Основы функционирования спутниковых навигационных систем

Владимир Валерьянович Суворкин

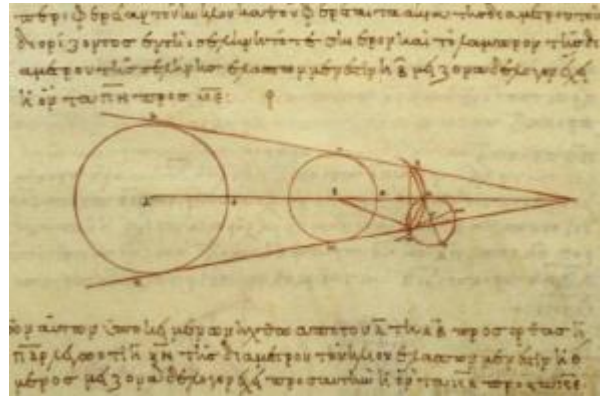
(научный сотрудник лаборатории космической геодезии и вращения Земли Института прикладной астрономии РАН)

Астрометрия

Основная задача: высокоточное определение видимых положений и скоростей светил.

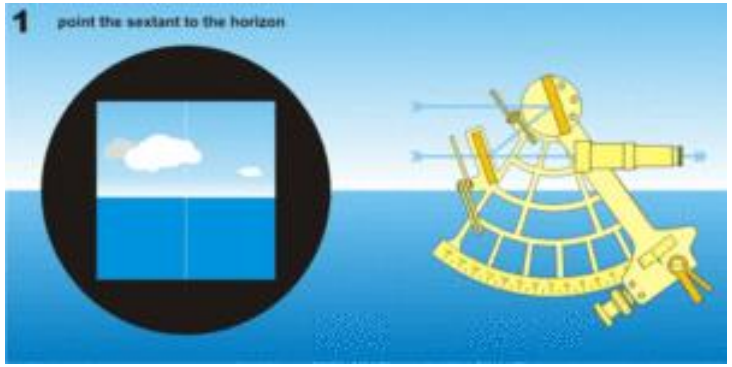
Применение:

Время, календарь, навигация.



Астрономическая навигация

Определение времени и местоположения.



Инструменты: угломерные инструменты (астролябия, секстант), хронометр.

Радионавигация

Определение местоположения при помощи радиотехнических средств.

- Наземные системы навигации.
- Спутниковые системы навигации.

Глобальные спутниковые навигационные системы

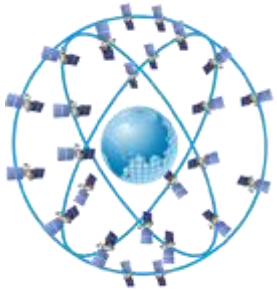
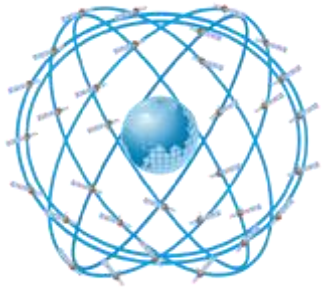
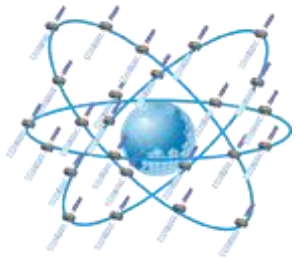
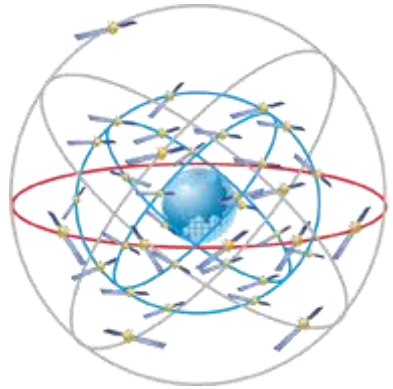
Действующие:

- GPS (Navstar)
- ГЛОНАСС

На этапе ввода:

