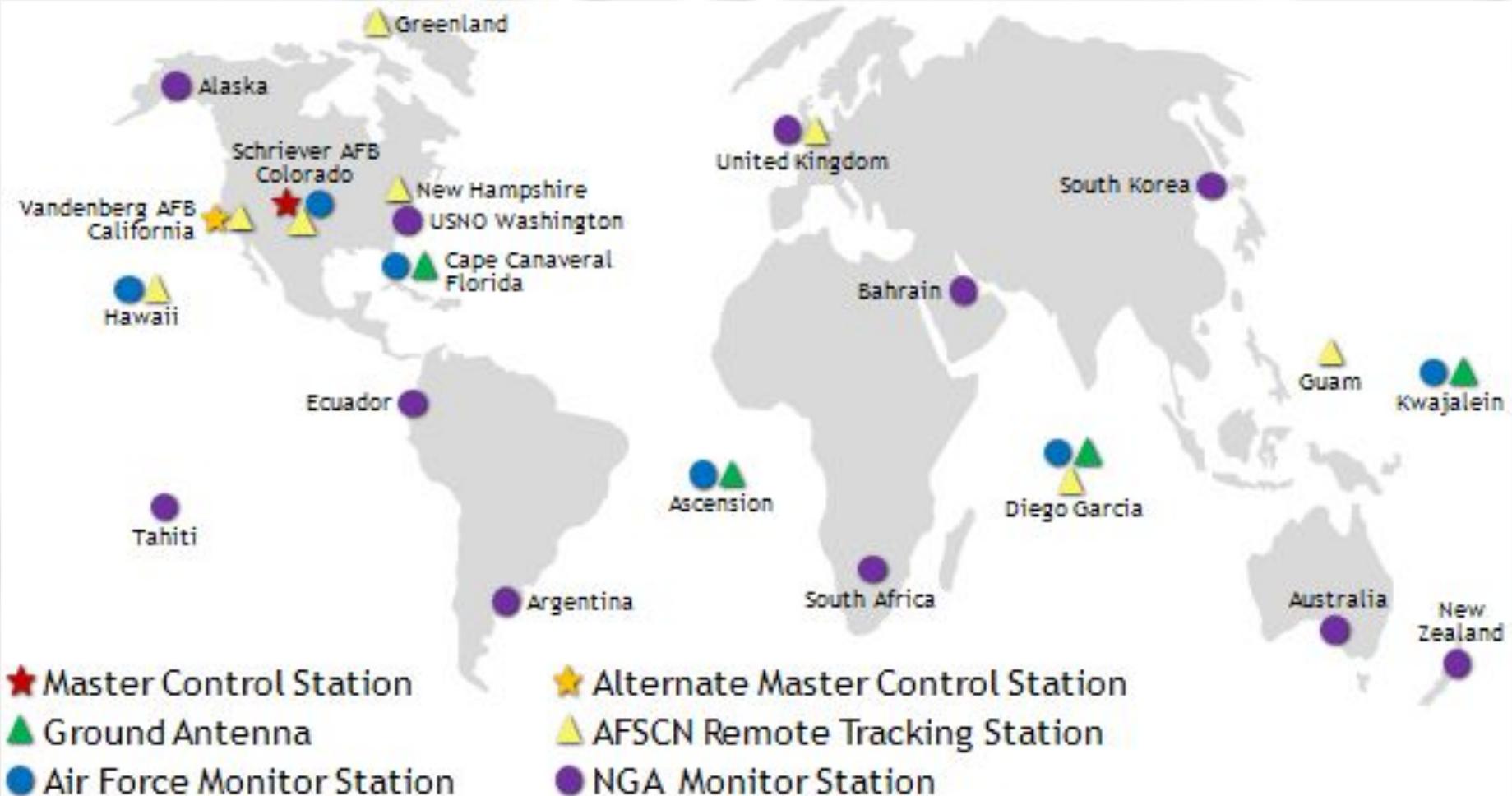
# Сегмент ГНСС

- Подсистема космических аппаратов;
- **Подсистема контроля и управления**
  - сеть станций мониторинга, центры управления и станции управления космическим сегментом, отслеживающие положение спутников, передающие на орбиту обновленную информацию и управляющие их полетом
- Подсистема пользователей.

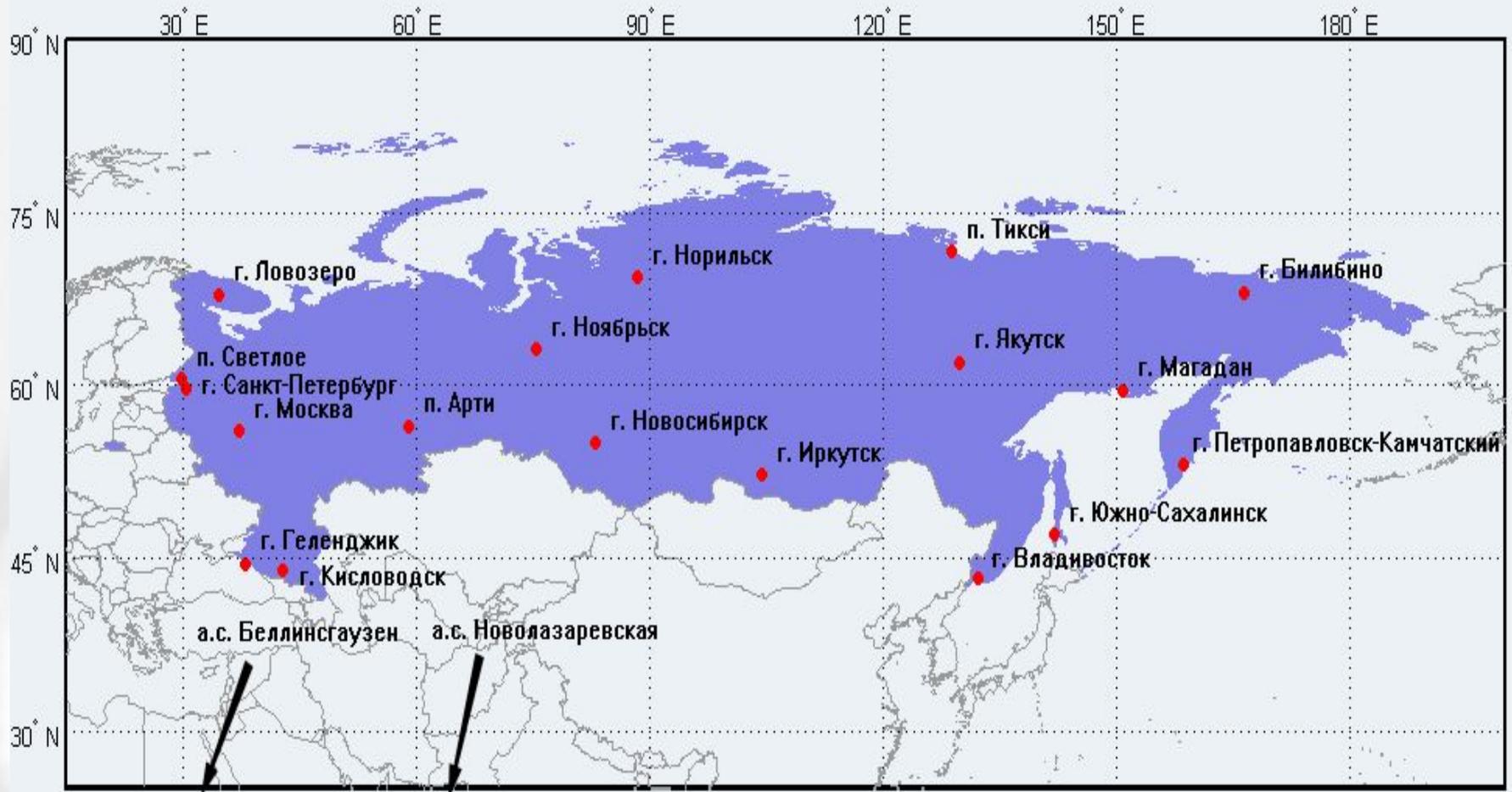
# Задачи сегмента

- Подсистема космических аппаратов;
- **Подсистемы контроля и управления:**
  - отслеживание орбит спутников,
  - контроль рабочего состояния спутников,
  - формирование системного времени,
  - расчет эфемерид спутников и параметров часов,
  - обновление спутниковых навигационных сообщений,
  - осуществление небольших маневров спутников для поддержания орбит (по мере необходимости).
- Подсистема пользователей.

# Подсистема контроля и управления: GPS



# Подсистема контроля и управления: ГЛОНАСС



# Сегмент ГНСС

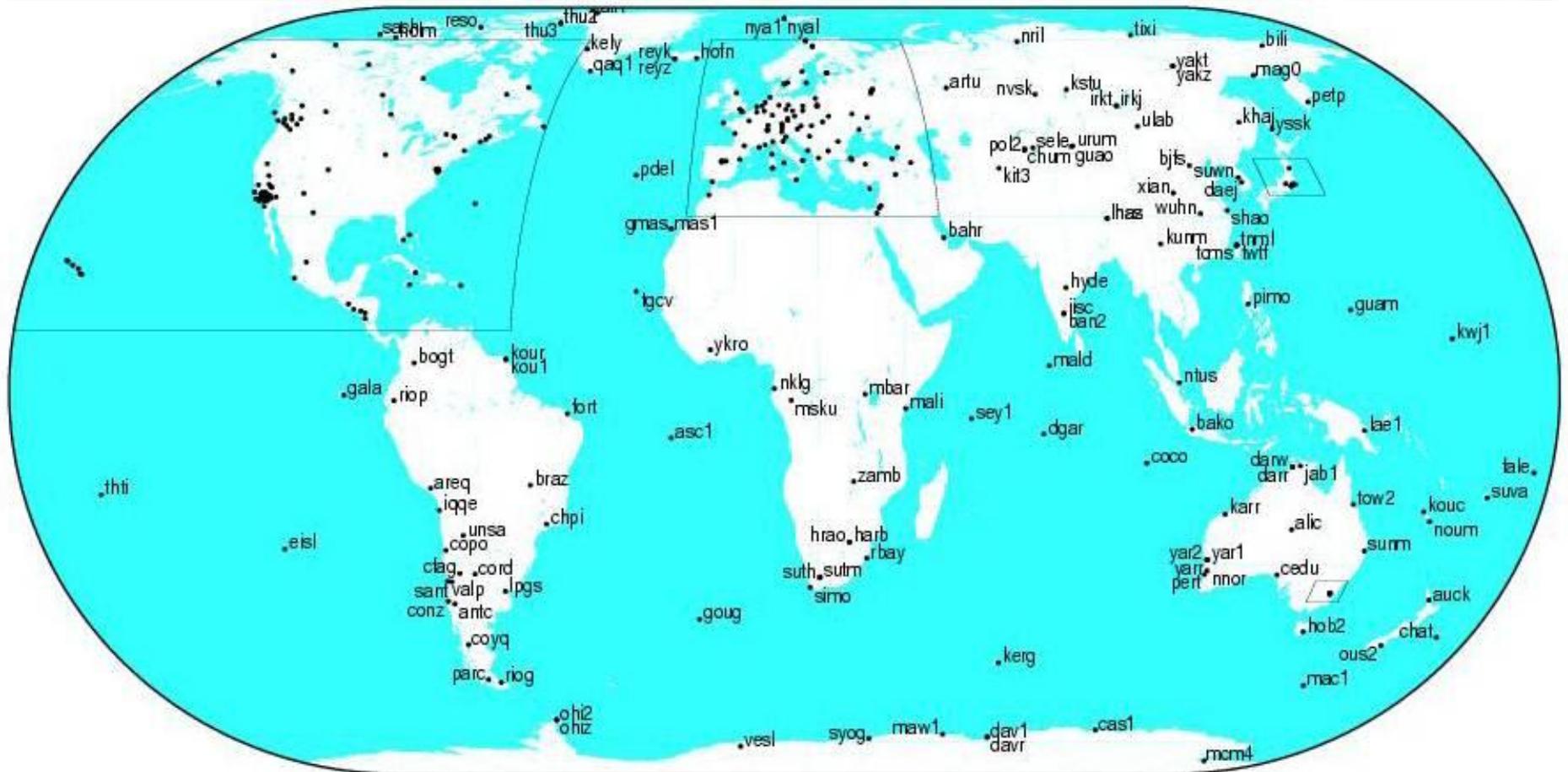
- Подсистема космических аппаратов;
- Подсистемы контроля и управления;
- **Подсистема пользователей**
  - Спутниковый приемник – радиоприёмное устройство для определения координат текущего местоположения антенны, на основе данных о временных задержках прихода радиосигналов, излучаемых спутниками ГНСС;
  - Информационно-технические службы.

# Информационно-технические службы ГНСС

- Международная служба вращения Земли (МСВЗ)
- Международная ГНСС Служба (IGS)
- Информационная система данных о динамике земной коры (CDDIS)
- Национальные активные контрольные сети (CORS, CACS, Geosciences Australia и т.д.)

<b>CDDIS</b>	<a href="http://www.cddisa.gsfc.nasa.gov">http://www.cddisa.gsfc.nasa.gov</a>
<b>Файлы наблюдений IGS</b>	<a href="ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/">ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/</a>
<b>Точные орбиты IGS</b>	<a href="ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/">ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/</a>
<b>Координаты ITRF</b>	<a href="http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/table2.txt">http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/table2.txt</a>
<b>NGS (информация по GPS антеннам)</b>	<a href="http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.shtml">www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.shtml</a>

# Глобальная сеть IGS



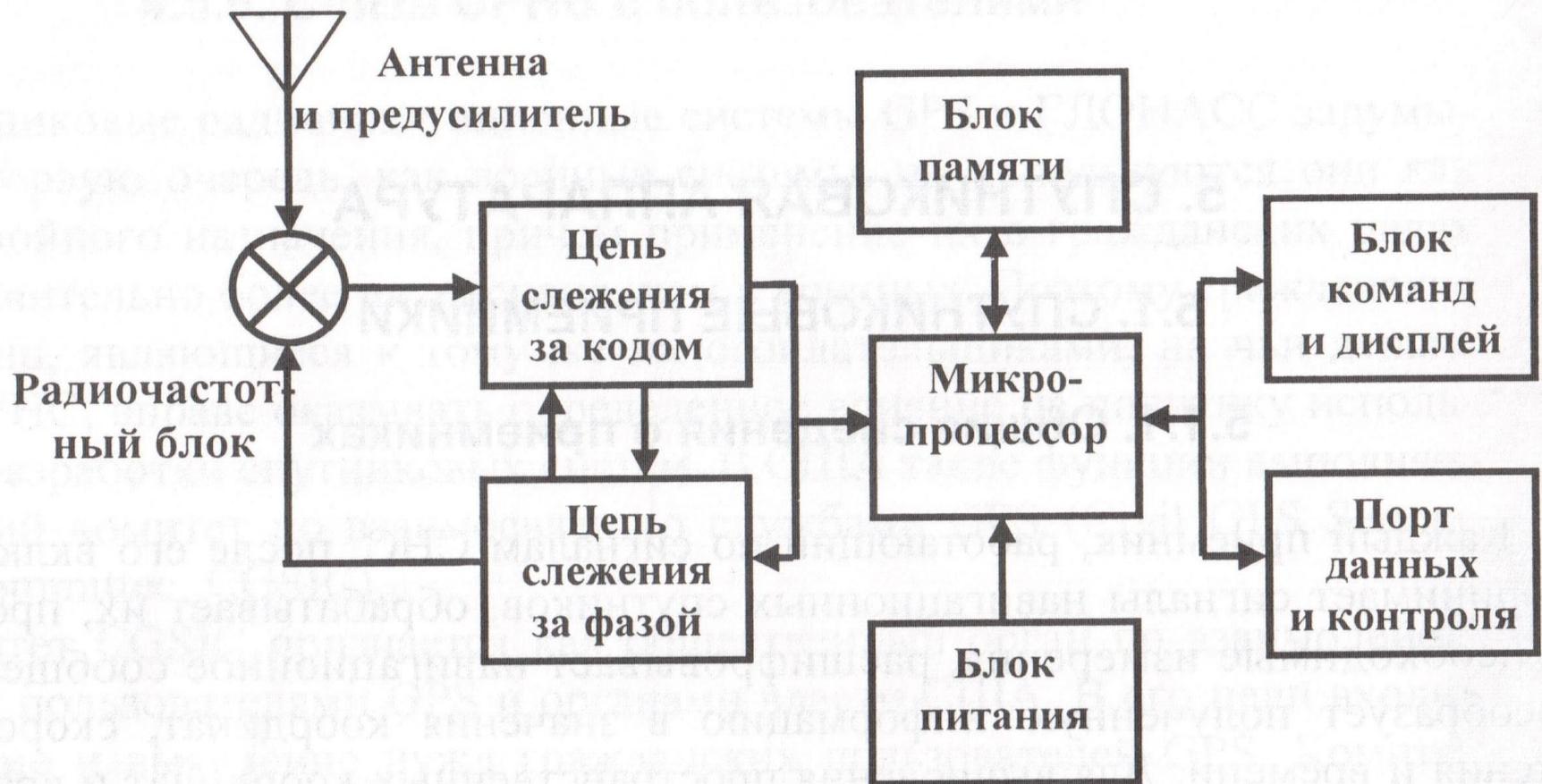
# Классификация спутниковых приемников

- Вид сигнала:
  - *кодовые* – приемник, требующий знания, по крайней мере, одного системного кода для измерения псевдодальностей и декодирования навигационных данных.
  - *фазовые* – приемники определяют положение путем обработки измерений фазы несущей волны, наблюдаемой в течение некоторого времени.
- По количеству частот можно выделить:
  - *одночастотный* – приемник, принимающий сигналы лишь на одной из нескольких частот, излучаемых спутниками ГНСС;
  - *многочастотные* – приемник, принимающий сигналы нескольких частот, излучаемых спутниками ГНСС;

