

# ГНСС – метод современной геодезии

Грибанова Марина Сергеевна  
(младший научный сотрудник лаборатории космической  
геодезии и вращения Земли Института прикладной  
астрономии РАН)

# Астрометрия

Высокоточное определение местоположения небесных тел и их скоростей в данный момент времени, реализация небесной системы отсчета.

Применение: время, календарь, навигация, мореплавание, авиация и космонавтика.



# Геодезия

Определяет форму и размеры Земли, гравитационное поле, реализация земной системы отсчета.

Космическая геодезия решает геодезические задачи с помощью искусственных спутников земли.

Применение: навигация, мореплавание, авиация, картография, строительство.

Тесно взаимодействует с астрометрией.

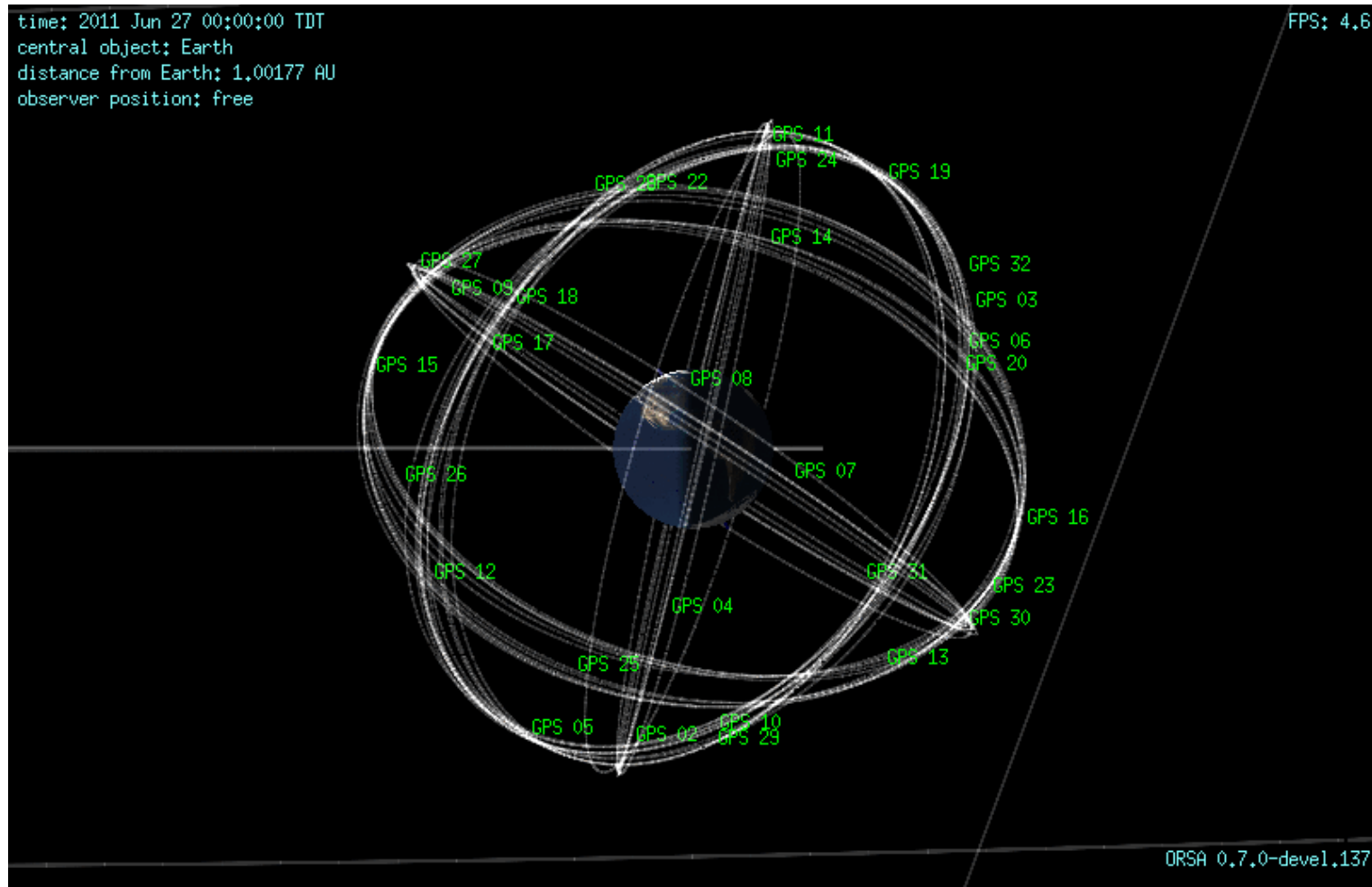


# Глобальные навигационные спутниковые системы

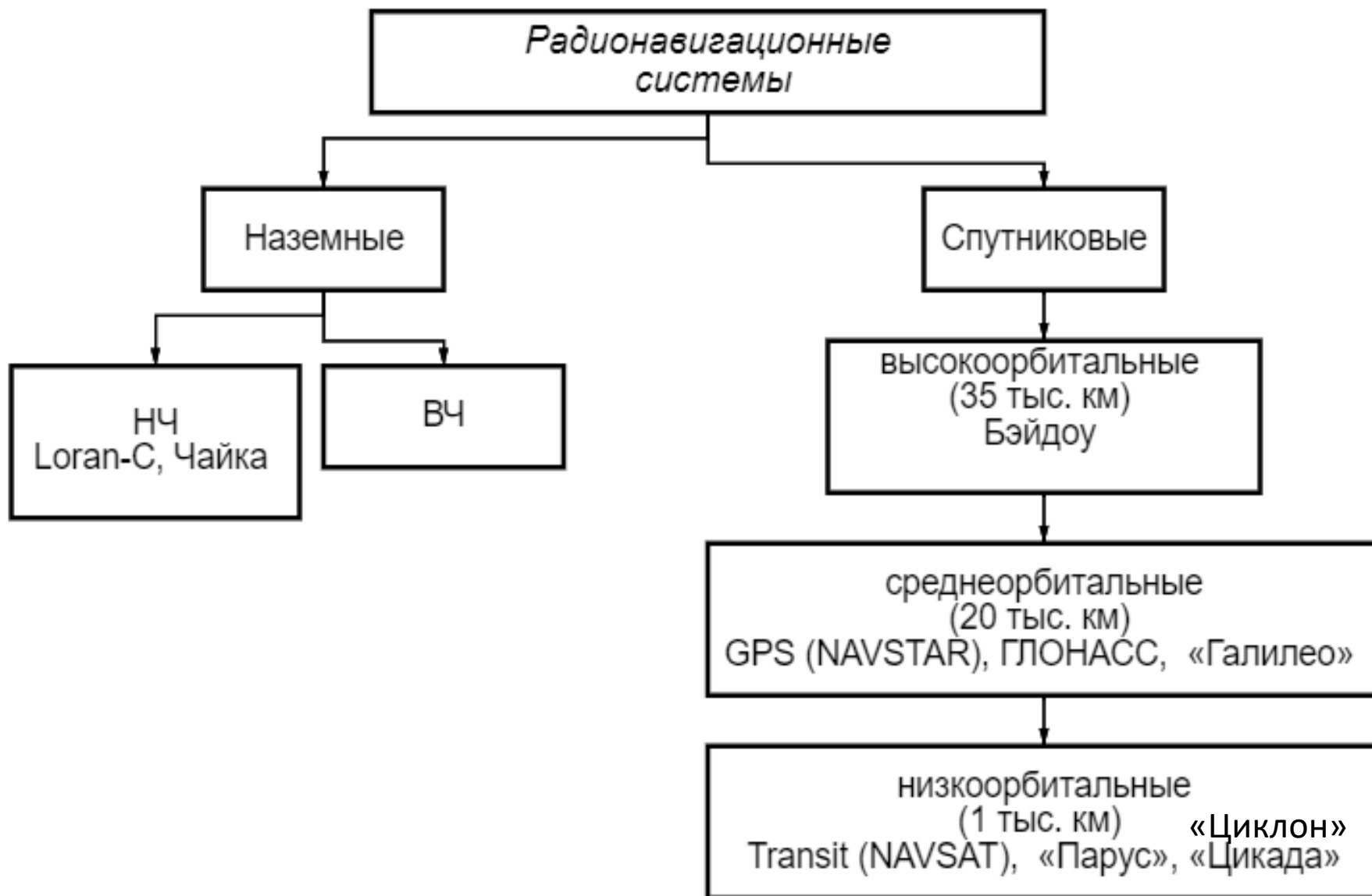
- GPS, США
- ГЛОНАСС, РФ
- Beidou, Китай
- Galileo, европейская система

На этапе создания:

- QZSS, Япония
- IRNSS, Индия



# Виды радионавигационных систем



1960

Запуск первого  
навигационного  
спутника "Transit-1B"

1993

Полная орбитальная  
группировка.  
Лётные испытания

1973

Начало разработок  
системы GPS

1978

Первый  
навигационный  
спутник GPS

1958

Начало разработок  
навигационной  
системы TRANSIT

2000

Штатная эксплуатация  
для гражданских  
пользователей



GPS

1967

Первый навигационный спутник "Космос-192"