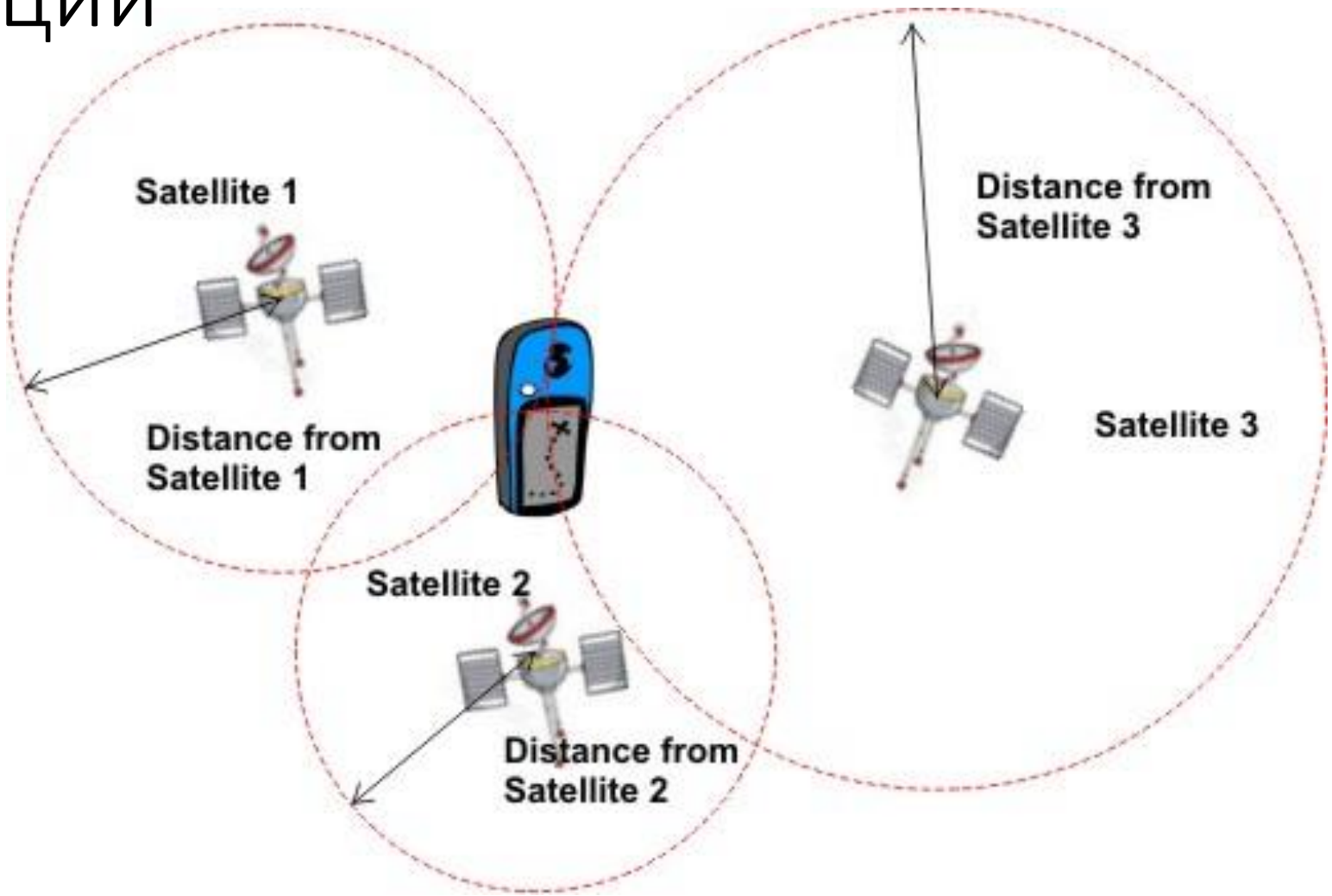
- Galileo
- Beidou

Глобальные навигационные спутниковые системы

	ГЛОНАСС	GPS	Galileo	Beidou
Количество КА	24	32	24(+3 резерв)	27
Высота орбиты	19 100 км	20 200 км	23 222 км	21 528 км
Период	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 58 мин	14 ч 4 мин 45 с	12 ч 53 мин 24 с
Наклонение	64.8°	55°	56°	55°
Плоскости	3	6	3	3
Частоты (МГц)	L1=1602.5625…1615.5 L2=1246.4375…1256.5 L3= 207.2420…1201.7430	L1=1575.42 L2=1227.60 L5=1176.45	E1=1575.42 (L1)E6=1278.750 E5=L5+L3 E5=1191.795 E5A=1176.46 (L5) E5B=1207.14 E6=12787.75	B1=1575.42 (L1)B2=1191.79 (E5) B3=1268.52