# Классификация спутниковых приемников

- По количеству используемых систем:
  - *односистемные* – поддерживают только одну ГНСС;
  - *многосистемные* – принимают сигналы двух и более ГНСС;
- По виду работ или достигаемой точности:
  - *навигационные* – порядка 10-15 м в лучшем случае, а обычно 50-100 м и грубее;
  - *навигационно-топографические* – от 10 м до 1 дм при расстояниях до 50 - 500 км;
  - *геодезические* – 3-5 мм + 1мм/км;
  - *приемники для определения и хранения времени* – 5-10 нс.

# Структурная схема спутникового приемника



# Опрос по определениям

- Подсистема контроля и управления –
- Информационно-технические службы –
- Спутниковый приемник –
- Классификация спутниковых приемников –
- Функциональные блоки спутникового приемника –



# **Лекция 2: Навигационные сигналы**

# Физические принципы измерений

Спутниковые методы определения координат измеряют **линейные величины** – *расстояния между объектами и разности этих расстояний.*

При измерениях вдоль дистанции распространяется электромагнитный сигнал.

Измеряемой величиной является *время распространения электромагнитной волны вдоль дистанции, или разность фаз двух колебаний.*

# Формирование несущей частоты

Формирование сигнала на спутнике начинается в *квантовом генераторе частоты*, так называемых атомных часах, которые формируют основную частоту - электромагнитное колебание.

*КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТЫ (или активный квантовый стандарт частоты) – устройство, излучающее электромагнитные колебания при квантовом переходе частиц (атомов и молекул) из одного энергетического состояния в другое.*

В настоящее время на спутниках ГНСС устанавливают генераторы, частота излучаемых колебаний:

- цезиевый – 9 192 631 770 Гц;
- рубидиевый – 6 835 000 000 Гц;

# Параметры сигнала

Электромагнитное колебание может быть охарактеризовано четырьмя параметрами: амплитудой, частотой, фазой и поляризацией.

Если один из этих параметров изменяется некоторым контролируемым способом (т.е. модулируется) для передачи информации, тогда сигнал становится сообщением.

Основная частота ГНСС модулируются по фазе бинарными кодами.

Каждый код является последовательностью бинарных цифр или *чипов*, которые повторяются с определенным интервалом.

# Параметры сигнала

- *Фазовая модуляция – это один из видов контролируемого изменения параметров электромагнитного колебания, при котором его фаза меняется скачкообразно, в зависимости от информационного сообщения.*

$$s_m(t) = g(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_m(t)],$$

- где  $g(t)$  - огибающая сигнала;  $\varphi_m(t)$  – модуляция сигнала, принимающая  $M$  дискретных значений,  $f_c$  – частота несущей,  $t$  — время.
- *Двоичная фазовая манипуляция (англ. BPSK — binary phase-shift keying) — изменение фазы несущего колебания на одно из двух значений, нуль или ( $180^\circ$ ).*

# Модуляция сигналов

Характеристика  
несущей волны

длина  $\lambda$ , см

частота  $f$ , МГц

L1

$\approx 19$

1575.42

L2

$\approx 24$

1227.60

Дальномерные  
коды

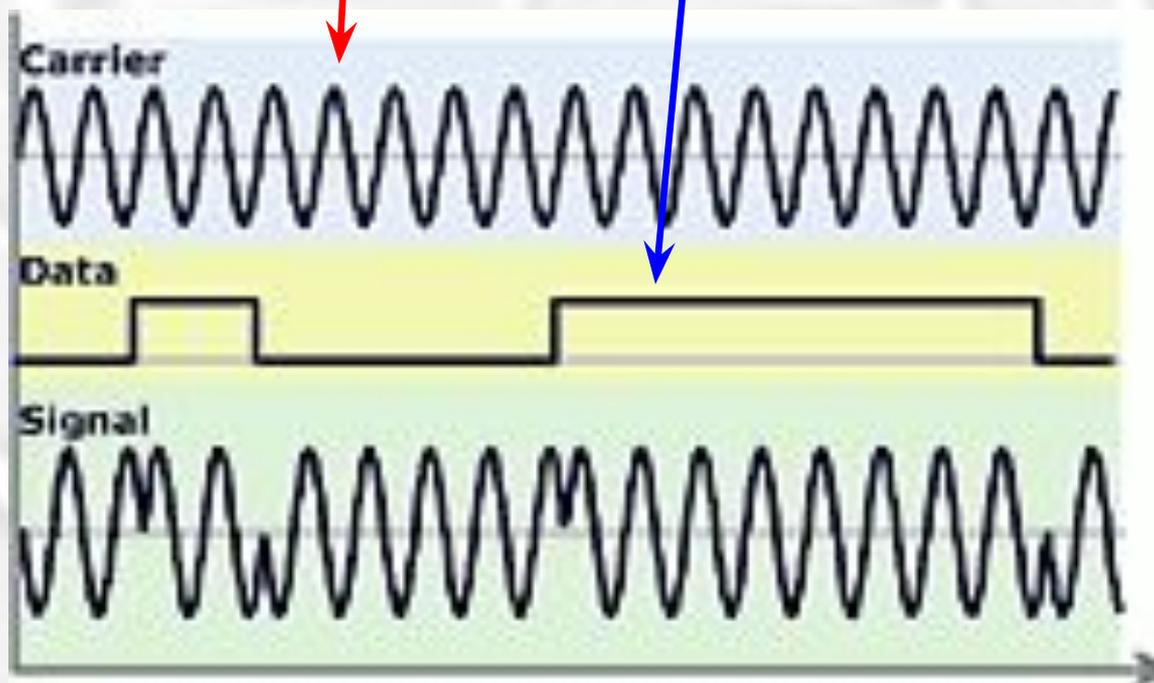
C/A – «грубый»

P – «точный»

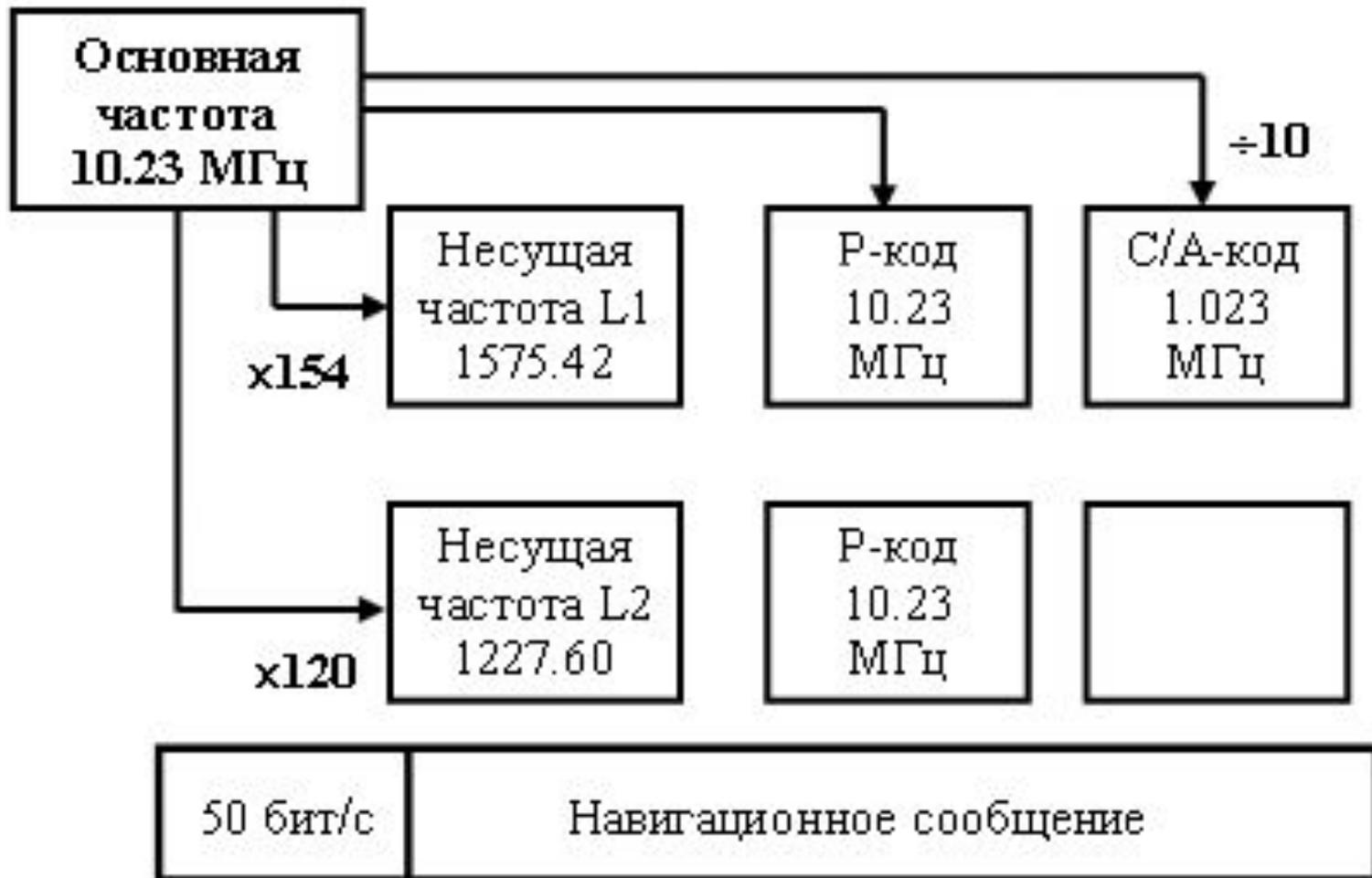
длина чипа, м

300

30



# Структура сигнала GPS



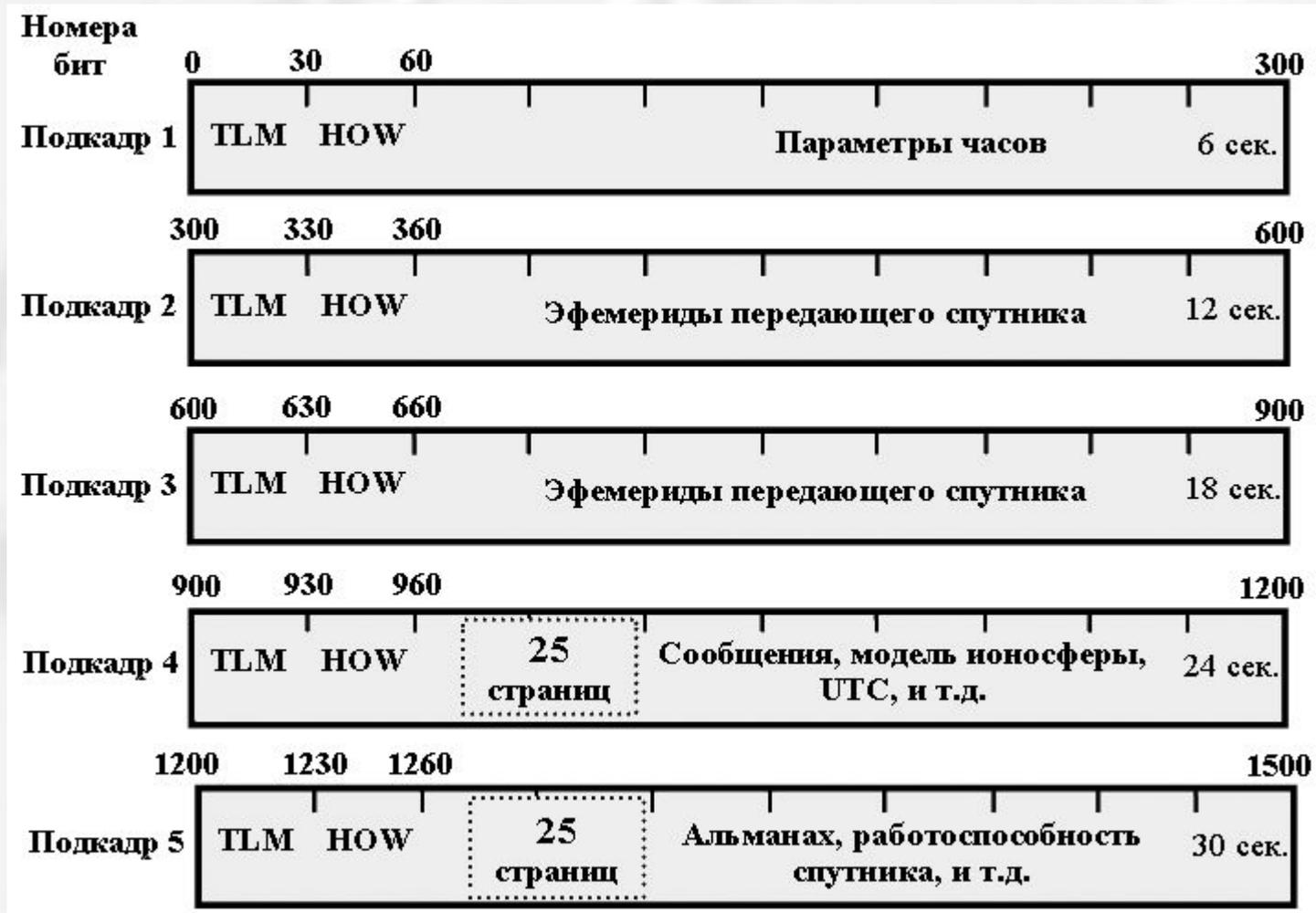
# Опрос по определениям

- Генератор частоты –
- Виды модуляции –
- Фазовая модуляция –
- Навигационный сигнал –



# **Лекция 3: Навигационные сообщения**

# Навигационное сообщение



# Основные виды спутниковых наблюдений

Универсальное обозначение для разных видов наблюдений:

- Фазовая дальность L1
- Фазовая дальность L2
- С/А-кодовая дальность на L1 – C1
- Р-кодовая дальность на L1 – P1  
L2 – P2