1993

Опытная эксплуатация ГЛОНАСС

1972

Начало разработок глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС

1982

Запуск первого навигационного космического аппарата ГЛОНАСС

1957

Научные разработки в области спутниковой навигации

1995

Штатная эксплуатация для гражданских пользователей



# ГЛОНАСС



1994

Создание системы Beidou первого поколения

2004

Второй этап.  
Развёртывание региональной навигационной системы

2000

Первый навигационный спутник Beidou-1A

1989

Концепция создания китайской региональной навигационной системы

2009

Третий этап.  
Развитие глобальной навигационной системы



# BEIDOU

1994

Программа по созданию европейской ГНСС

2016

Развёртывание системы, в орбитальной группировке 8 КА

2005

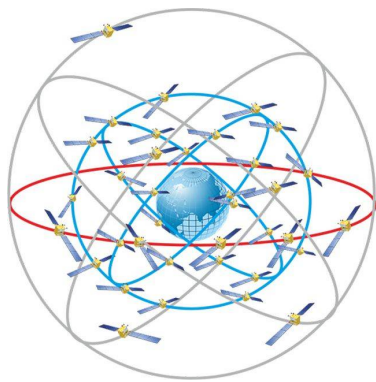
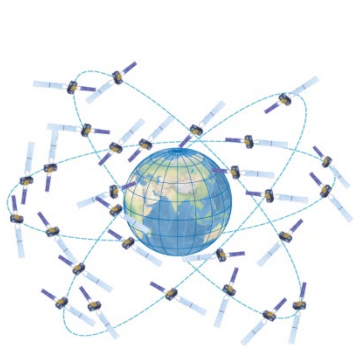
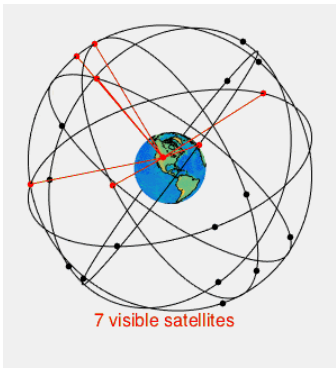
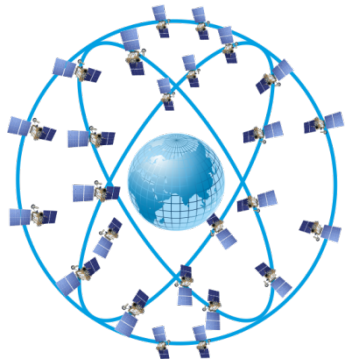
Первый навигационный спутник



# GALILEO



Согласно glonass-iac



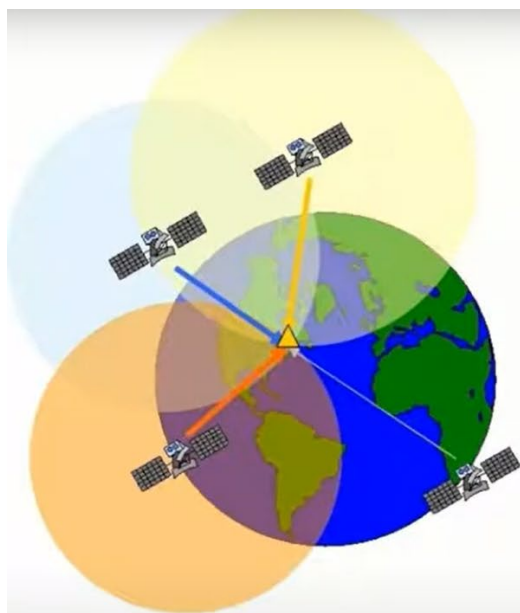
	ГЛОНАСС	GPS	Galileo	Beidou
<b>Среднеорбитальный сегмент</b>				
<b>Количество КА</b>	25	32	28	29
<b>Высота орбиты</b>	19 100 км	20 200 км	23 222 км	21 528 км
<b>Период</b>	11 ч 15 мин 44с	11 ч 58 мин	14 ч 4 мин 45с	12 ч 53 мин 24с
<b>Наклонение</b>	64.8°	55°	56°	55°
<b>Плоскости</b>	3	6	3	3
<b>Высокоорбитальный геосинхронный сегмент</b>				
	Ведутся НИР	нет	Ведутся НИР	12 КА 35 786 км
<b>Геостационарный сегмент</b>				
	Ведутся НИР	нет	Ведутся НИР	8 КА 35 786 км

# Принцип навигации. Кодовые измерения

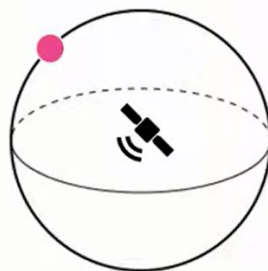
$$P = c * (t_{\text{пр}} - t_{\text{отпр}})$$

$P$  – расстояние между объектами – измеренная псевдодальность,  
 $c$  – скорость света,

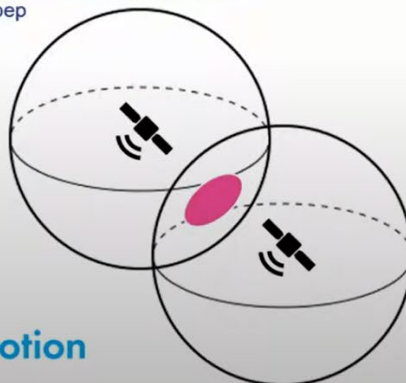
$t_{\text{пр}}$ ,  $t_{\text{отпр}}$  – моменты приема и отправки сигнала,  
(их разность – время прохождения сигнала)