Принцип навигации



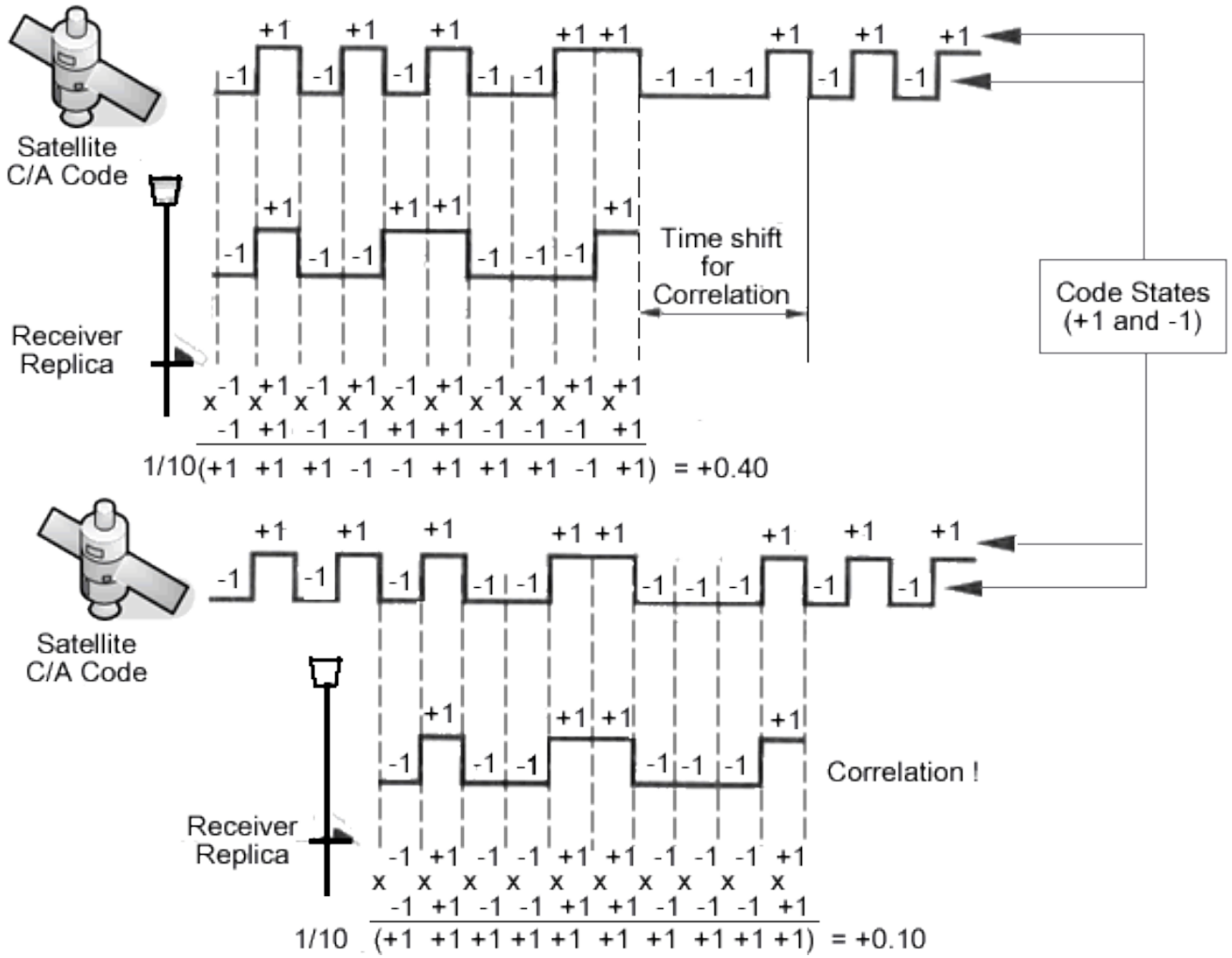
Расстояние

$$\rho = \Delta t \cdot c$$

Скорость света

Задержка сигнала

Кодовые измерения



Навигационное сообщение

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

Измерения приёмника

Кодовые измерения:

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

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

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

Ионосфера

Тропосфера

Инстр. шум приёмника

Случайная ошибка

Задержка в спутнике

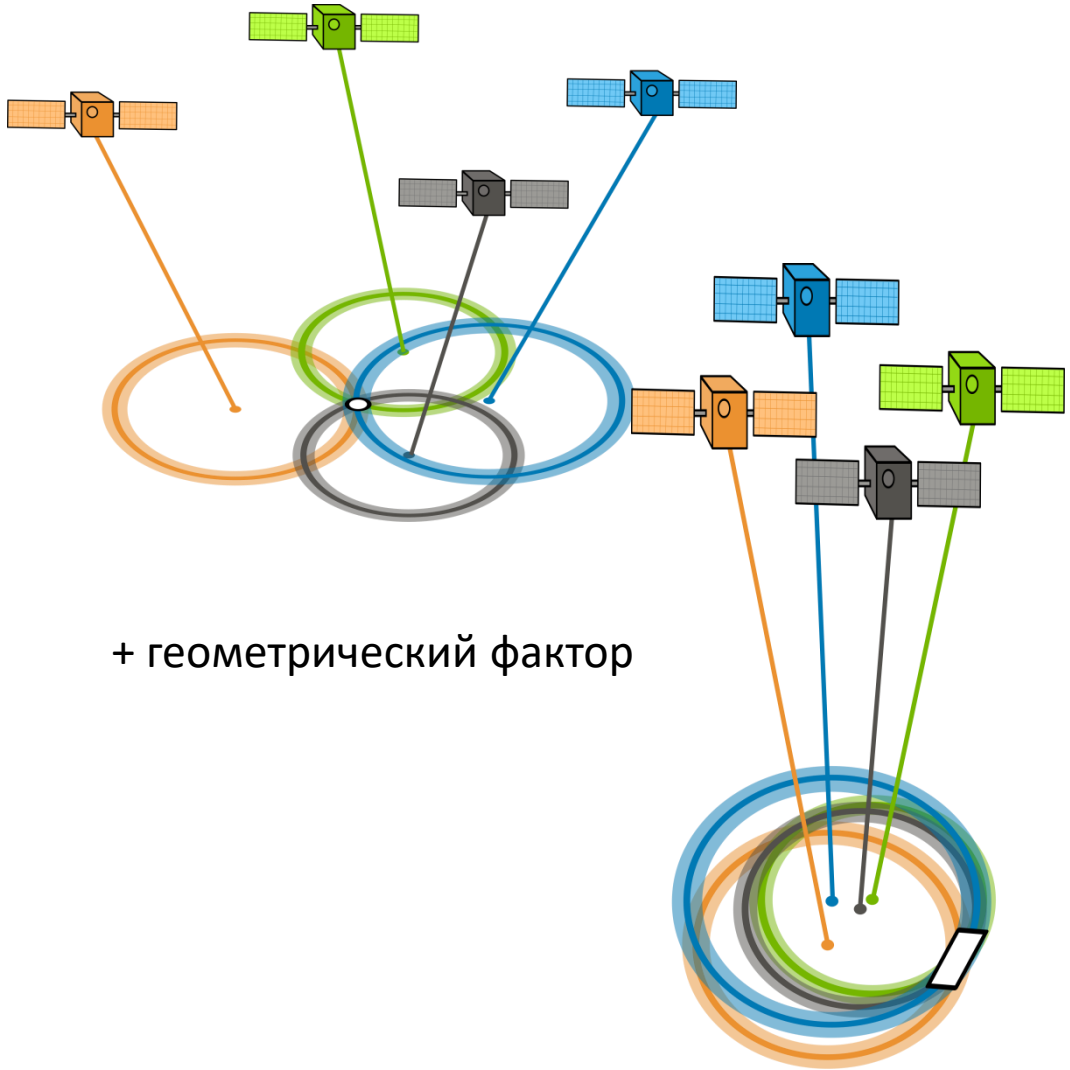
Релятивистские эффекты

Переотражение

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

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

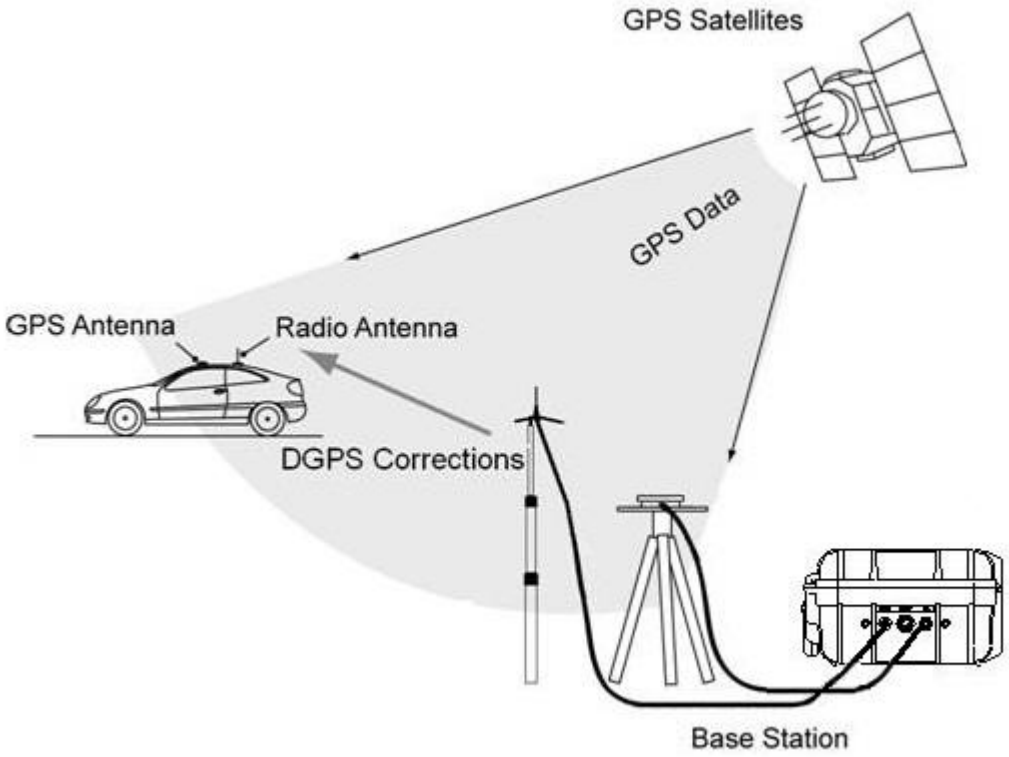