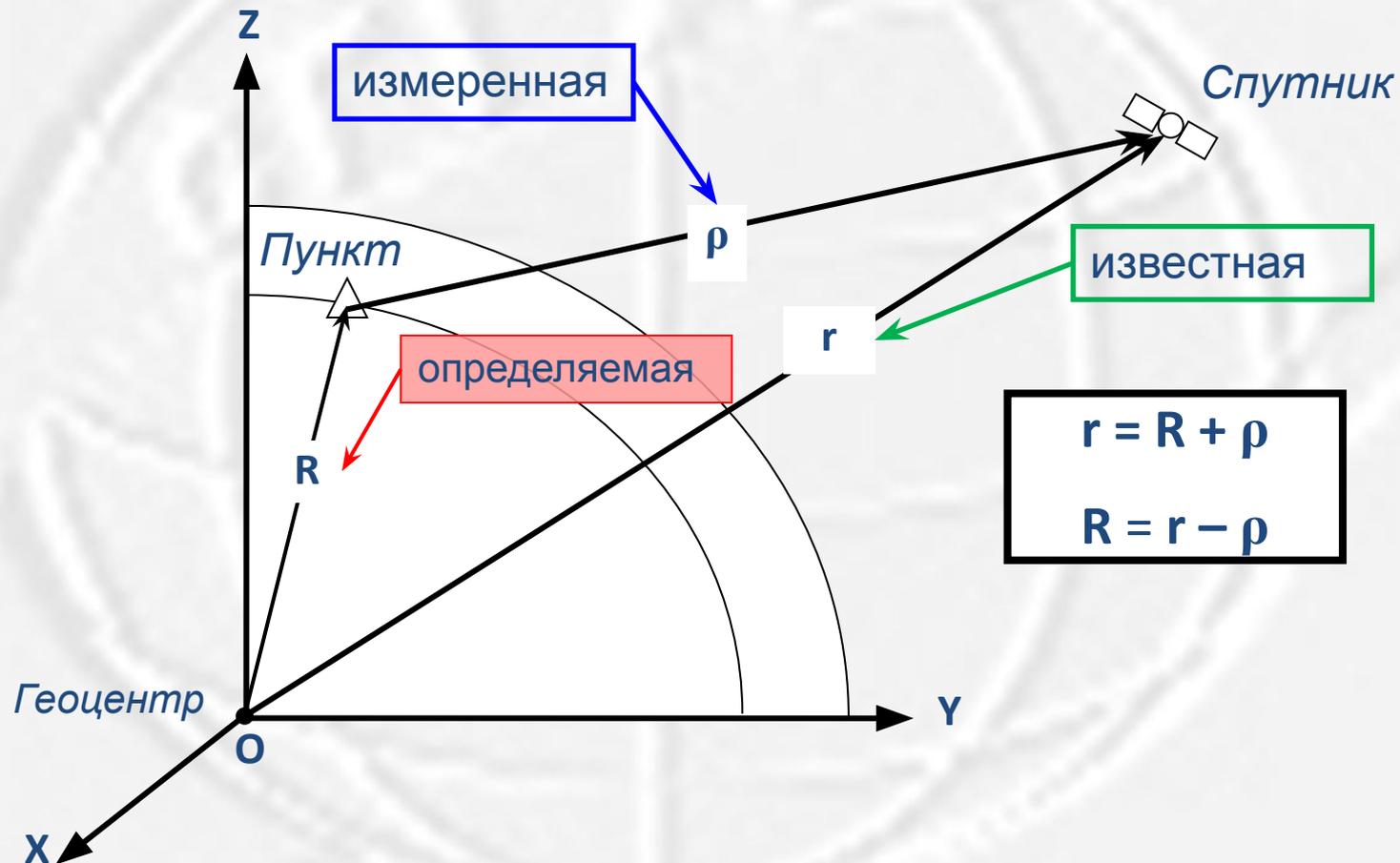
# Опрос по определениям

- Навигационное сообщение –

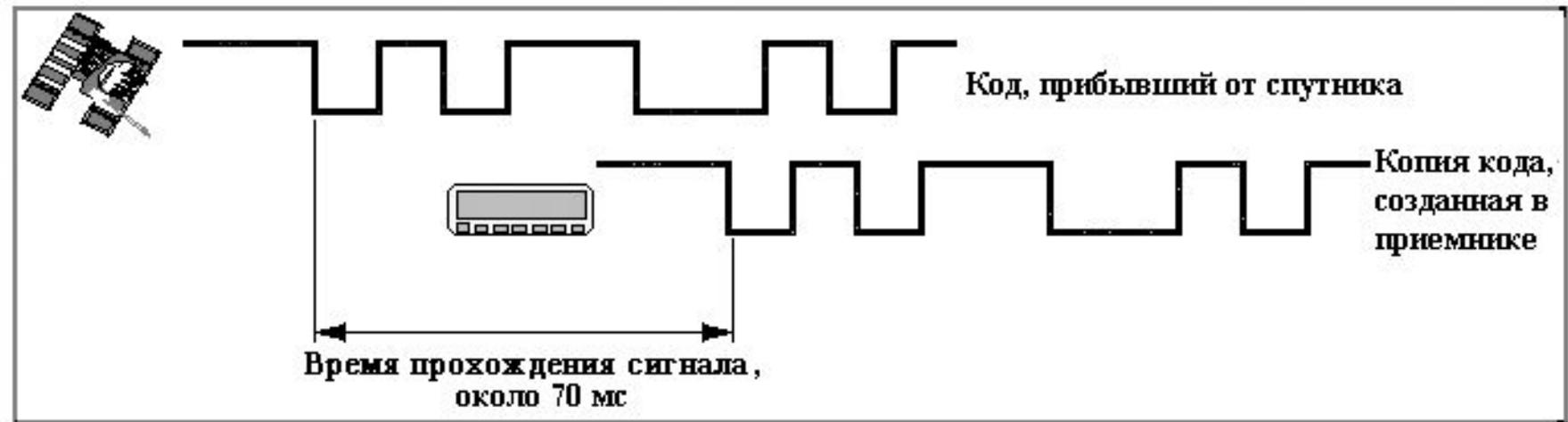


# **Лекция 4: Радиотехнические принципы измерения навигационных параметров**

# Основное уравнение космической геодезии



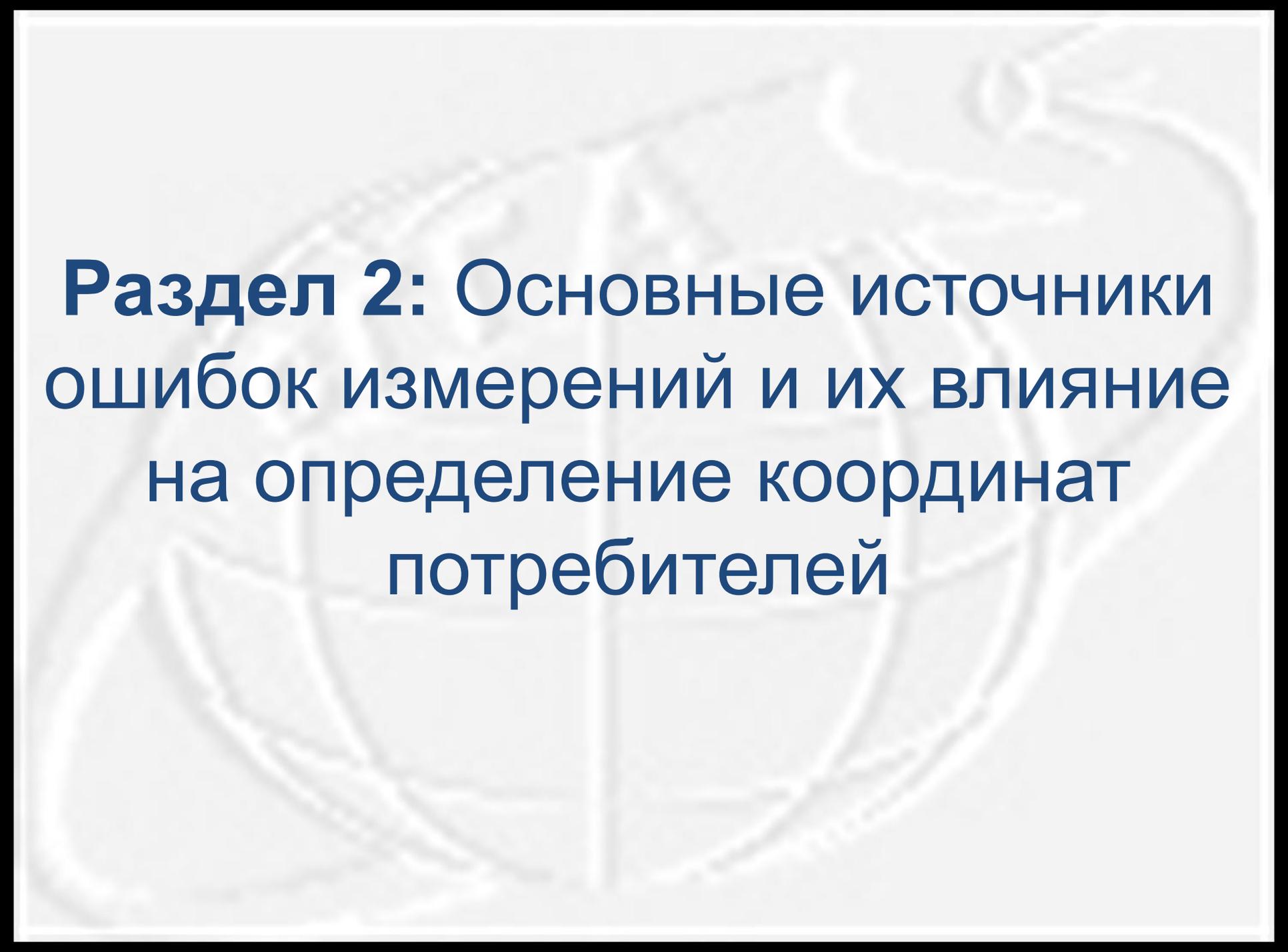
# Уравнение измерений



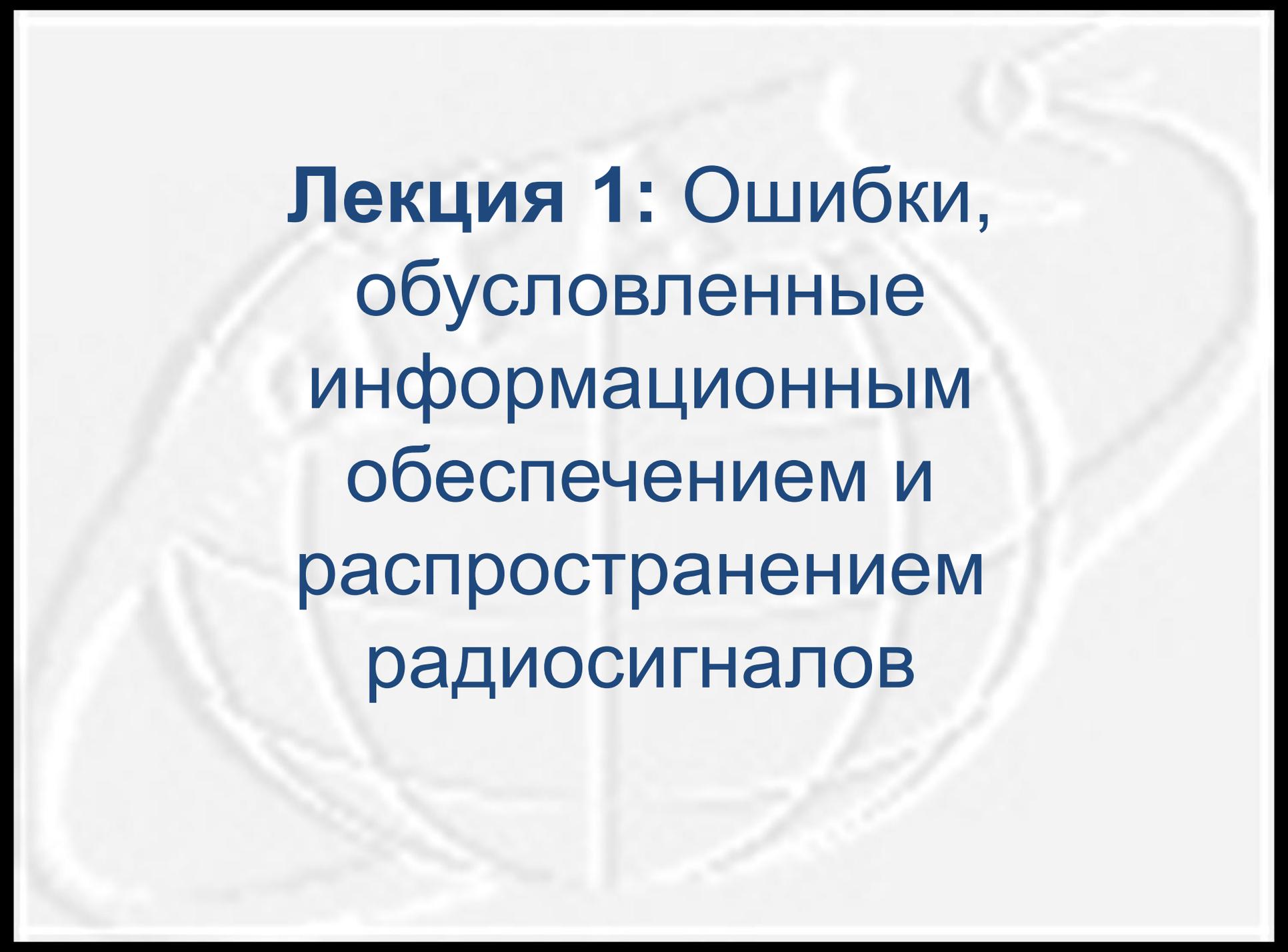
$$\tilde{\rho}_i^k = \rho_i^k + b^k - b_i + \Delta_{\text{trop.}} + \Delta_{\text{iono.}} + \Delta_{\text{noise}}$$

$$\tilde{\Phi}_i^k = \Phi_i^k + \lambda \cdot b^k - \lambda \cdot b_i + \lambda \cdot N + \Delta_{\text{trop.}} + \Delta_{\text{iono.}} + \Delta_{\text{noise}}$$





## **Раздел 2: Основные источники ошибок измерений и их влияние на определение координат потребителей**



**Лекция 1: Ошибки,  
обусловленные  
информационным  
обеспечением и  
распространением  
радиосигналов**

# Погрешности ГНСС:

В ГЛОНАСС/GPS технологиях можно выделить четыре основных источника ошибок:

- **ошибки информационного обеспечения;**
- **влияние внешних условий по трассе распространения сигнала;**
- **ошибки аппаратуры;**
- **ошибки наблюдателя;**

# Ошибки эфемерид

# Погрешности ГНСС:

## влияние среды распространения сигнала

- Ионосфера

Интегральная электронная концентрация по пути сигнала

$$TEC = 10^{-16} \frac{I \cdot c \cdot (f_i)^2}{40.3}$$

Полная ионосферная поправка:  $I = \gamma \cdot I^z \cdot OF_1$

Величина зенитной ионосферной поправки:

$$I^z = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos\left(\frac{2\pi(t_{\text{мест}} - A_3)}{A_4}\right), & \text{если } |t_{\text{мест}} - A_3| < \frac{A_4}{4}, \\ \text{иначе } A_1 \end{cases}$$

Функция отображения ионосферы:

$$OF_1 = 1 + 16 \cdot \left(0.53 - \frac{h^i}{180^\circ}\right)^3$$

# Погрешности ГНСС:

## влияние среды распространения сигнала

- Тропосфера

Полная тропосферная задержка  $T = T_{hyd}^z \cdot OF_T^{hyd} + T_{wet}^z \cdot OF_T^{wet}$ .