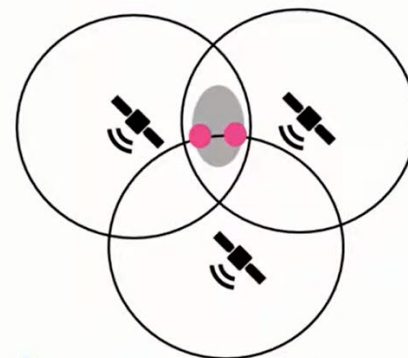
**А**  
Объект находится в любой точке сферы



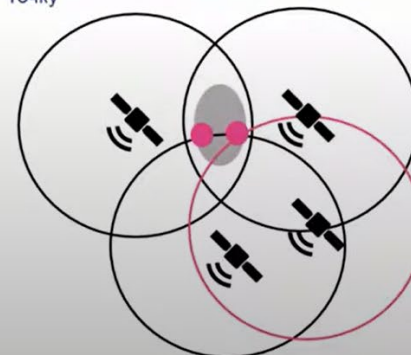
**Б**  
Объект находится где-то на окружности в пересечении 2х сфер

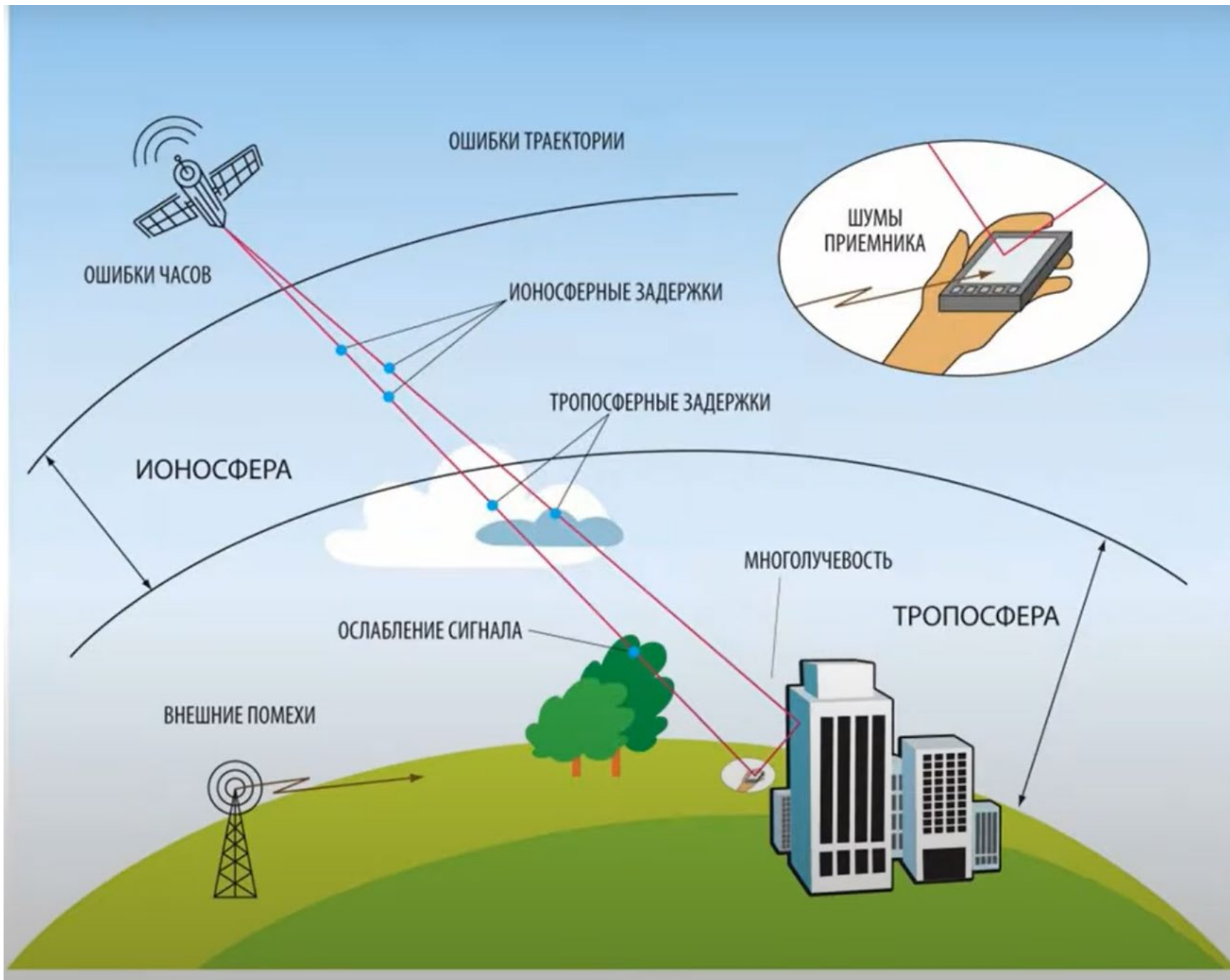


**С**  
Есть 2 точки с координатами, одна на поверхности Земли, вторая - ложная



**Д**  
Пересечение 4х сфер дает одну точку





# Измерения приёмника

Кодовые измерения:

$$P_i = \rho_i + c (\delta t_{rec} - \delta t_i^{sat}) + \epsilon$$

$$\rho_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$$

геометрическая дальность,  
истинное расстояние

$$\epsilon = I + T + \epsilon_{rec} + D_{sat} + Rel + M + \xi$$

Ионосфера

Тропосфера

Инстр. шум приёмника

Задержка в спутнике

Релятивистские

эффекты

Случайная  
ошибка

$$x, y, z, \delta t_{rec}$$

Координаты приемника, сдвиг шкалы часов приемника

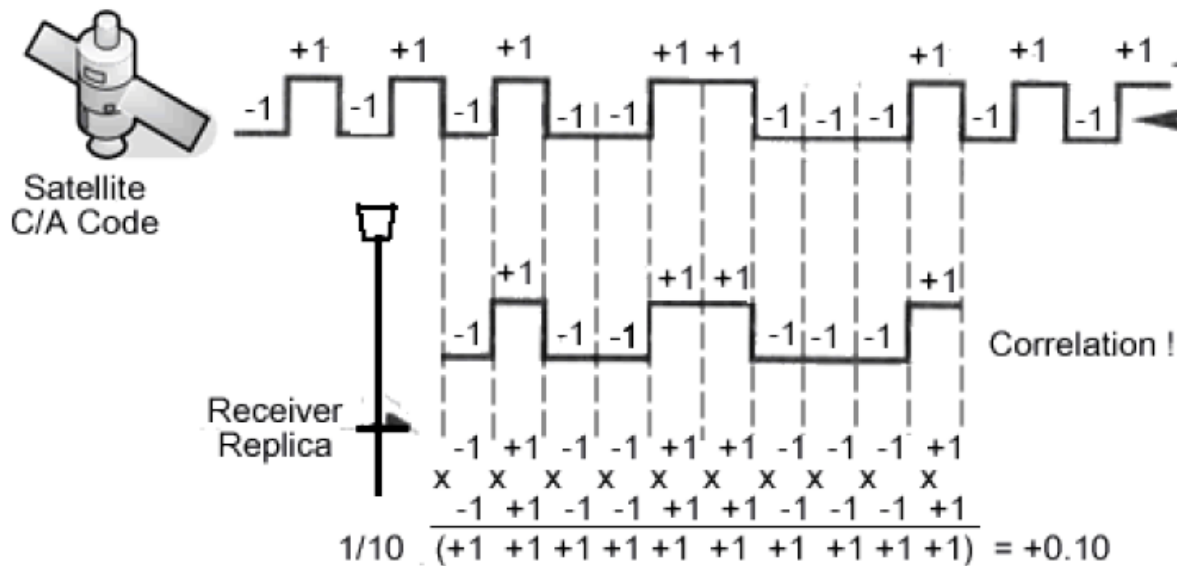
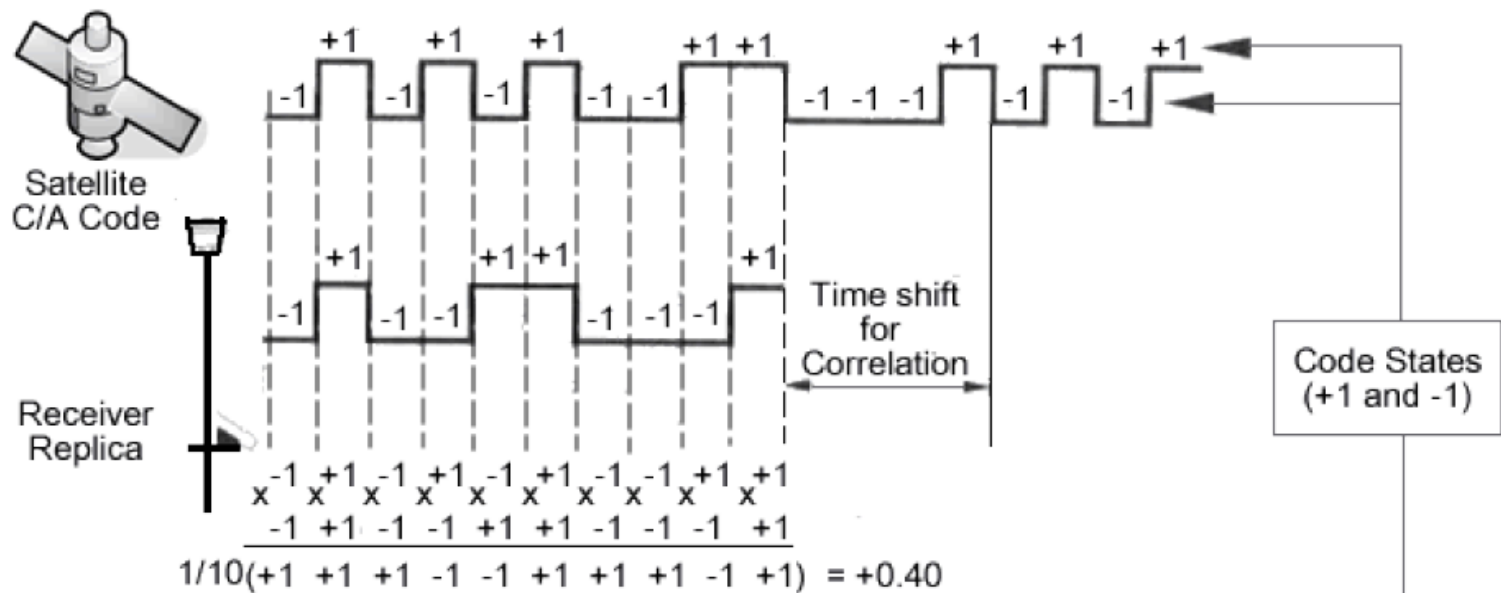
Переотражение