+ геометрический фактор

Итоговая точность 5-10 м

Улучшение точности

Системы дифференциальной коррекции (< 1-3 м)



Режимы с базовой станцией (< 1 см)

+ двухчастотные измерения

Высокоточное позиционирование, спутниковая геодезия

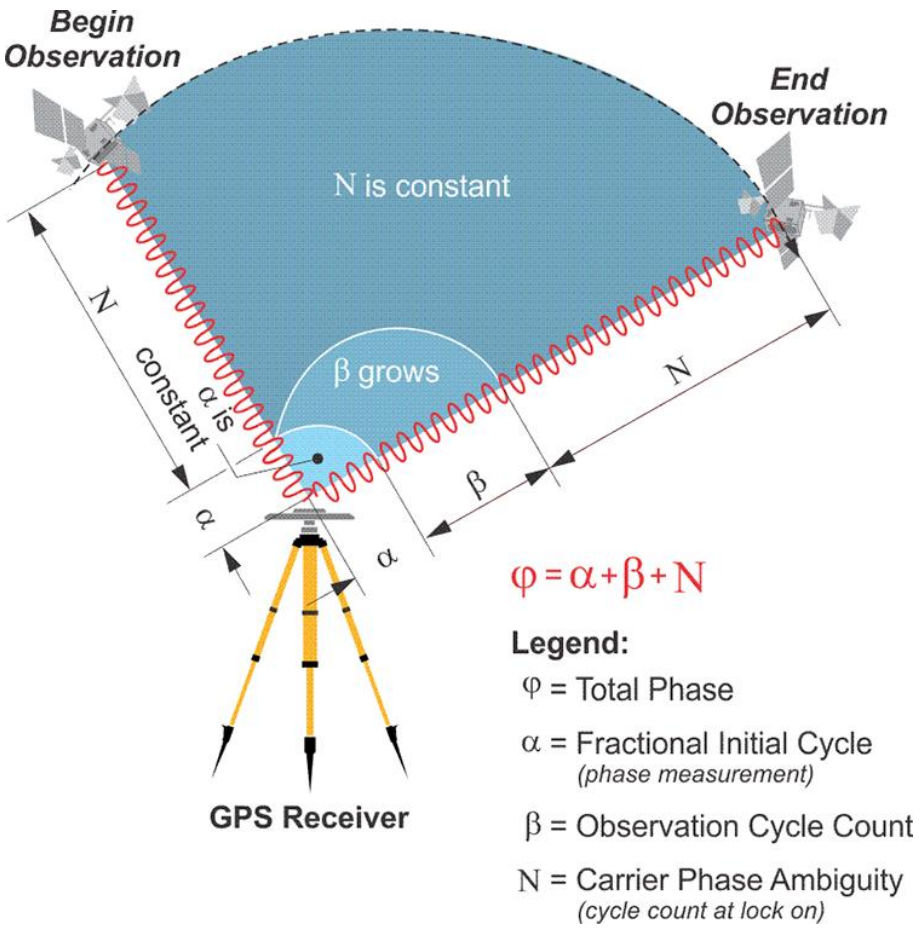
Методы, позволяющие получить наилучшую точность в координатно-временных задачах.

- Использование фазовых измерений
- Использование оборудования геодезического класса
- Постобработка измерений

Задачи:

- Высокоточное позиционирование
- Обеспечение функционирование ГНСС

Фазовые измерения



Точность измерений < 1 мм

Точность определяемых параметров: < 1 см

Уравнение измерений

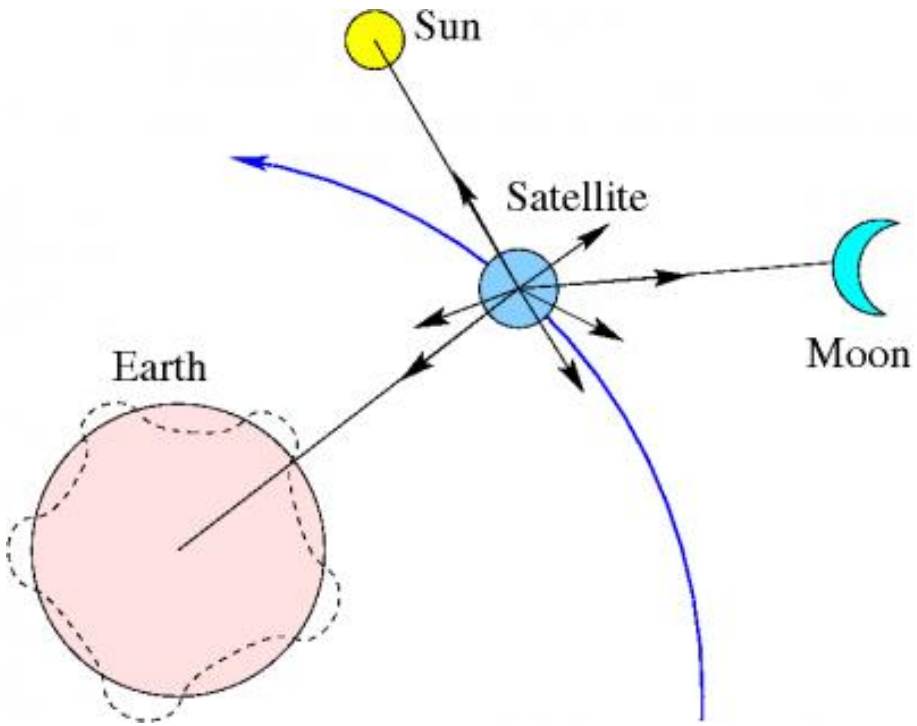
$$L_i = \rho + c(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + T + I + \epsilon_{rec} + D_{sat} + Rel + M + \xi + \lambda_i N_i + \lambda_i w_i$$

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

Уравнение движения спутника

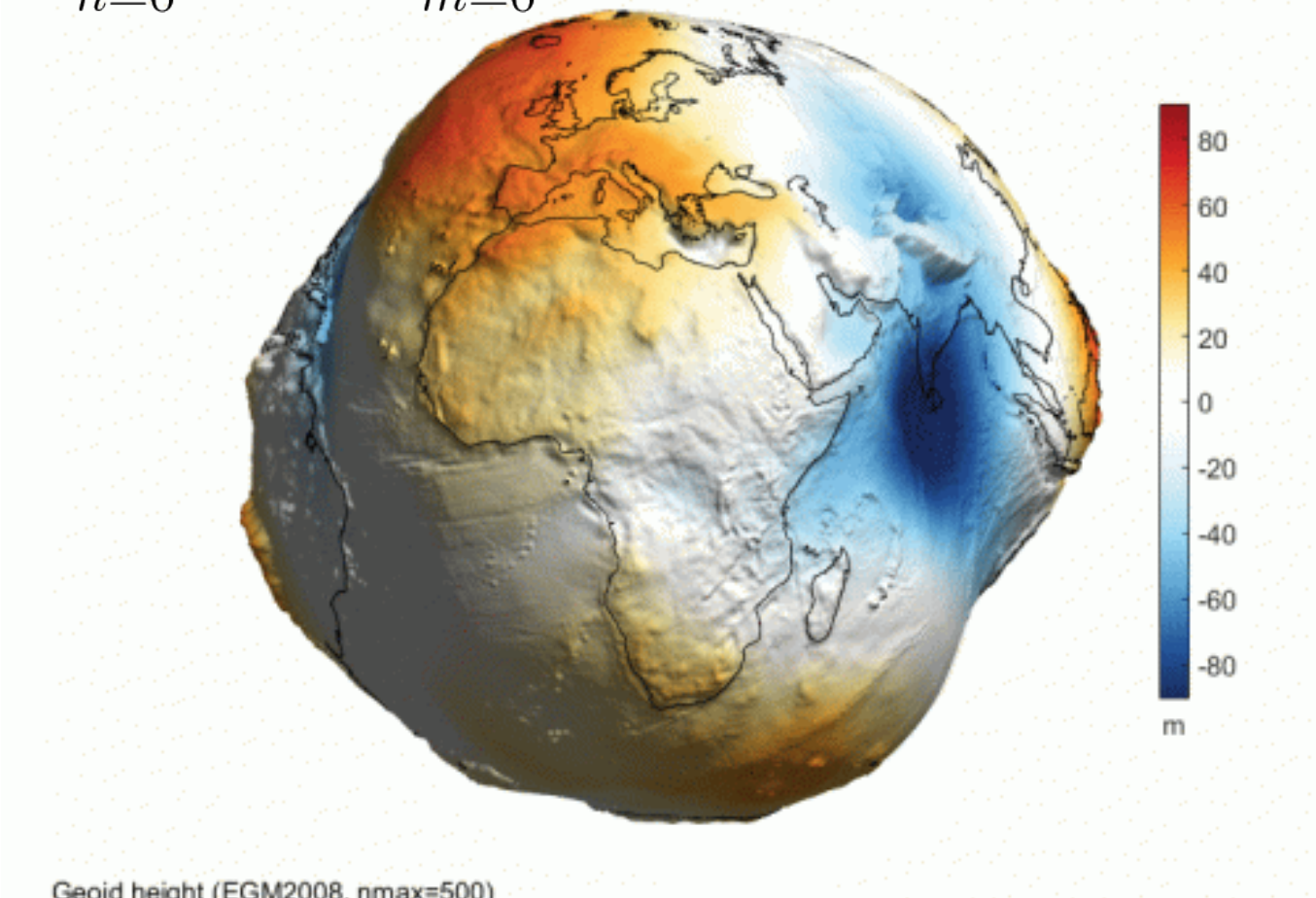
$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = \quad \mathbf{grad}\,(V(\mathbf{r}) + \delta V(\mathbf{r}, t)) + \mathbf{a}_{rel}(t, \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) +$$