Гидростатическая и влажная составляющие зенитной тропосферной задержки (Модель Хопфилд)

$$T_{hyd}^z = 77.64 \cdot 10^{-7} \frac{P_A}{T_A} [40136 + 148,72(T_A - 273,16) - H_A] \cdot 2,$$

$$T_{wet}^z = 77,6 \cdot 10^{-7} \frac{4810 \cdot e_A}{T_A^2} (1100 - H_A) \cdot 2.$$

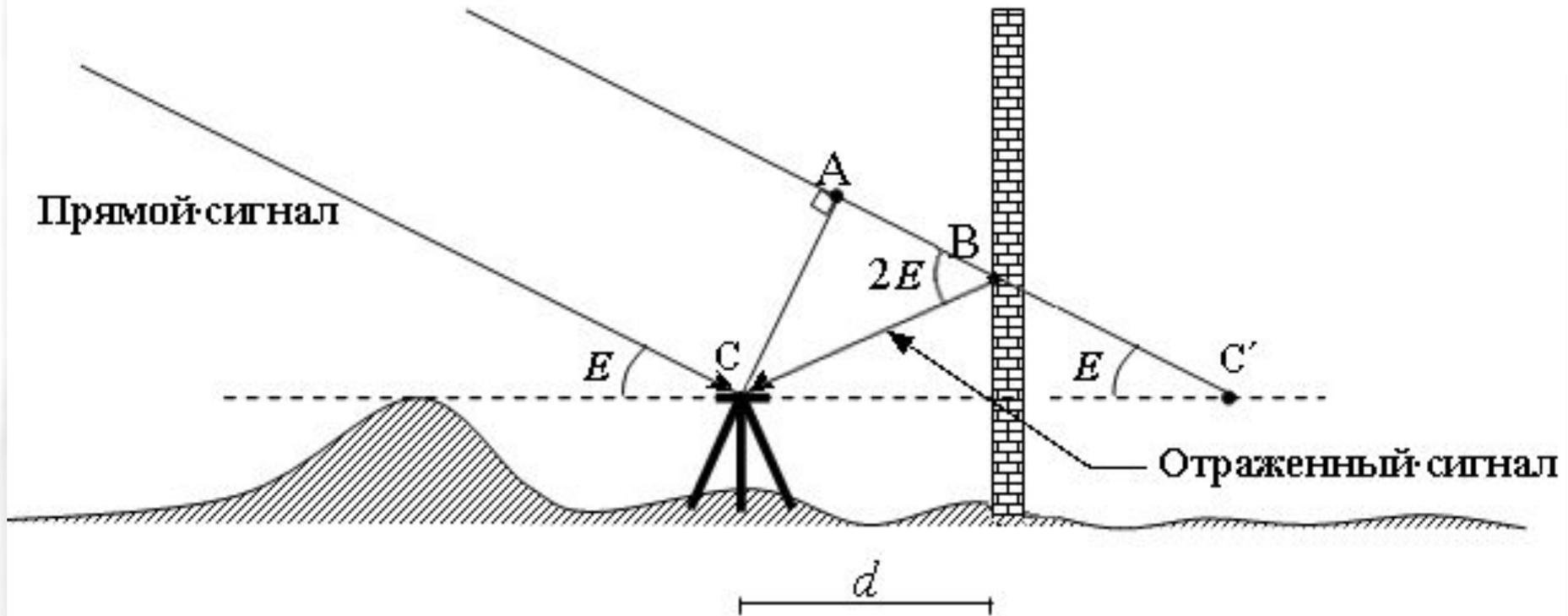
Функция отображения (формула Айфадиса):

$$OF_T = \frac{1}{\sin h^i + \frac{a}{\sin h^i + \frac{b}{\sin h^i + c}}},$$

# Погрешности ГНСС:

## влияние среды распространения сигнала

- Многопутность



# Опрос по определениям

- Источники ошибок в ГНСС –
- Ионосферная задержка –
- Тропосферная задержка –
- Зенитная составляющая задержки –
- Функция отображения –



# **Лекция 2: Ошибки измерений в аппаратуре потребителя**

# Погрешности ГНСС:

В ГЛОНАСС/GPS технологиях можно выделить четыре основных источника ошибок:

- ошибки математической обработки.
- влияние внешних условий по трассе распространения сигнала;
- **ошибки аппаратуры;**
- **ошибки наблюдателя;**

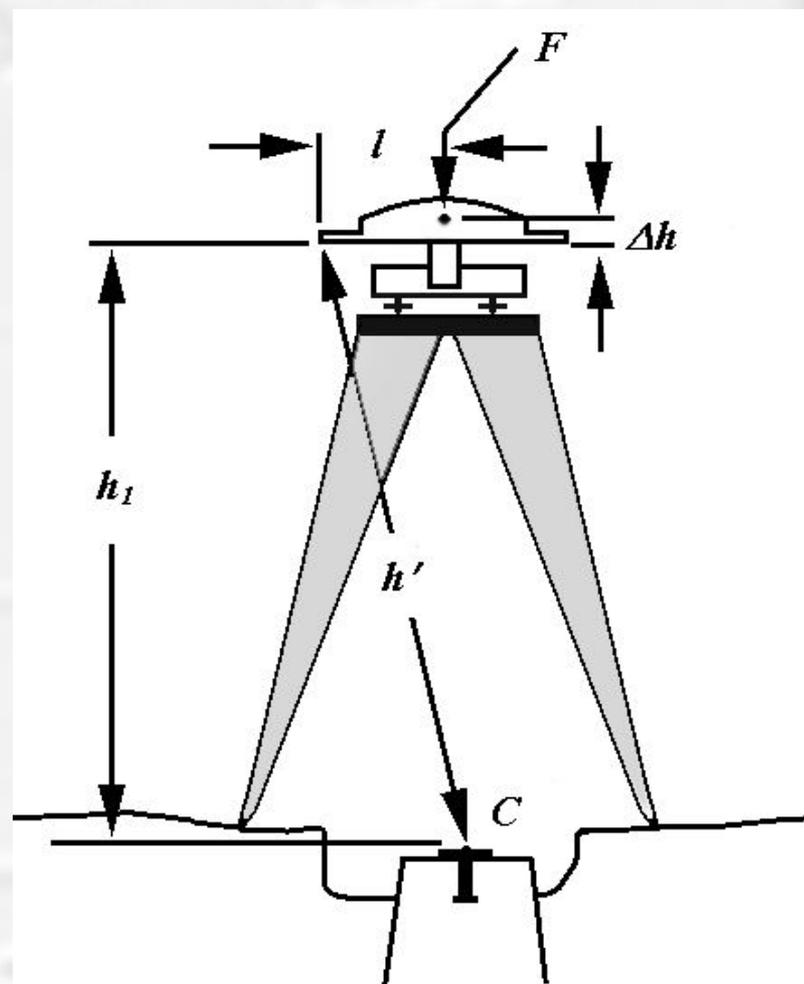
# Погрешности ГНСС: ошибки аппаратуры

- Шум сигнала:
  - 3 м для С/А-кода
  - 0.3 м для Р-кода
  - 2 мм для фазы несущей;
- Положение фазового центра антенны
  - несколько сантиметров для разнотипных антенн;
- Ошибки часов приемника и спутника;

$$\varepsilon_i(t) = t_i - t = a_0 + a_1(t - t_0) + \frac{a_2}{2}(t - t_0)^2 + \int_{t_0}^t y(t)dt$$

# Погрешности СРНС: ошибки наблюдателя

- Неверное измерение высоты антенны;
- Ошибки центрирования.



# Опрос по определениям

- Шум сигнала
- Шум приемника
- Фазовый центр антенны
- Характерная точка антенны
- Калибровка антенны и ее виды

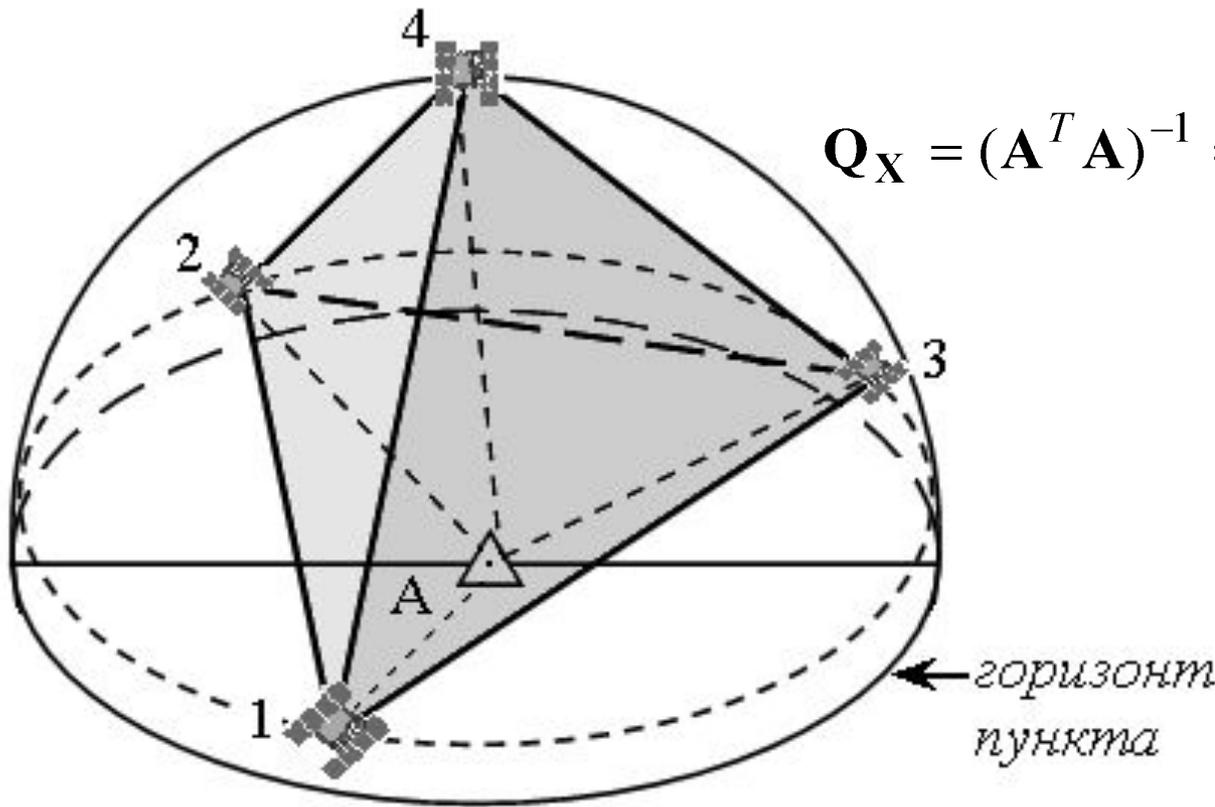
# Коэффициенты понижения ТОЧНОСТИ

Конфигурация спутников, т.е. их взаимное расположение в определенный момент времени над определённым пунктом наблюдений, влияет на точность определения местоположения

Это влияние принято оценивать с помощью параметров, называемых коэффициентами понижения точности:

- HDOP (Horizontal Dilution of Precision) — в горизонтальной плоскости
- VDOP (Vertical) — в вертикальной плоскости
- PDOP (Position) — по местоположению
- TDOP (Time) — по времени
- GDOP (Geometric) - геометрическое снижение точности

# Коэффициенты понижения ТОЧНОСТИ



$$Q_X = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_X = \sigma_0 \sqrt{q_{11}},$$

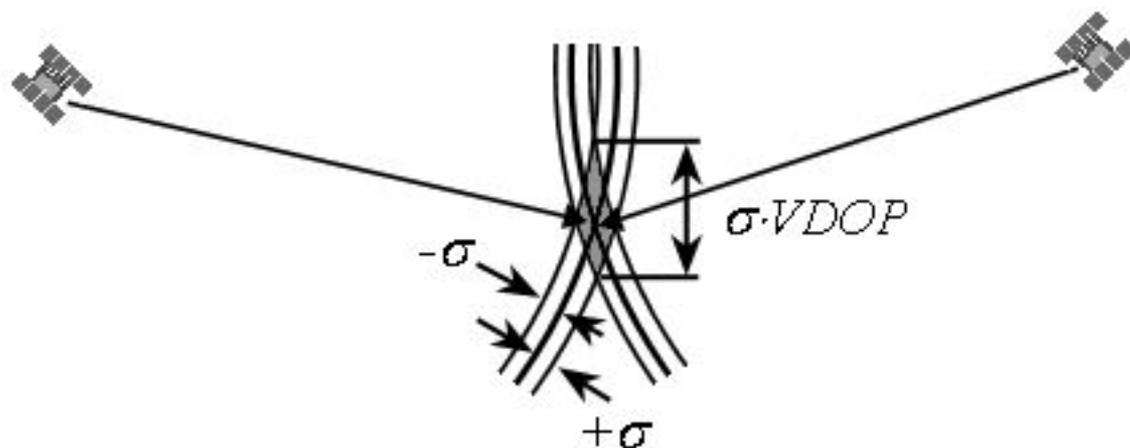
$$\sigma_Y = \sigma_0 \sqrt{q_{22}},$$

$$\sigma_Z = \sigma_0 \sqrt{q_{33}},$$

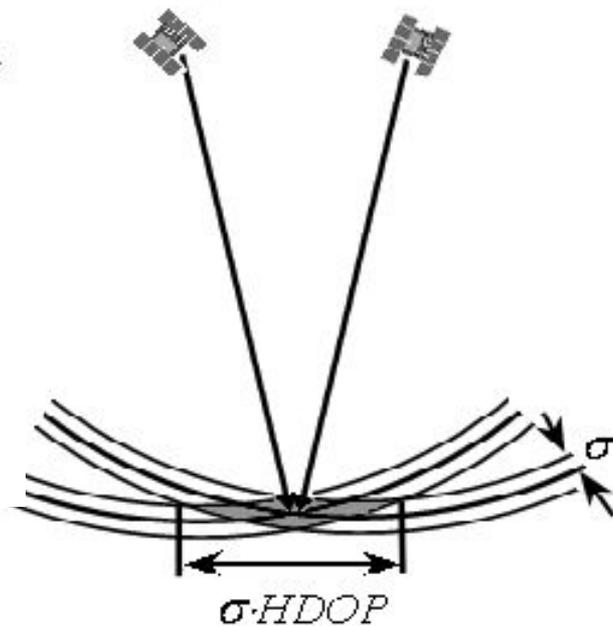
$$\sigma_{dt} = \frac{\sigma_0}{c} \sqrt{q_{44}}$$

$$PDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}}$$

# Коэффициенты понижения ТОЧНОСТИ



$$VDOP = \sqrt{q'_{33}}$$



$$HDOP = \sqrt{q'_{11} + q'_{22}}$$

# Ошибки позиционирования по фазовым наблюдениям

Источники ошибок	Относительный	
	L1	L2
Ошибки часов спутника		-
Ошибки эфемерид		-
Ионосферная задержка		1-3 см
Тропосферная задержка		2 мм
Шумы в приемнике		2 мм
Многопутность	5 см	6 см



# Раздел 3.

## ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ



# **Лекция 1: МЕТОДЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

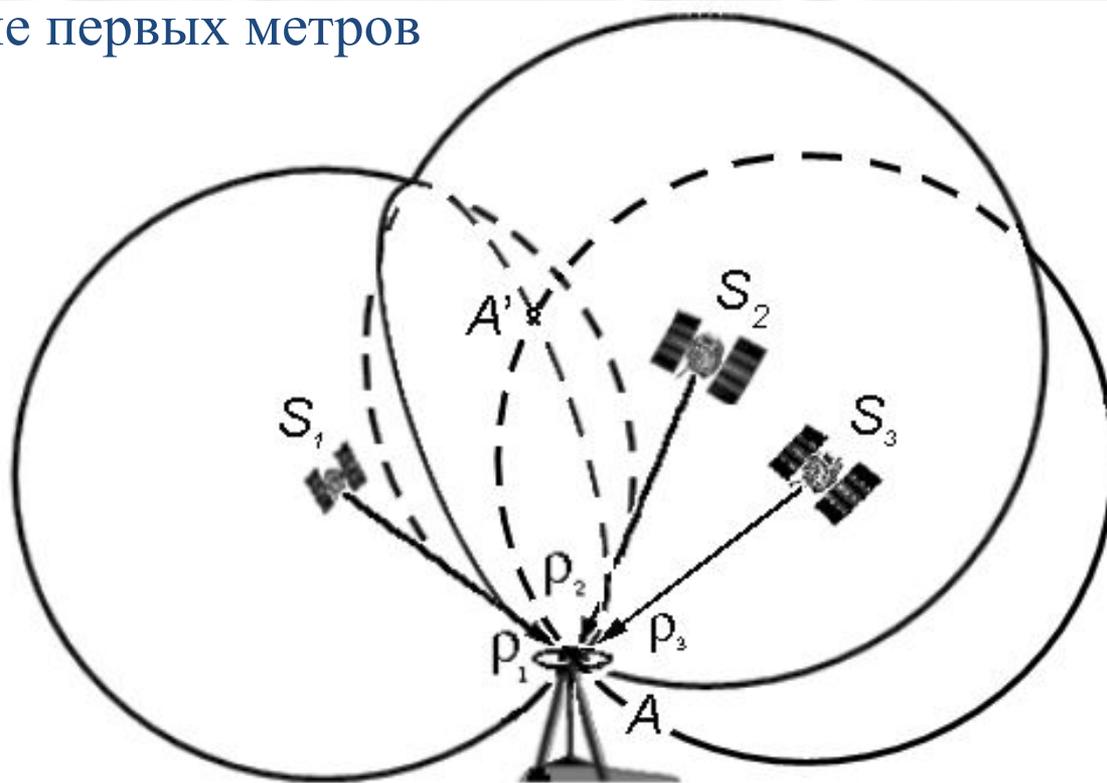
# Виды методов позиционирования

Позиционирование – определение пространственного положения объектов:

- *абсолютное* – получение координат фазового центра антенны приемника в общеземной геоцентрической системе по кодовым измерениям.
- *относительное* – определение вектора базовой линии между пунктами при помощи алгоритмов обработки по результатам синхронных (как кодовых, так и фазовых) измерений.