# Навигационное сообщение

- Эфемеридная информация
- Шкала времени системы и поправки часов спутников
- Признаки пригодности спутников
- Альманах с долгосрочной информацией
- Параметры модели ионосферы
- Параметры вращения Земли

Обновление: от 1 раза в полчаса до 1 раза в день.

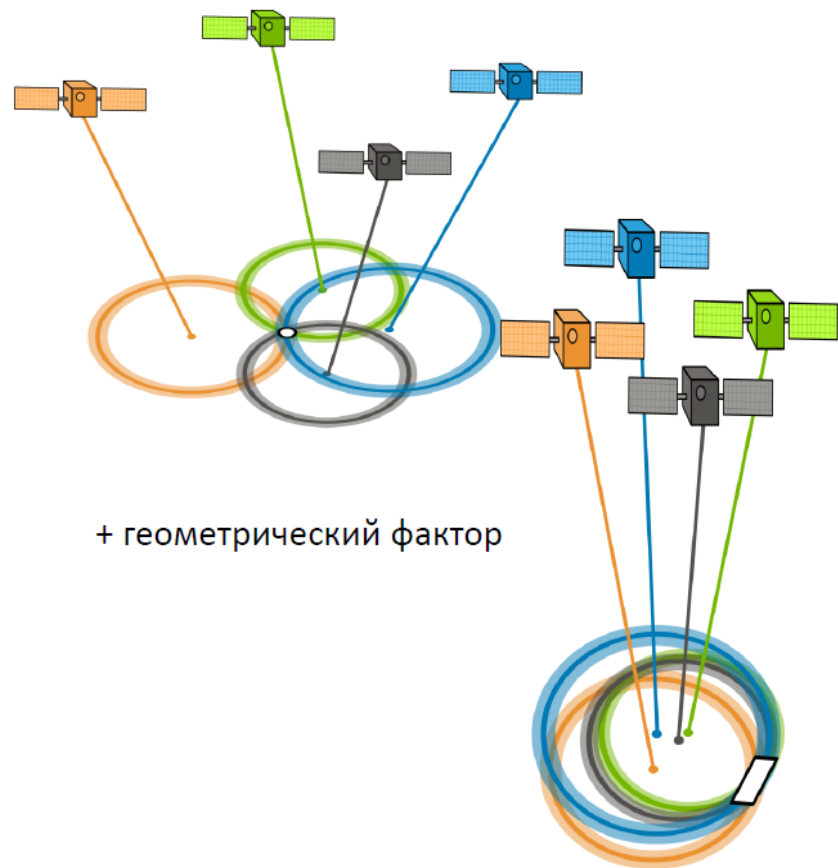
# Кодовые измерения





# Ошибки и точность

Параметр	Абсолютная ошибка	После коррекции (если есть)
Положение спутника	300 м	1-3 м
Ошибка часов спутника	100 км	1-2 м
Ионосферная задержка	2-50 м	1-6 м
Тропосферная задержка	2-20 м	0.5 - 2 м
Релятивистские эффекты	< 13 м	< 1 м
Ошибка часов приёмника	< 300 км	~ 2 м
Задержка в приёмнике	~ 1 м	< 1 м
Шум приёмника	1-2 м	1-2 м
Переотражение	10-20м	0.5-10