$$+ \mathbf{a}_{tb}(t, \mathbf{r}) + \mathbf{a}_{srp}(t, \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, p_0, p_1, \dots)$$



Геопотенциал

$$V(r,\phi,\lambda) = \frac{GM}{r}\sum_{n=0}^{N}\left(\frac{a_e}{r}\right)^n \sum_{m=0}^{n}\left[\bar{C}_{nm}\cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm}\sin(m\lambda)\right]\bar{P}_{nm}(\sin\phi)$$



Geoid height (EGM2008, nmax=500)

Деформации Земли

Приливы, движения литосферных плит, локальные явления.

Влияние Солнца и Луны

Твердотельный прилив	До 30см
Океаническая нагрузка	До 3 см
Полюсной прилив	До 2.5 см

Релятивистские эффекты

- Постньютоновская вариация орбиты (до 2 м)
- Сдвиг показаний часов (13-20 см)
- Релятивистское искажение пути сигнала (до 2 см)

Величины ускорений

		Эффект через 3 часа	Через 3 дня
Центральная сила	0.56		
Сжатие	$5 \cdot 10^{-5}$	2 км	15 км
Прочие гармоники	$3 \cdot 10^{-7}$	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

Системы координат и параметры вращения Земли

В ГНСС важны геоцентрические Земная система координат и Небесная геоцентрическая система координат.

Ошибки координат полюса в положения спутников.