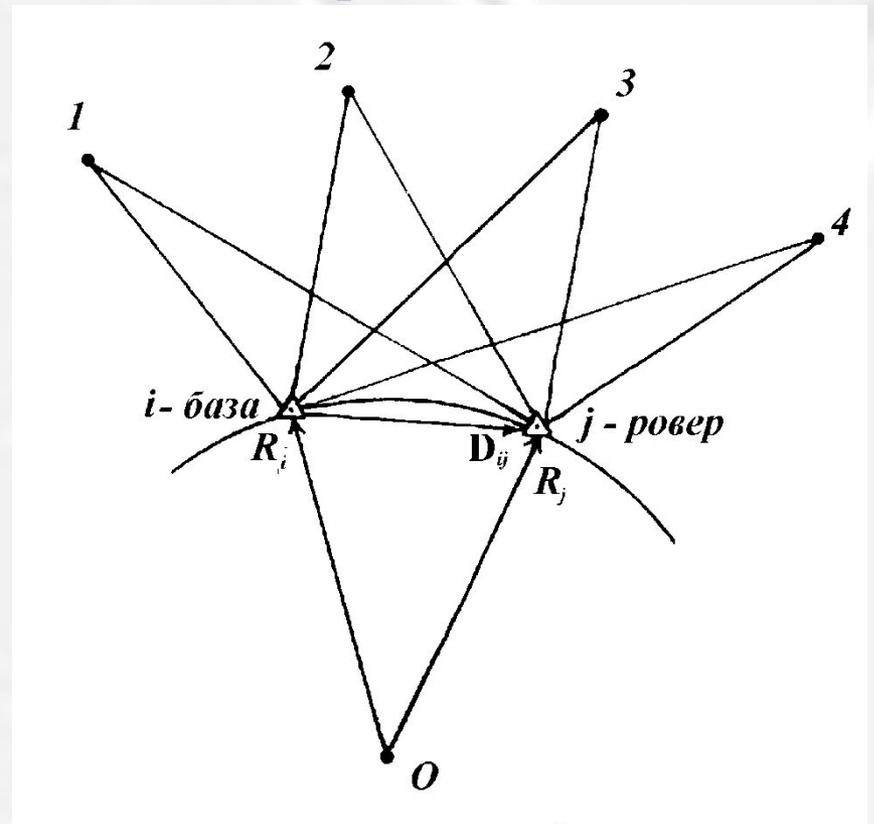
# Абсолютный режим

получение координат в общеземной геоцентрической системе по кодовым измерениям псевдодальностей до спутников с точностью не выше первых метров



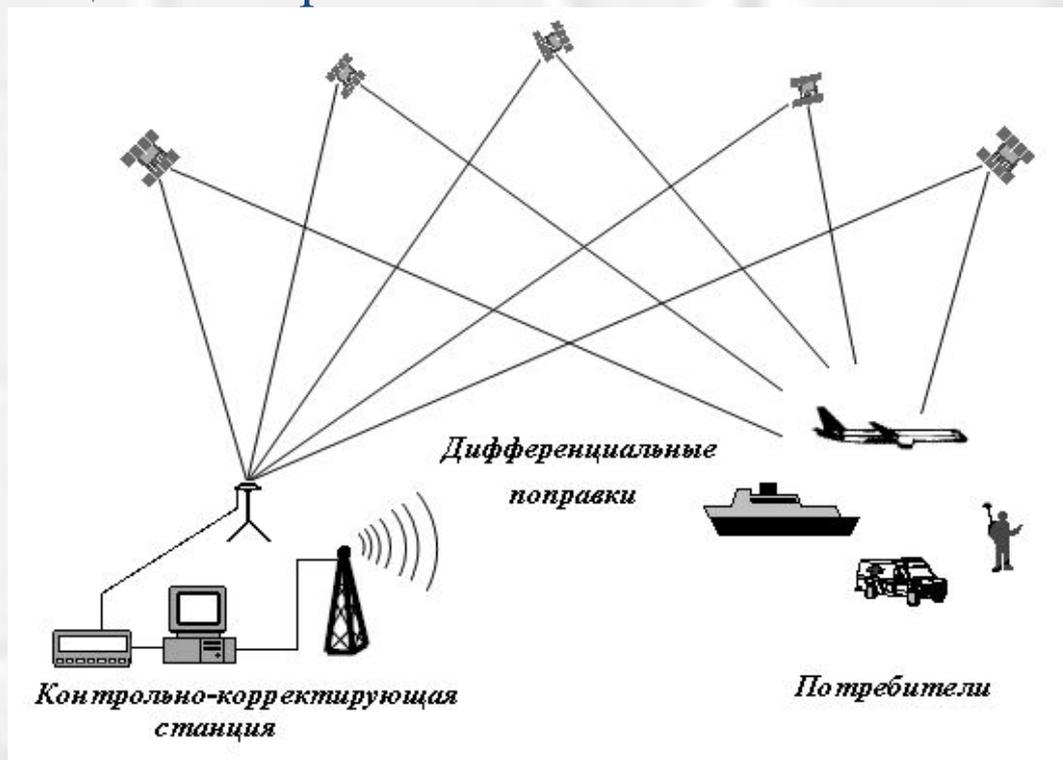
# Относительный режим

определение разности координат между пунктами из синхронных измерений (как кодовых, так и фазовых)



# Дифференциальный режим

измерения, основанные на введении дифференциальных поправок, определяемых базовой станцией, в результаты измерений, выполненных на перемещаемых приемниках



# Методика измерений

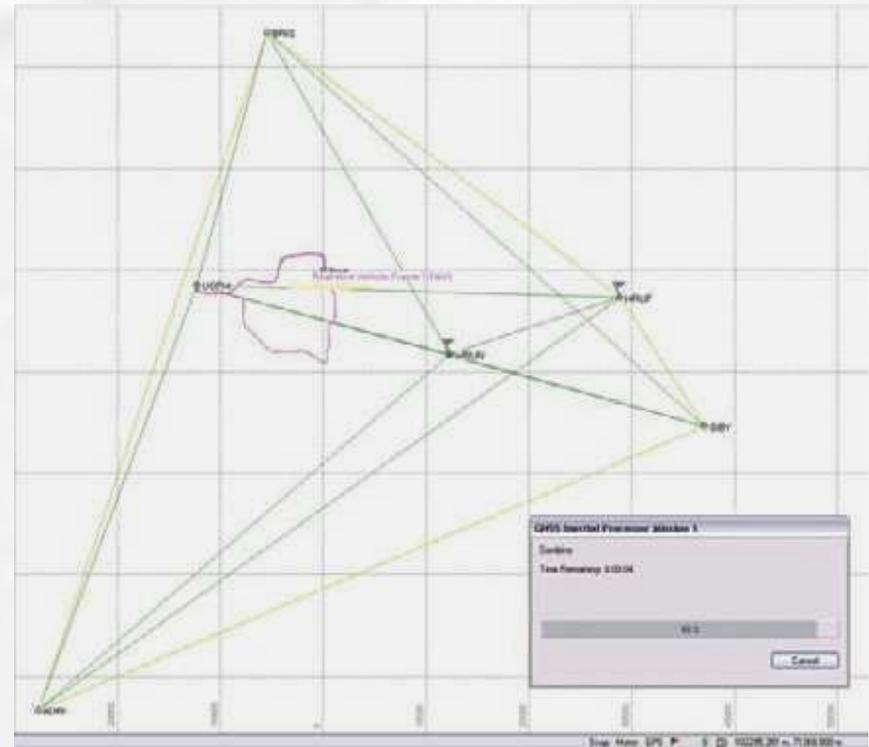
- Реальное время
- Пост-обработка
  - Статический
    - Классическая статика
    - Быстрая статика
  - Кинематический
    - Непрерывная кинематика
    - «Стой-иди»

# Классическая статика

При статической съемке антенна устанавливается над точкой на штативе или другой неподвижной подставке. Используются не менее двух приемников: один на точке с известными координатами, а другой – на точке, координаты которой надо определить.

Наблюдения проводятся синхронно с одинаковыми интервалами записи наблюдений (30 секунд) и при наличии, по крайней мере, четырех «общих» спутников.

Метод требует наибольшего времени наблюдений. Продолжительность сеанса наблюдений варьируется в зависимости от условий окружающей среды и длины базовой линии.



# Быстрая статика

Вариация метода классической статике, разработанная для измерения коротких базовых линий (10-12 км).

Время синхронных наблюдений составляет около 20 минут и периоде сбора данных 15 секунд. Продолжительность сеанса может варьироваться в зависимости от количества отслеживаемых спутников, значения DOP (геометрического фактора ухудшения точности), наличия или отсутствия пропусков циклов, влияния многолучевости и т.д.

Благодаря укороченному времени сеанса, эффективность работ возрастает, но объем полученных данных меньше и надежность результатов измерений может оказаться ниже.

Для увеличения точности получаемых данных используйте программное обеспечение для планирования работ, чтобы гарантировать достаточное количество спутников и хорошее значение DOP, а также другие оптимальные условия на период измерений.

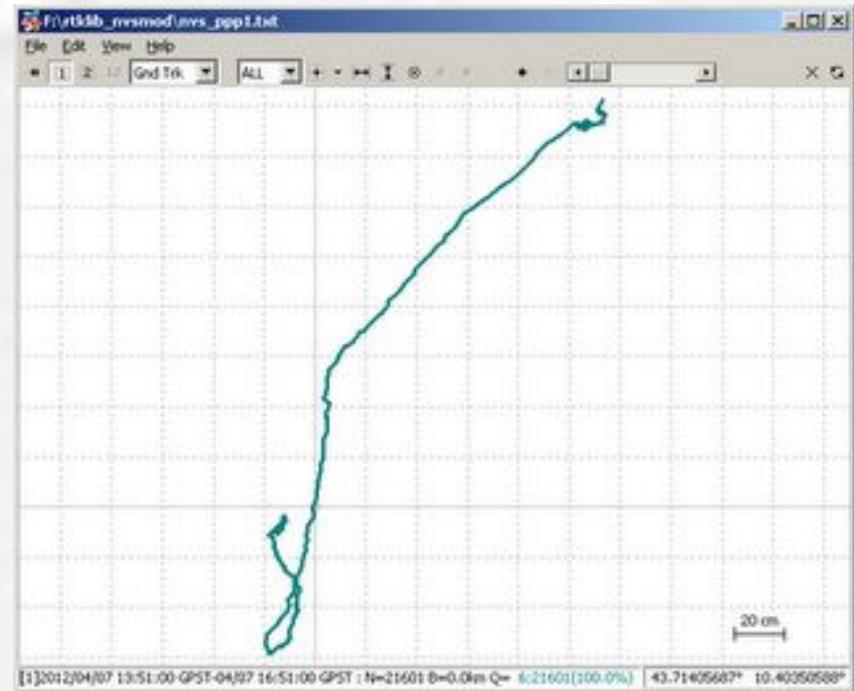
# Непрерывная кинематика

Требует не менее двух приемников, один из которых работает в качестве базовой станции.

Другой приемник установлен на подвижном основании и проводит набор полевых данных при помощи антенны, закрепленной на вешке или другом подвижном носителе.

Представляет собой метод безостановочной геодезической

съемки и используется для достижения последовательного, высокоточного определения точек траектории движущегося тела и т.д. При этом методе аналитические результаты получаются для каждого интервала времени эпохи.

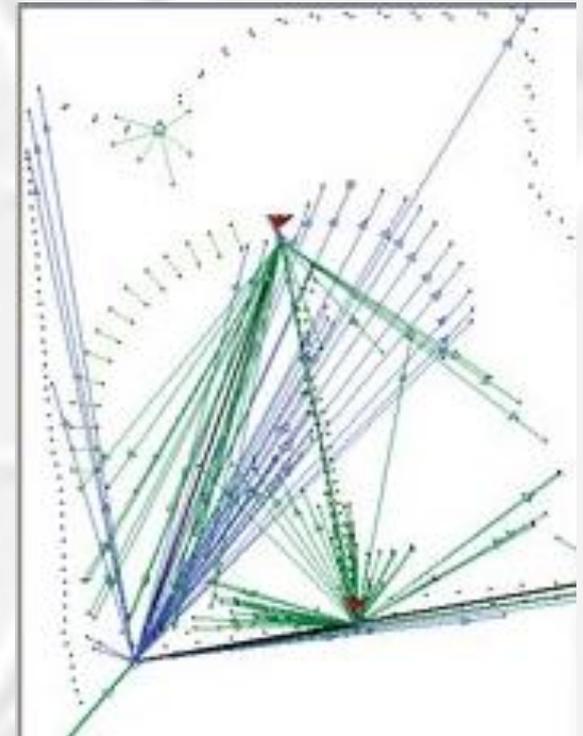


# Кинематика «Стой – Иди»

При этом методе подвижный приемник выполняет предельно короткие статические измерения (при остановке) и непрерывные кинематические измерения в процессе движения.

Как правило, время стояния на точке длится порядка одной минуты и содержит 12 эпох по пять секунд каждая. Чем больше время статического отрезка, тем выше будет точность полученных данных.

Метод требует непрерывного потока данных, поэтому необходимо контролировать непрерывное слежение за спутниками в процессе движения. Соответственно стремиться к наиболее благоприятным условиям наблюдений.



# Кинематика в реальном времени (RTK)

При съемке в режиме RTK так же, как и при кинематической съемке, один приемник служит в качестве базовой станции и осуществляет наблюдения с антенной, закрепленной на штативе или другой неподвижной подставке. Другой же приемник работает на подвижном основании и проводит измерения с антенной на вешке и перемещаемой по определяемым точкам.