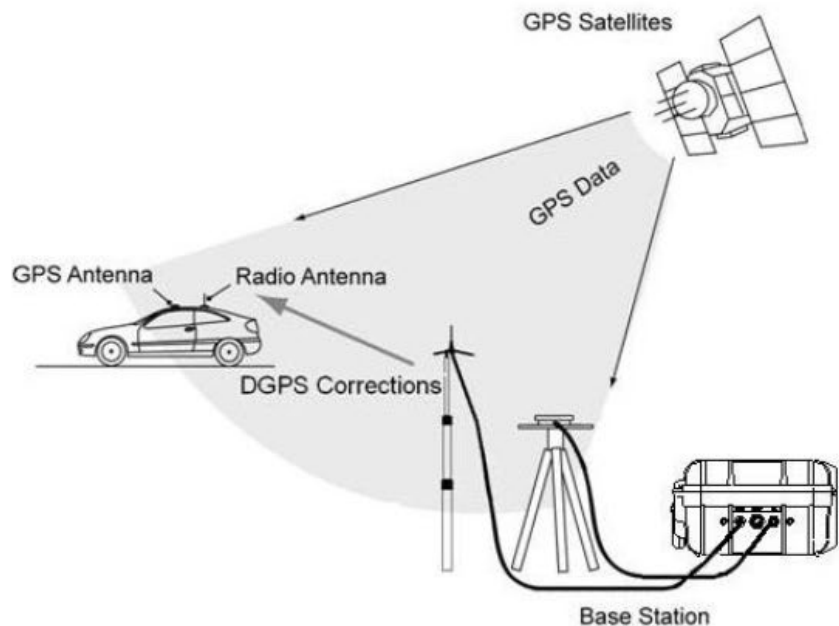
**Итоговая точность 5-10 м**

## Методы, позволяющие получить наилучшую точность в координатновременных задачах:

- Использование фазовых измерений
- Использование оборудования геодезического класса
- Постобработка измерений
- Дифференциальная коррекция (DGPS)
- Высокоточное позиционирование (PPP)

# Улучшение точности

Системы дифференциальной коррекции (< 1-3 м)

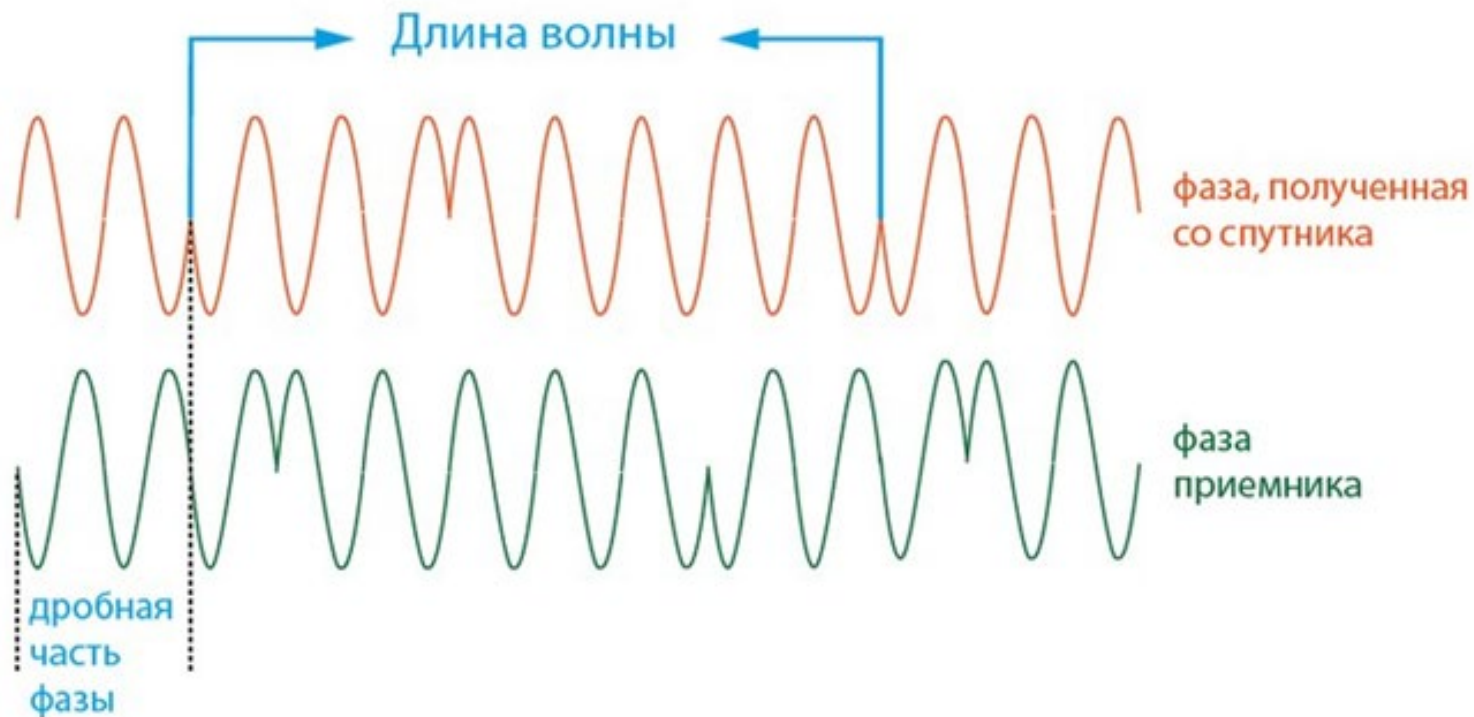


Режимы с базовой станцией (< 1 см)



+ двухчастотные измерения

# Фазовые измерения



Точность измерений:  $< 1$  мм

Точность определяемых параметров:  $< 1$  см

# Уравнение измерений

$$L_i = \rho + c(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + T + I + \epsilon_{rec} + D_{sat} + Rel + M + \xi + \lambda_i N_i + \lambda_i \omega_i$$