Другие тонкие эффекты

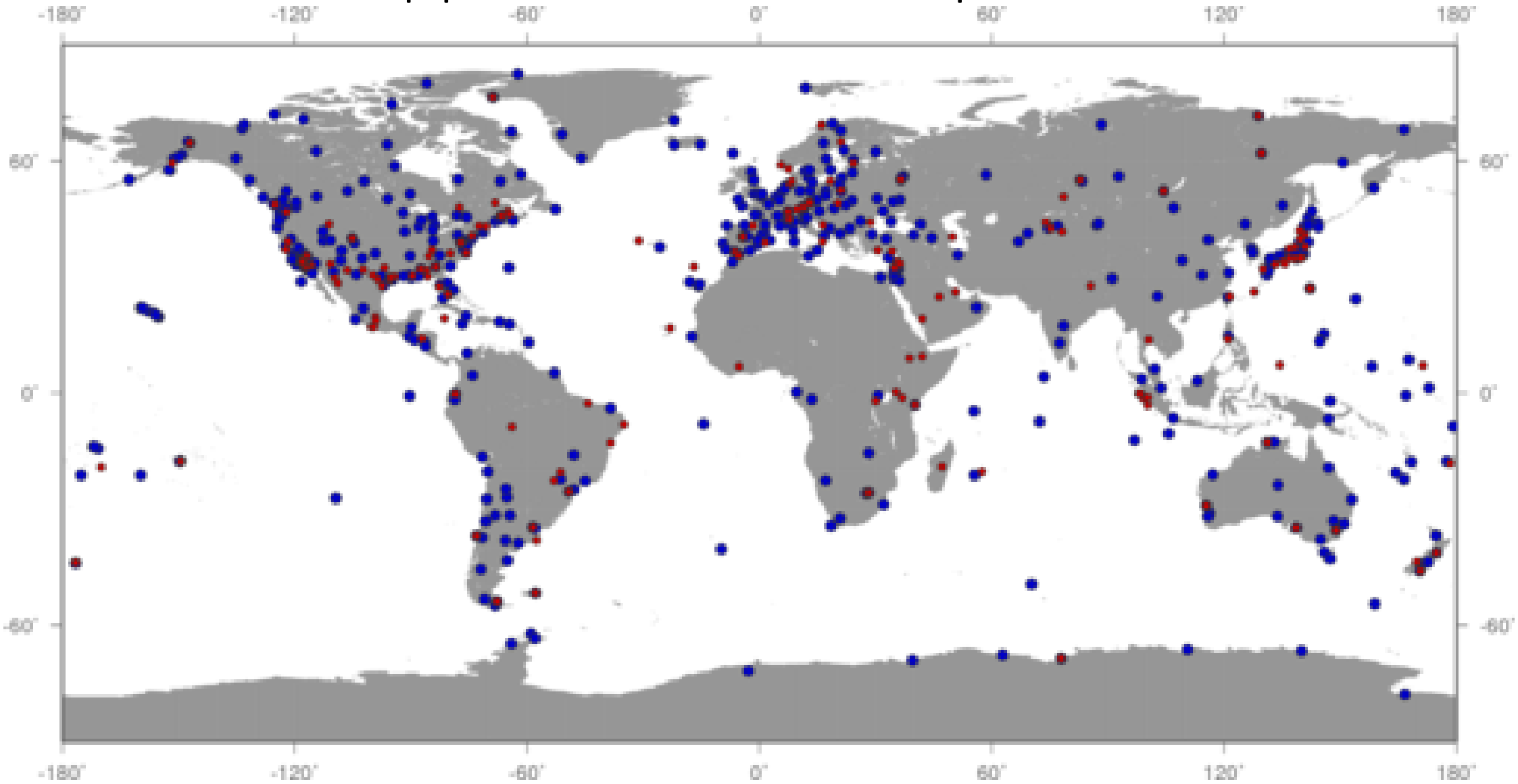
Эффект	Величина
Взаимная ориентация антенн (wind-up)	0.1-3 см
Положения фазовых центров антенн излучателей и приёмников	0.1-2м
Аппаратные межсистемные сдвиги	0.1 нс
Асимметричность атмосферы	
Атмосферная нагрузка и гидрологические процессы	0.1-1.5 см
Смещение геоцентра	0.1-2 см
Угловые атмосферные моменты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

Параметризация и решение системы уравнений

Ключевые свойства:

- Нелинейность
- Вырожденность

Сеть наблюдательных станций



Обсерватория Светлое

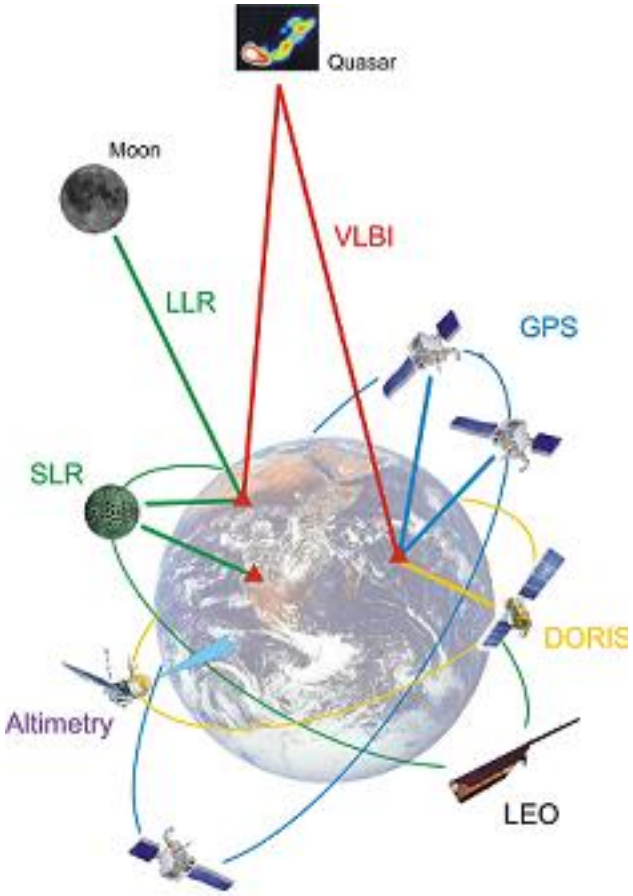
Точности определяемых параметров

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 μс дуги (1 мм)
Продолжительность суток	~10 μсек.

Фундаментальное значение ГНСС

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

Колокация средств космической геодезии



Цель: 1 мм в линейной мере и 1 микросекунда дуги в угловой