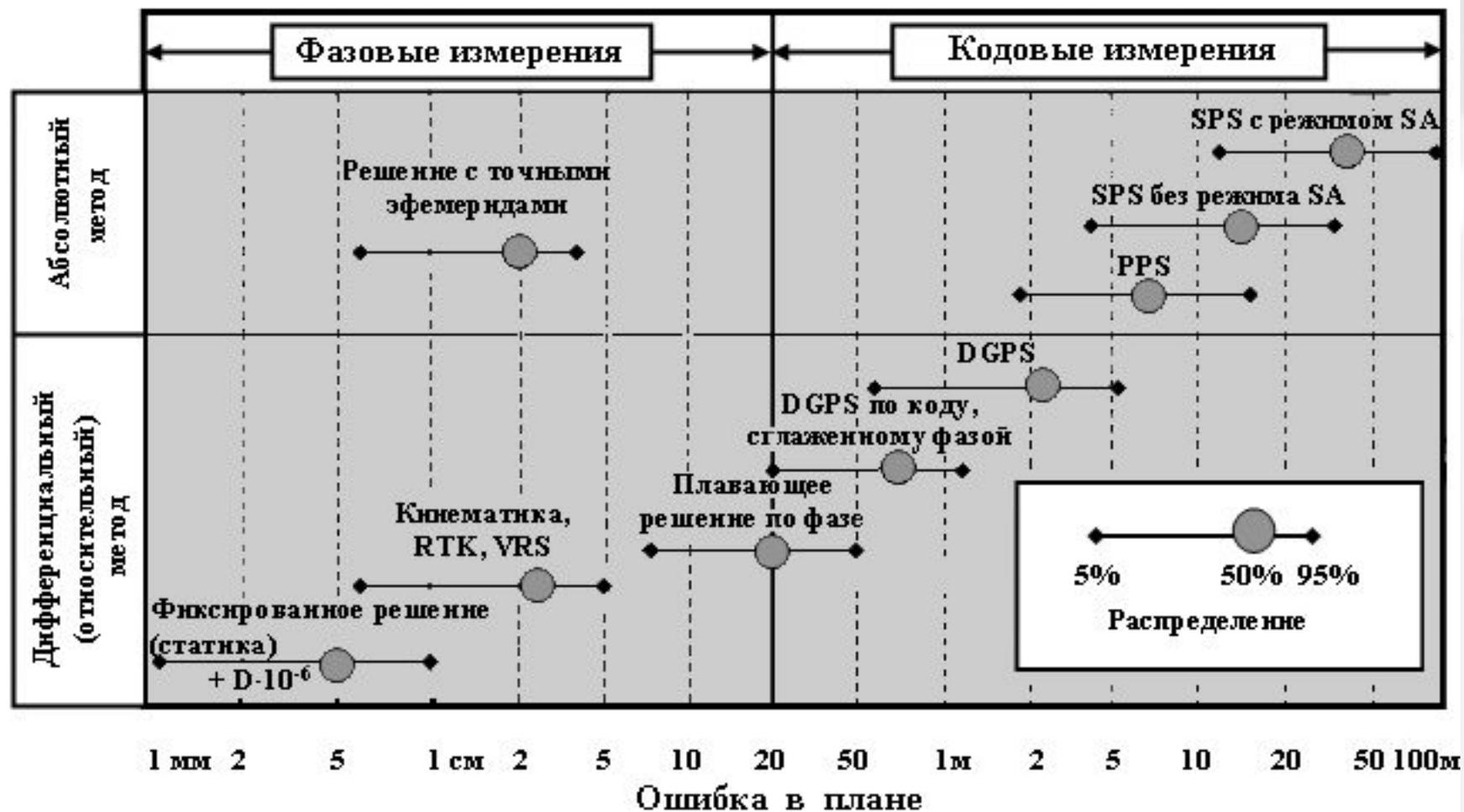
Базовая станция и подвижный приемник, связаны при помощи системы связи. Данные коррекции по фазе несущей и другие данные, получаемые на базовой станции, передаются на подвижный приемник через модем. Благодаря этим передаваемым данным и собственным измерениям, на подвижном приемнике немедленно проводится анализ данных по базовой линии, и сразу выдаются результаты вычислений.

# Порядок работы на станции

- Приведение установочного устройства в рабочее положение;
- Установка спутникового оборудования и проверка его работоспособности;
- Измерение высоты антенны;
- Запуск съёмки и ввод полевых настроек;
- Заполнение журнала измерений на станции;
- Контроль прохождения съёмки;
- Завершение сеанса измерений.

# Настройки съемки

# Точность методов позиционирования



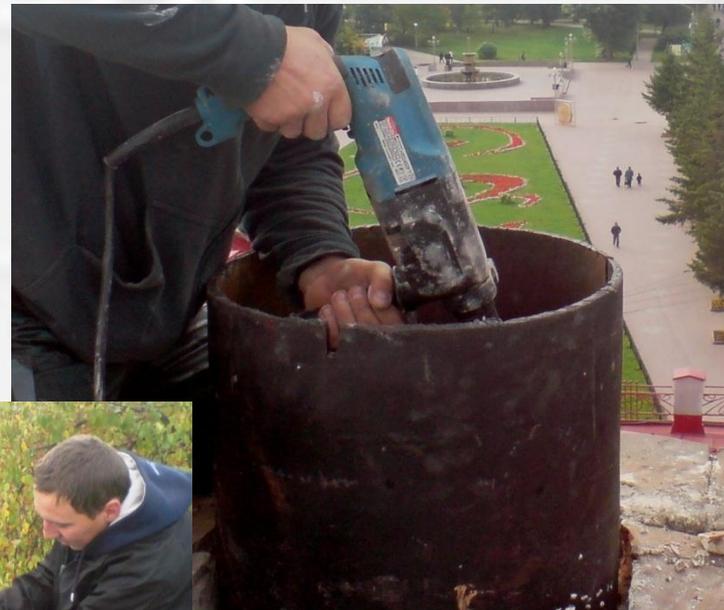


# **Лекция 2: Планирование и организация полевых измерений**

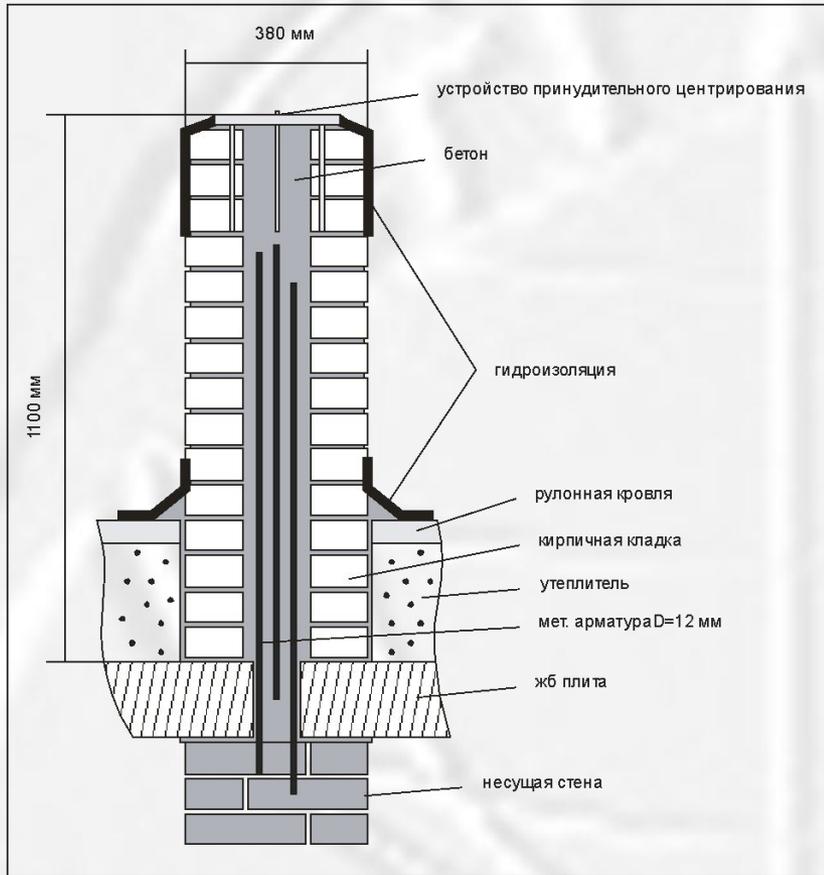
# Геодезическое использование ГНСС

1. Составление проекта геодезических работ на объекте.
2. Получение разрешений для работы на режимных или частных территориях и на работу радиостанции.
3. Полевая рекогносцировка, в результате которой делаются заключения об объекте, технологии работ и особенностях материально-технического обеспечения съемки. В итоге составляется проект полевых работ, и подготавливаются необходимый картографический материал.
4. Закладка центров.

# Закладка пунктов



# Типовые схемы закладки пунктов: тип 1



# Геодезическое использование ГНСС

5. Организация базовой станции (если этого требует технология).
6. Планирование сеансов наблюдений, которое включает в себя определение оптимальных временных интервалов измерений, проектирование последовательности сеансов или маршрутов обхода объектов съемки.
7. Составление словаря данных, необходимого для описания объектов данного вида топографических или ГИС съемок.

# Геодезическое использование ГНСС

8. Полевые измерения (съёмка объектов).
9. Камеральная обработка, вывод результатов измерений.
10. Составление технического отчета и оформление необходимой документации.
11. Полевой контроль, архивирование и сдача материалов.

# Опрос по определениям

- Состав технического проекта производства топографо-геодезических работ;
- Структура спутниковой городской геодезической сети;
- Базовая станция;
- Базовая линия;
- От чего зависит продолжительность сеанса наблюдений;



# **Лекция 3: Обработка результатов наблюдений ГНСС**

# Общий порядок математической обработки

1. Создание и настройка проекта;
2. Импортирование результатов полевых наблюдений и их контроль;
3. Формирование сети из потенциальных векторов;
4. Вычисление векторов базовых линий;
5. Контроль невязок в замкнутых полигонах;
6. Уравнивание сети.

# Опрос по определениям

- Проект
- Потенциальный вектор базовой линии
- Величины, контролируемые при импорте полевых измерений в проект
- Невязка по замкнутым полигонам
- Процессор обработки базовых линий

# Процессор вычисления базовых линий

- 1) определение координат конца базовой линии абсолютным методом;
- 2) решение по тройным разностям, которое обеспечивает умеренную точность, но высокий уровень надежности из-за его нечувствительности к потерям счета циклов;
- 3) выявление потерь счета циклов и восстановление отсчетов;
- 4) решение по двойным разностям с вещественными неоднозначностями (плавающее решение);
- 5) поиск целых неоднозначностей (разрешение неоднозначностей);
- 6) решение по двойным разностям с целыми неоднозначностями (фиксированное решение).

# Общий вид уравнения наблюдений

Результат измерений приемником (псевдодальность или фаза несущей):

$$B_A^i = \rho_A^i + b_A + b^i + b_A^i + v_A^i$$

$\rho_A^i$  – геометрическая дальность от спутника  $i$  в момент выхода сигнала до станции  $A$  в момент прихода сигнала;

$b^i$  – поправки, зависящие от спутника;

$b_A$  – поправки, зависящие от станции;

$b_A^i$  – поправки, зависящие от наблюдений;

$v_A^i$  – ошибка измерений.

# Фазовые измерения

- измерение разности фаз сигналов (приходящего со спутника и опорного, в приемнике) несущей частоты с неопределенным начальным значением целого числа циклов [волн].

$$\phi_A^i(t) = \phi_A(t) - \phi^i(t - \tau_A^i) + N_A^i + \varepsilon_A^i$$

# УРАВНЕНИЕ ФАЗЫ НЕСУЩИХ КОЛЕБАНИЙ

$$\begin{aligned}\Phi_A^i(t) = & \rho_A^i(t, t - \tau_A^i) - I_A^i + T_A^i + \delta m_A^i + \\ & c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + c[\delta_A(t) + \delta^i(t - \tau_A^i)] + \\ & + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda N_A^i + \varepsilon_A^i.\end{aligned}$$

# РАЗНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Разностью называют линейную комбинацию измерений (фаз или псевдодальностей), образованную между параметрами наблюдений (спутниками, пунктами или эпохами).

Известны следующие виды разностей:

- Одинарные;
- Двойные;
- Тройные.

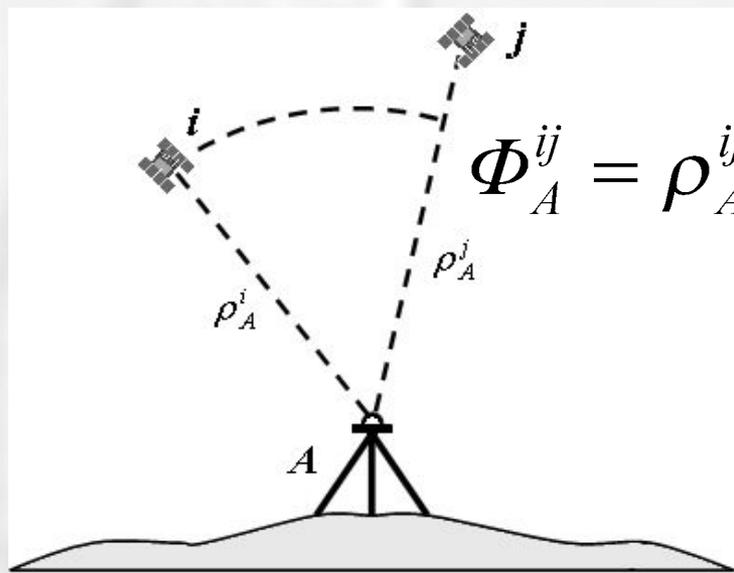
# Одинарные разности фаз

- *линейные комбинации фаз образованные между синхронными измерениями, с одной станции  $A$  на два спутника  $i$  и  $j$  или с двух станций  $A$  и  $B$  на один спутник  $i$ .*

# ОДИНАРНЫЕ РАЗНОСТИ ФАЗ МЕЖДУ СПУТНИКАМИ

$$\Phi_A^i = \rho_A^i + cdt_A - cdt^i - I_A^i + T_A^i + d_A + d^i + \lambda N_A^i + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \varepsilon_A^i;$$

$$\Phi_A^j = \rho_A^j + cdt_A - cdt^j - I_A^j + T_A^j + d_A + d^j + \lambda N_A^j + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^j(t_0)] + \varepsilon_A^j;$$

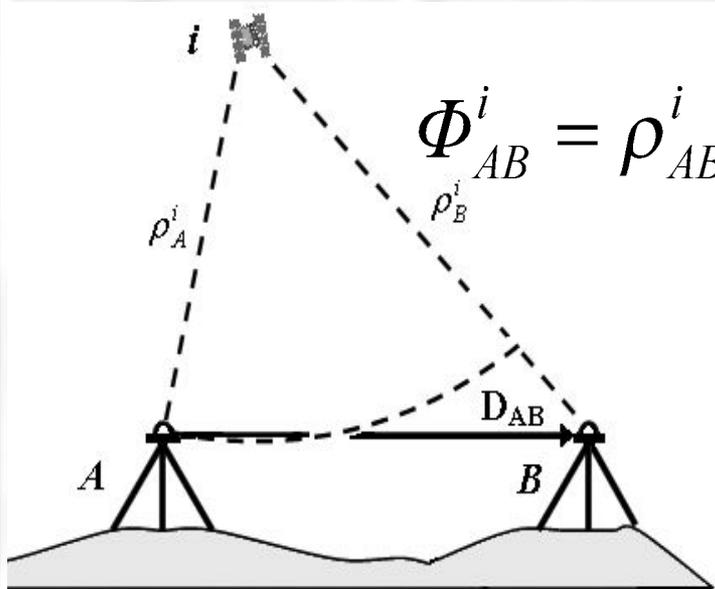


$$\Phi_A^{ij} = \rho_A^{ij} - cdt^j + cdt^i - I_A^{ij} + T_A^{ij} + d^j - d^i + \lambda N_A^{ij} + \lambda[\phi^j(t_0) - \phi^i(t_0)] + \varepsilon_A^{ij}.$$