$L_i$  – фазовая псевдодальность

$N_i$  – начальная целочисленная фазовая неоднозначность, число полных периодов

$\omega_i$  – разность начальных фаз генераторов приемника и спутника

$\lambda_i$  – длина волны

Комбинация:

$$L = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

# Состав системы

- орбитальная группировка
- наземная система управления и контроля
- аппаратура потребителя
- наземная система радиомаяков
- информационная радиосистема для передачи пользователям поправок





# International GNSS Service

[https://network.igs.org/?\\_ga=2.132866185.624180688.1685445194-1385769482.1685445194&\\_gl=1\\*pzmhmo\\*\\_ga\\*MTM4NTc2OTQ4Mi4xNjg1NDQ1MTk0\\*\\_ga\\_Z5RH7R682C\\*MTY4NTQ0NTE5NC4xLjEuMTY4NTQ0NTM3NC42MC4wLjA](https://network.igs.org/?_ga=2.132866185.624180688.1685445194-1385769482.1685445194&_gl=1*pzmhmo*_ga*MTM4NTc2OTQ4Mi4xNjg1NDQ1MTk0*_ga_Z5RH7R682C*MTY4NTQ0NTE5NC4xLjEuMTY4NTQ0NTM3NC42MC4wLjA)

## IGS SLM and Network Upgrades **Now Available!**

LEARN MORE 🕒

Search Filter =

Projections Layers

**EBRE00ESP**

Latitude, Longitude: 40.821, 0.492  
Elevation: 107.3 m  
Country/Region: Roquetes, Spain  
Last Data Available: 2023-04-02  
Receiver: LEICA GR50  
Antenna: LEIAR25.R4  
Satellite System: GPS

Station Info

### Products



### Network



### News and Announcements



# Факторы, влияющие на движение спутника

- Геопотенциал
- Деформации Земли (Приливы, движения литосферных плит, локальные явления)
- Влияние Солнца и Луны
- Релятивистские эффекты
- Ошибки в параметрах вращения Земли (координат полюса)

# Величины ускорений

		Эффект через 3 часа	Через 3 дня
Центральная сила	0.56		
Сжатие	$5 \cdot 10^{-5}$	2 км	15 км
Прочие гармоника	$3 \cdot 10^{-7}$	50-80 м	0.1-1.5 км
Солнце, Луна, планеты	$5 \cdot 10^{-6}$	5-150 м	1-3 км
Приливные эффекты	$10^{-9}$	0.01 м	1 м
Давление излучения	$10^{-7}$	5-10 м	0.1-1км
Релятивистские эффекты	$10^{-9}$	-	5 м

# Другие тонкие эффекты

Эффект	Величина
Взаимная ориентация антенн (wind-up)	0.1-3 см
Положения фазовых центров антенн излучателей и приёмников	0.1-2м
Аппаратные межсистемные сдвиги	0.1 нс
Асимметричность атмосферы	
Атмосферная нагрузка и гидрологические процессы	0.1-1.5 см
Смещение геоцентра	0.1-2 см
Угловые атмосферные моменты	< 1 см
Ионосфера 2-го порядка	< 1 см

# Фундаментальное значение ГНСС

- Проверка эффектов теории относительности
- Глобальная тектоника Земли
- Локальные тектонические явления
- Модели приливов и атмосферы
- Изменения среднего уровня моря

# Достоинства

1. Высокая точность определения координат
2. Большое количество определяемых параметров
3. Большое количество наблюдений, станций, спутников
4. Относительная простота и дешевизна аппаратуры
5. Наблюдения в любую погоду, в любое время
6. Устойчивый к помехам диапазон радиоволн
7. Выполнение кинематических измерений, то есть измерений в движении



# Недостатки

1. Создание точной системы регистрации времени
2. Зависимость от препятствий и радиопомех
3. Блокировка сигнала
4. Наличие «радиовидимости» с определяемой точки не менее чем четыре спутников, что в условиях застроенной или залесенной территории не всегда возможно

# Точности определяемых параметров

Параметр	Значение
Положения спутников	3-5 см
Поправки часов спутников и станций	~75 пс ( $10^{-12}$ )
Координаты и скорости станций	3-6 мм, 2-3 мм/год,
Зенитная тропосферная задержка	4 мм
Координаты полюса вращения Земли	~30 $\mu$ с дуги (1 мм)
Продолжительность суток	~10 $\mu$ сек.

Parameter type	VLBI	GPS/ GLON.	DORIS/ PRARE	SLR	LLR	Alti- metry
Quasar Coord. (ICRF)	X					
Nutation	X	(X)			X	
Pole Coord. X, Y	X	X	X	X	X	
UT1	X					
Length of day (LOD)		X	X	X	X	
Sub-daily ERPs	X	X				
ERP Amplitudes of ocean tides	X	X		X		X
Station Coord.+ Velocities (ITRF)	X	X	X	X	X	(X)
Geocenter		X	X	X		X
Gravity field		X	X	X	(X)	X
Satellite orbits		X	X	X	X	X
LEO orbit determination		X	X	X		X
Ionosphere	X	X	X			X
Troposphere	X	X	X			X
Time/Frequency transfer	(X)	X	X			