# ОДИНАРНЫЕ РАЗНОСТИ ФАЗ МЕЖДУ СТАНЦИЯМИ

$$\Phi_A^i = \rho_A^i + cdt_A - cdt^i - I_A^i + T_A^i + d_A + d^i + \lambda N_A^i + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \varepsilon_A^i;$$

$$\Phi_B^i = \rho_B^i + cdt_B - cdt^i - I_B^i + T_B^i + d_B + d^i + \lambda N_B^i + \lambda[\phi_B(t_0) - \phi^i(t_0)] + \varepsilon_B^i.$$



$$\Phi_{AB}^i = \rho_{AB}^i + cdt_B - cdt_A - I_{AB}^i + T_{AB}^i + d_B - d_A + \lambda N_{AB}^i + \lambda[\phi_B(t_0) - \phi_A(t_0)] + \varepsilon_{AB}^i.$$

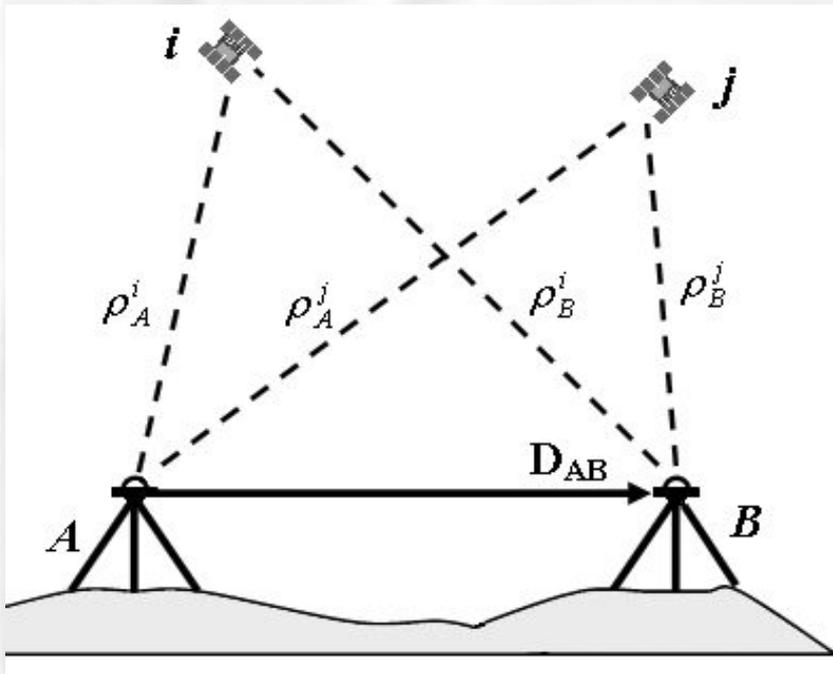
# ДВОЙНЫЕ РАЗНОСТИ ФАЗ

- *линейная комбинация фаз несущих, измеренных одновременно парой приемников, наблюдающих одну и ту же пару спутников.*

# ДВОЙНЫЕ РАЗНОСТИ ФАЗ

$$\Phi_A^{ij} = \rho_A^{ij} - cdt^j + cdt^i - I_A^{ij} + T_A^{ij} + d^j - d^i + \lambda N_A^{ij} + \lambda[\phi^j(t_0) - \phi^i(t_0)] + \varepsilon_A^{ij}.$$

$$\Phi_B^{ij} = \rho_B^{ij} - cdt^j + cdt^i - I_B^{ij} + T_B^{ij} + d^j - d^i + \lambda N_B^{ij} + \lambda[\phi^j(t_0) - \phi^i(t_0)] + \varepsilon_B^{ij}$$



$$\Phi_{AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} - I_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}.$$

$$N_{AB}^{ij} = N_B^j - N_B^i - N_A^j + N_A^i$$

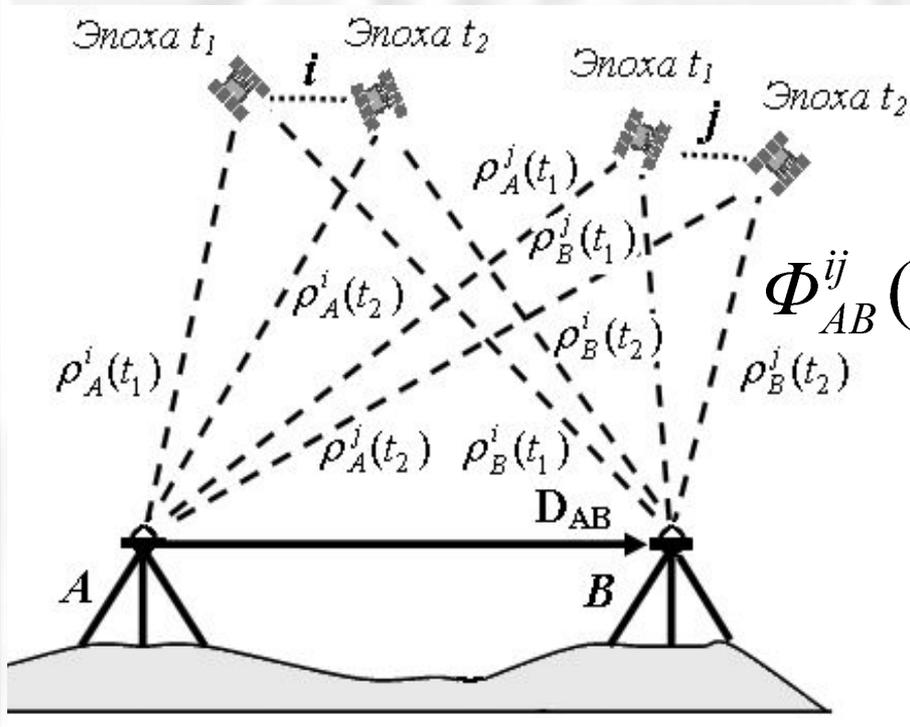
# ТРОЙНЫЕ РАЗНОСТИ ФАЗ

*– линейная комбинация фаз, представляющая собой, разность во времени двойных разностей относительно двух спутников и двух приемников.*

# ТРОЙНЫЕ РАЗНОСТИ ФАЗ

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1) = \rho_{AB}^{ij}(t_1) - I_{AB}^{ij}(t_1) + T_{AB}^{ij}(t_1) + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1)$$

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_2) = \rho_{AB}^{ij}(t_2) - I_{AB}^{ij}(t_2) + T_{AB}^{ij}(t_2) + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_2)$$



$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1, t_2) = \rho_{AB}^{ij}(t_1, t_2) - I_{AB}^{ij}(t_1, t_2) + T_{AB}^{ij}(t_1, t_2) + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1, t_2)$$

# Критерии оценки качества решения

- разрешение неоднозначности по всем линиям сети (получение фиксированного решения);
- оценка точности по внутренней сходимости результатов обработки (Ratio и Reference Variance)
  - *Ratio* - отношение дисперсии второго претендента на решение к дисперсии первого претендента на решение то есть к наименьшей из всех дисперсий:  $Ratio = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}$
  - *Reference Variance* - проверяет соответствие апостериорной и априорной дисперсий:  $RV = \frac{\sigma_{a\ posteriori}^2}{\sigma_{a\ priori}^2}$
- невязка по замкнутым построениям в сети:

$$w_X = \sum_k \Delta X, \quad w_Y = \sum_k \Delta Y, \quad w_Z = \sum_k \Delta Z \quad w = \sqrt{w_X^2 + w_Y^2 + w_Z^2}$$

# Опрос по определениям

- Общий вид и состав уравнения наблюдений
- Понятие фазового измерения
- Разности измерений: понятие и виды
- Понятие фиксированного решения

# Уравнивание геодезических сетей

Цель уравнивания – повышение точности и представление результатов в необходимой системе координат с оценкой точности.

Дополнительными исходными данными для уравнивания СГС являются:

- координаты опорных пунктов в геоцентрической системе WGS-84, ПЗ- 90 или ITRF с необходимой точностью;
- координаты (плановые и высотные) опорных пунктов в новой системе при переводе пространственных координат.

# Задачи уравнивания

- согласование совокупности всех измерений в сети;
- минимизация и фильтрация случайных ошибок измерений;
- выявление и отбраковка грубых измерений, исключение систематических ошибок;
- получение набора уравненных координат и соответствующих им элементов базовых линий с оценкой точности в виде ошибок или ковариационных матриц;
- трансформирование координат в требуемую координатную систему;
- преобразование геодезических высот в нормальные ВЫСОТЫ.

# Виды уравнивания

- В *свободном уравнивании* неизвестными считаются все пункты сети, и положение сети относительно геоцентра известно с той же точностью, что и координаты начальной точки сети.
- При фиксировании координат одного пункта получаем *минимально ограниченное уравнивание*, в котором нормальная матрица оказывается невырожденной. Для достижения значимого контроля векторная сеть не должна содержать незамкнутых геометрических фигур.
- При фиксировании более чем трех координат будет *ограниченное уравнивание* в том смысле, что будут наложены дополнительные ограничения по

# Анализ результатов уравнивания сети

В высокоточных спутниковых измерениях отношение апостериорной и априорной дисперсий должно быть меньше или равно 1. Когда отношение меньше 1, то это говорит о том, что предсказанные ошибки были преувеличены, и, что на самом деле точность выше, чем ожидалось. Когда отношение больше 1, то возможно, что одна или несколько предсказанных ошибок были недооценены, то есть реальные ошибки оказались больше предсказанных.

# Анализ результатов уравнивания сети

- Тест  $\chi^2$  - основан на сумме взвешенных квадратов поправок  $v$ , числе степеней свободы  $r$  и уровне доверия (проценте вероятности). **Назначение этого теста – отвергнуть или принять гипотезу о том, что предсказанные ошибки были точно оценены.** Если тест не проходит, то это указывает на то, что все или несколько наблюдений необходимо проверить или даже наблюдать повторно.



# **Тема 8. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПЛАНОВЫХ И ВЫСОТНЫХ КООРДИНАТ**

# Задачи локального преобразования

- нахождение максимально точных оценок для параметров трансформирования (то есть параметров масштаба, сдвига и вращения),
- достижение такой комбинации координатных систем, которая уменьшает поправки к наблюдениям,
- учет стохастической модели сети.

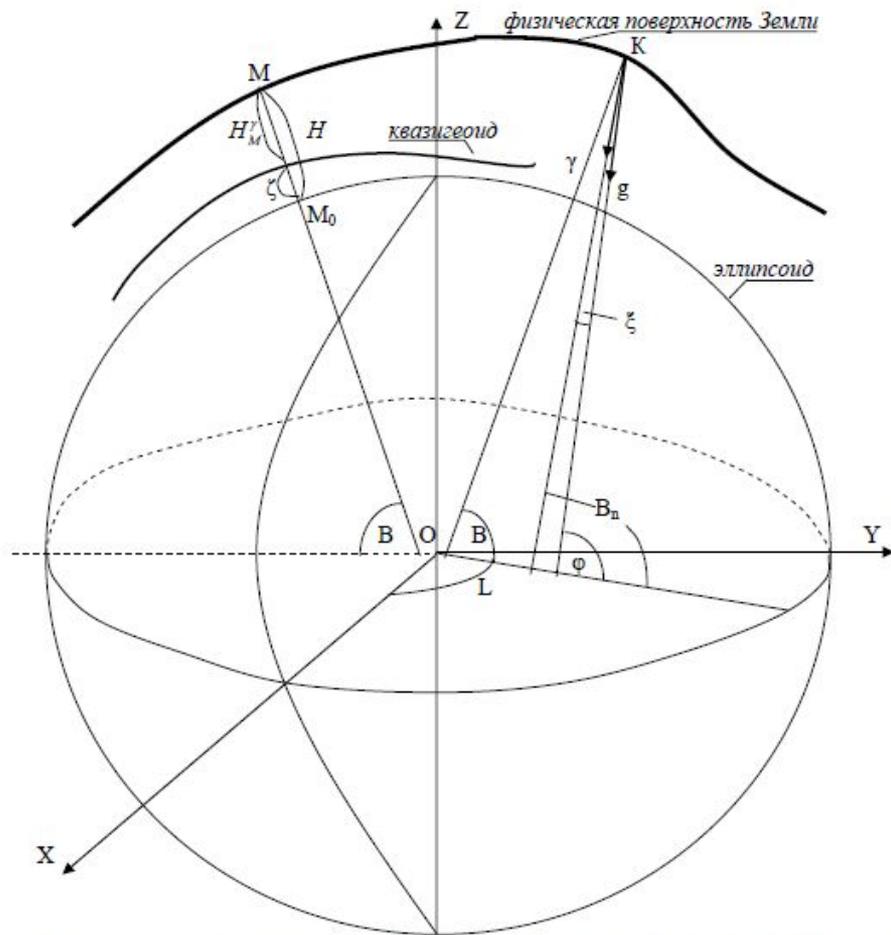


Рис. 1. Геодезические широта  $B$ , долгота  $L$ , высота  $H$  и прямоугольные пространственные координаты  $X, Y, Z$ .

# Основные типы преобразований

- *классический (аналитический)* - 7-параметровое преобразование подобия в декартовых или эллипсоидальных координатах (методы Гельмерта и Молоденского) (если необходимо сохранить геометрию существующей спутниковой сети)
- *Интерполяционный*, - метод нелинейной многопараметрической регрессии (если же необходимо наилучшим образом вписать спутниковую сеть под уже существующую сеть, то адекватным является интерполяционный подход, в котором геометрия сети не сохраняется.

# Основные причины некорректного преобразования

- Несоответствие точности определения положения пунктов ГГС (пункты триангуляции 1- 4 классов) точности встраиваемых спутниковых сетей (их точность на 1-2 порядка выше).
- Плановая ГГС (широты, долготы) создана в геометрической системе отсчета (относительно референц-эллипсоида), а высотная ГГС (нормальные высоты) – в гравитационной системе – относительно квазигеоида (или геоида). Спутниковая сеть – образует трехмерную пространственную систему с примерно равными по точности координатами в геометрической системе отсчета.
- Плохая математическая обусловленность системы уравнений связи координат на локальной области (наличие погрешностей измерений в обеих системах координат и погрешностей модели преобразования).

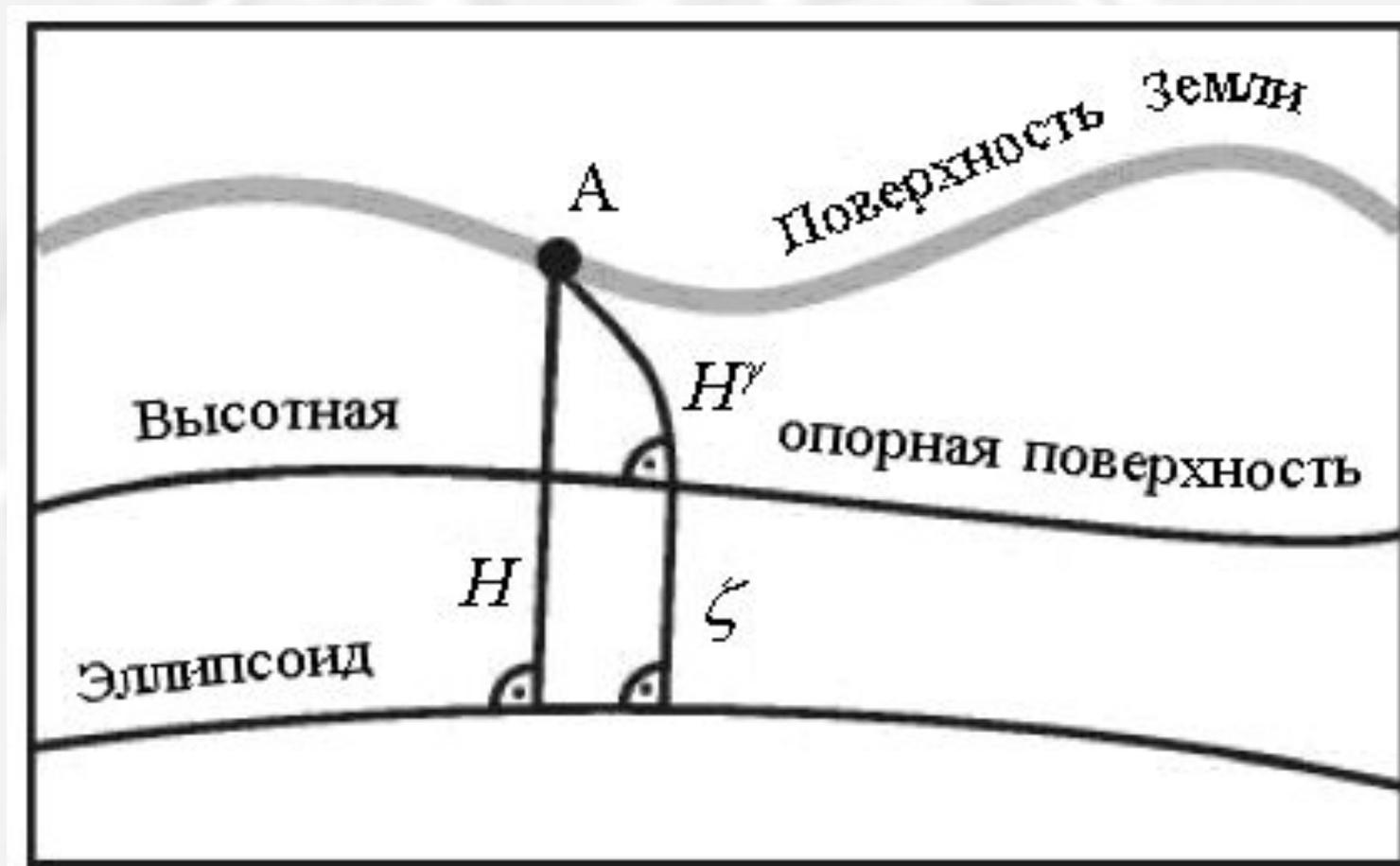
# Определение нормальных высот по спутниковым наблюдениям

- Из спутниковых наблюдений положение определяемых пунктов получают форме прямоугольных  $X, Y, Z$ , и/или геодезических  $B, L, H$  координат в единой системе осей общеземного эллипсоида.
- Геодезистам и инженерам обычно нужны высоты от уровня моря  $H^\gamma$ , в установленной Балтийской системе нормальных высот БСВ-77.

$$H^\gamma = H - \zeta$$

где  $H^\gamma$  - нормальная высота пункта (над поверхностью квазигеоида), а  $\zeta$  - высота квазигеоида над эллипсоидом.

# Определение нормальных высот по спутниковым наблюдениям



# Модели геоида

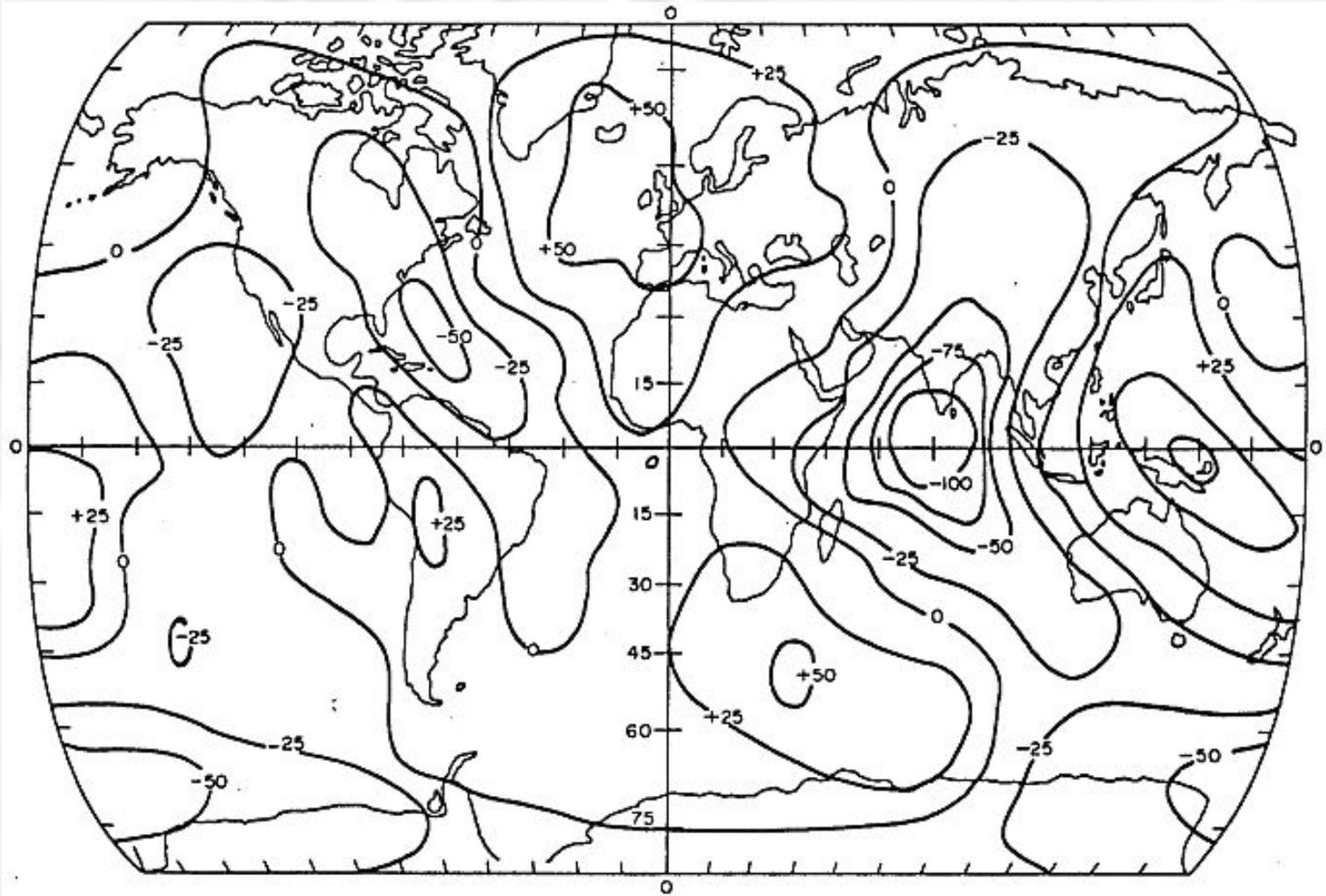
Модели геоида могут быть представлены в виде точечных значений, профилей или карт и могут аппроксимироваться функцией. Модели геоидов различают по размеру охватываемой ими территории

- планетарные (глобальные);
- региональные (национальные);
- локальные (местные или на конкретных объектах);

и по методам получения их характеристик

- астрономо-гравиметрические;
- спутниковые;
- геодезические;
- гравиметрические.

# Карта высот планетарного геоида



# Раздел 3.

## НАЗЕМНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ГНСС



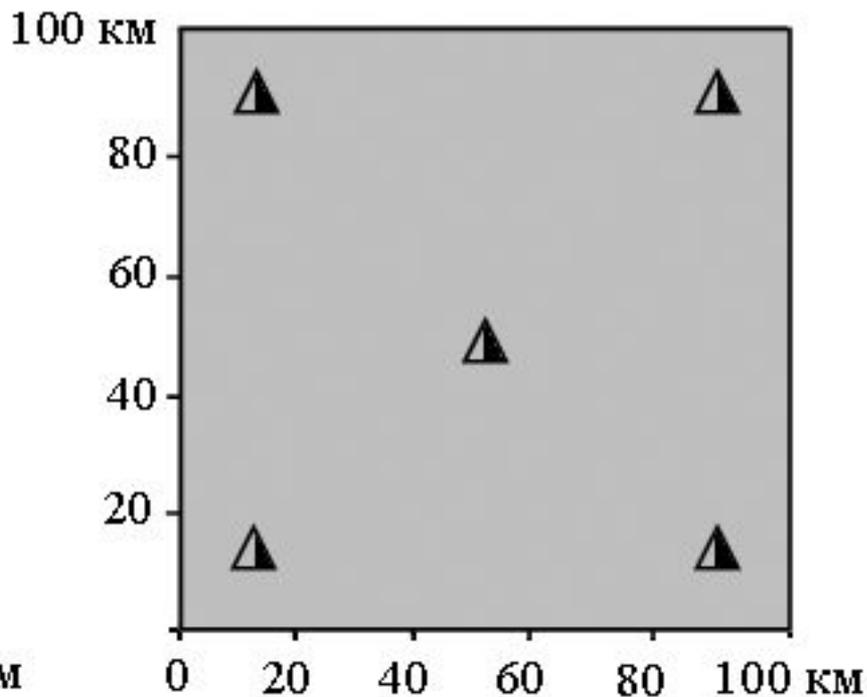
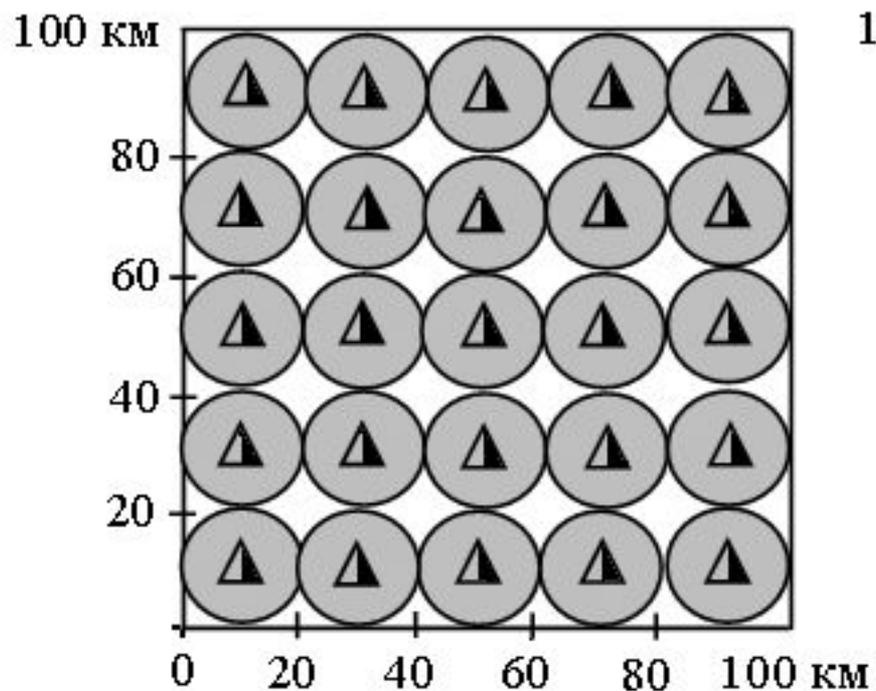
# **Лекция 1. Функциональное дополнение ГНСС – сети дифференциальной коррекции**



# **Лекция 1. Функциональное дополнение ГНСС – сети дифференциальной коррекции**



# Множественные опорные станции



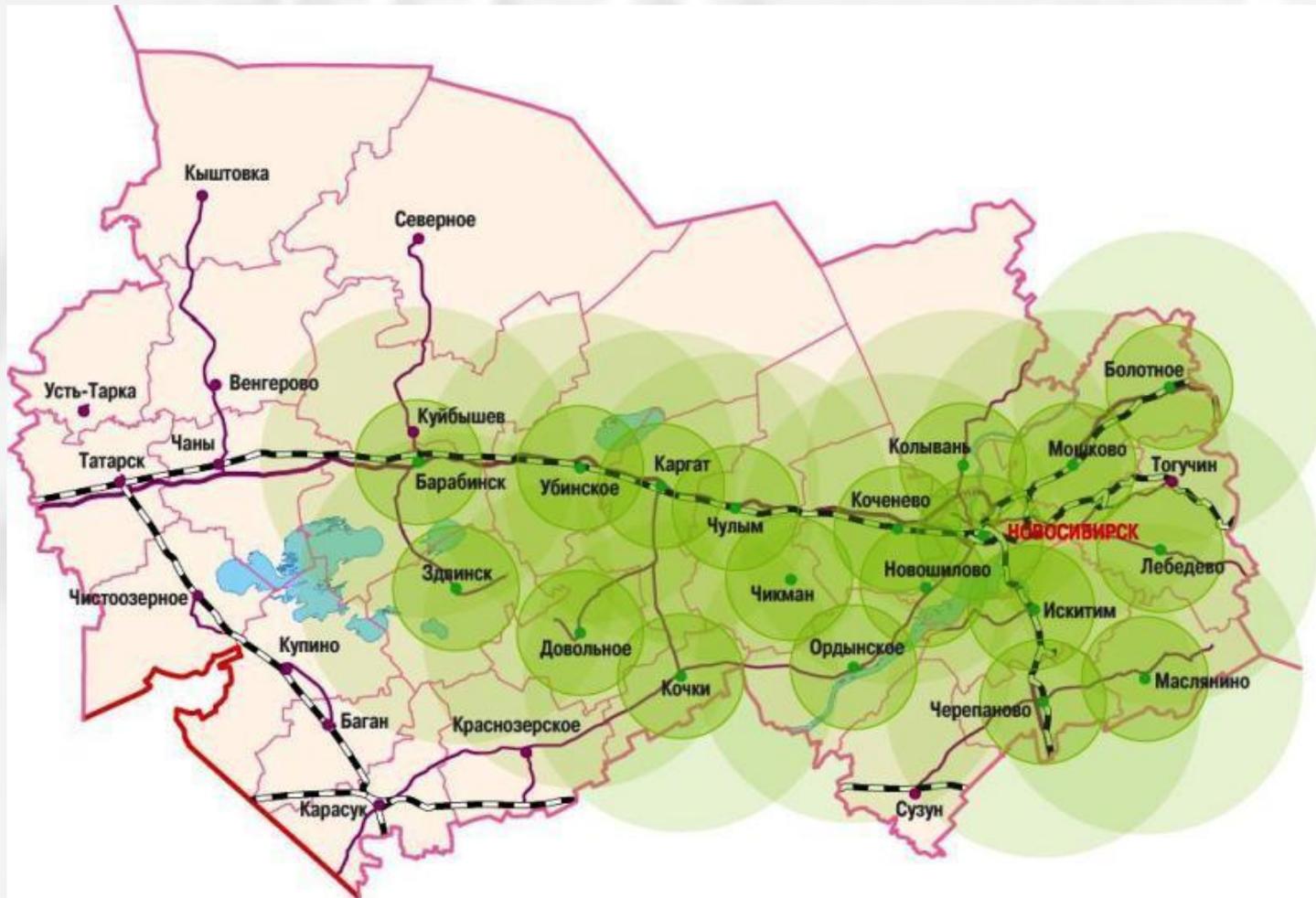
▲ Опорная станция

# Множественные опорные станции

- сеть активных базовых станций (сети АБС)
- вычислительный центр (ВЦ)
- линии связи



# Сеть активных базовых станций НСО



# Концепция виртуальной базовой станции

## VRS (Virtual Reference Station)

Разработан конце 90-х годов компанией Terrasat (Германия).

Программное обеспечение центра управления сетью, на основании полученных от ровера предварительных координат, вычисляет дифференциальные поправки относительно произвольной точки, симулируемой вблизи ровера.

Эти поправки могут быть посланы в сообщениях 20, 21 формата RTCM, либо в собственных форматах производителя спутникового оборудования.

Каждый ровер получает индивидуальные поправки вычисляет уточненные координаты своего местоположения по технологии одиночной базовой станции.

# Концепция виртуальной базовой станции

